

6-2017

ПОЖ Издательство
НАУКА

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0869-7493

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

НОВЫЙ МЕТОД
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА
В РАЙОНЕ АВТОМАГИСТРАЛИ
ПРИ ГОРЕНИИ ТОРФА



УЧРЕДИТЕЛЬ –

ООО "Издательство "ПОЖНАУКА"

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

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

РЕДАКЦИЯ:

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 43.

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

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

Журнал включен в перечень ведущих рецензи-
руемых научных журналов и изданий, реко-
мендованных ВАК России для публикации
трудов соискателей ученых степеней, в Рефе-
ративный журнал и базы данных ВИНИТИ РАН,
в базу данных Российского индекса научного
цитирования (РИНЦ), в базу данных Russian
Science Citation Index на платформе Web
of Science, в справочно-библиографическую
службу EBSCO. Сведения о журнале ежегодно
публикуются в Международной справочной
системе по периодическим и продолжающимся
изданиям "Ulrich's Periodicals Directory".
Переводные версии статей журнала входят
в Международный реферативный журнал
"Chemical Abstracts".

Перепечатка материалов журнала "Пожаро-
взрывобезопасность / Fire and Explosion Safety"
только по согласованию с редакцией.

При цитировании ссылка обязательна.

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

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

Подписано в печать 15.06.2017.

Выход в свет 26.06.2017.

Формат 60х84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

Малыгин И. Г., д. т. н., профессор (Институт проблем транспорта им. Н.С. Со-
ломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия)

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

Пузач С. В., д. т. н., профессор, член-корреспондент НАНПБ, заслуженный
деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС
России, Москва, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

COMBUSTION AND EXPLOSION PROCESSES

ПОЛЕТАЕВ Н. Л.
О проблеме экспериментального обоснования
низкой взрывоопасности горючей пыли
в 20-литровой камере

5

POLETAEV N. L.
On the problem of experimental justification
of low explosibility for dust/air mixture
in the 20-l chamber

ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТЬ Веществ и материалов

FIRE-AND-EXPLOSION HAZARD OF SUBSTANCES AND MATERIALS

КОРОЛЕВ Д. С., КАЛАЧ А. В., ЩЕРБАКОВ О. В.
Применение методики прогнозирования
пожароопасных свойств продуктов
нефтепереработки на основе молекулярных
дескрипторов для обоснования температурного
класса взрывозащищенного электрооборудования

21

KOROLEV D. S., KALACH A. V., SHCHERBAKOV O. V.
Application of methods of forecasting fire hazard
properties of refined petroleum products
on the basis of molecular descriptors
for the justification of temperature class
of explosion-proof electrical equipment

УШКОВ В. А., КОПЫТИН А. В.,
ШУВАЛОВА Е. А., СМЕРНОВ В. А.
Горючесть и дымообразующая способность
композиционных материалов на основе
эпоксидных олигомеров

31

USHKOV V. A., KOPYTIN A. V.,
SHUVALOVA E. A., SMIRNOV V. A.
Combustibility and fume evolution
of epoxy matrix
composites

ОГНЕЗАЩИТА

FIRE RETARDANCE

НИГМАТУЛЛИНА Д. М., СИВЕНКОВ А. Б.,
ПОЛИЩУК Е. Ю., СЕНИНА Е. И., БАЛАКИН В. М.
Физико-механические и пожароопасные свойства
древесины с глубокой пропиткой
огнебиозащитными составами

43

NIGMATULLINA D. M., SIVENKOV A. B.,
POLISHCHUK E. Yu., SENINA E. I., BALAKIN V. M.
Physical, mechanical and fire properties
of wood deep impregnated by flame
and bioretardants

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

ДУШКИН А. Л., ЛОВЧИНСКИЙ С. Е., РЯЗАНЦЕВ Н. Н.
Экранирование тонкораспыленной водой
излучения от пожара

52

DUSHKIN A. L., LOVCHINSKIY S. E., RYAZANTSEV N. N.
Finely-dispersed water fire radiation
screening

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ зданий, сооружений, объектов

FIRE-AND-EXPLOSION SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

ЛОЖКИН В. Н.
Новый метод прогнозирования загрязнения воздуха
в районе автомагистрали при горении торфа

60

LOZHKIN V. N.
New approach for predicting of air pollution
near highway caused by burning peat bog

ДИСКУССИИ

DISCUSSION

КНЯЗЕВ П. Ю., САВЕЛЬЕВ Л. Н.
Презумпция виновности или "Горящая Россия-2"

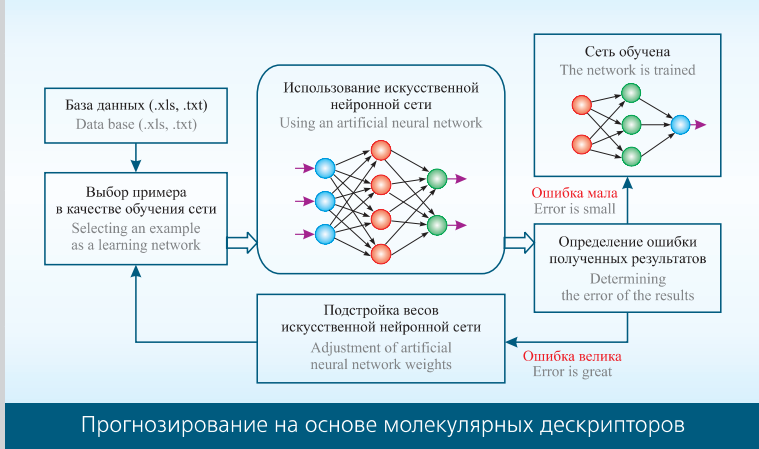
70

KNYAZEV P. Yu., SAVELYEV L. N.
Presumption of innocence or "Russia in fire-2"

ВОПРОС – ОТВЕТ

79

QUESTION – ANSWER



Свойства древесины с глубокой огнебиозащитной пропиткой



Экранирование тонкораспыленной водой излучения от пожара



Загрязнение воздуха в районе автомагистрали при горении торфа



Презумпция виновности или "Горячая Россия-2"

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

Стр. 21

Стр. 43

Стр. 52

Стр. 60

Стр. 70



FOUNDER —

"POZHNAUKA" Publishing House, Ltd.

Journal founded in 1992,
issued 12 times per year.

Publication is registered by the Federal
Service for Supervision of Communications,
Information Technology, and Mass Media
of Russia. Registration certificate
PI No. FS 77-43615 on January 18, 2011.

EDITORIAL STAFF:

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

Editorial director **Sokolova N. N.**

Editor **Krylova L. V.**

Address of Editorial Staff:

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

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

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

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

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

No part of this publication may be used or re-
produced in any form or by any means without
the prior permission of the Publishers. Repro-
ducing any part of this material a reference to
the journal is obligatory.

Authors and advertisers account for contents
of given papers and for publishing in the open
press.

Opinion of Editorial Staff not always coincides
with Author's opinion.

Signed for printing 15.06.2017.

Date of publication 26.06.2017.

Format is 60x84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing.

Printed at "DIALOG", Ltd.

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

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Н. Л. ПОЛЕТАЕВ, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИПО, 12; e-mail: nlpvniipo@mail.ru)

УДК 614.841.4

О ПРОБЛЕМЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ НИЗКОЙ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ГОРЮЧЕЙ ПЫЛИ В 20-ЛИТРОВОЙ КАМЕРЕ

Выполнен количественный анализ причин ошибочного отнесения невзрывоопасной, но горючей пыли к взрывоопасной по результатам исследования в 20-л камере. Показано, что тестирование аэровзвеси в 20-л камере происходит при повышенных по сравнению с нормальными (25 °С, 100 кПа) начальной температуре среды и начальном давлении в камере. Показано также, что к росту начальной температуры аэровзвеси приводят два процесса: распыление дисперсного материала в камере импульсом сжатого воздуха из ресивера; адиабатическое сжатие аэровзвеси при срабатывании источника зажигания и локальном выгорании пыли, оказавшейся в пламени и/или вблизи пламени источника зажигания, причем последний процесс вызывает рост начального давления в камере. Предложен новый надежный критерий взрыва пыли, основанный на ограничении разнообразия развития зажигания аэровзвеси двумя сценариями (Cashdollar and Chatrathi, 1993), а именно локальным выгоранием пыли в некоторой окрестности источника зажигания и взрывом пыли, охватывающим весь объем камеры, и на существенном отличии скачков давления в камере, ожидаемых для разных сценариев. На основе данных результатов для аэровзвеси антрацита, исследованной в 20-л камере US Bureau of Mines, предсказана взрывоопасность при температуре 140 °С, а также предложены способы реализации экспериментального исследования пыли с низкой взрывоопасностью при начальных условиях, близких к нормальным.

Ключевые слова: взрыв пыли; 20-л камера; критерий взрыва; низкая взрывоопасность; высокое LOC; антрацит.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20

Введение

Известно [1], что при высокой степени измельчения твердого горючего материала может образоваться дисперсный материал, способный распространять волну горения в состоянии аэровзвеси при нормальных условиях (давлении воздуха $P = 100$ кПа, температуре аэровзвеси $T = 298$ К, или 25 °С) и объемном содержании кислорода в воздухе (представляющем собой для простоты смесь кислорода и азота) $C_{OX} = 0,21$. Такой дисперсный материал называют взрывоопасной горючей пылью (ВГП), а распространяющую пламя аэровзвесь — взрывоопасной аэровзвесью. Полагают, что распространение пламени по аэровзвеси ВГП при нормальных условиях возможно лишь при значении C_{OX} в воздухе, превышающем критическое значение, именуемое минимальным взрывоопасным содержанием кислорода (LOC, от англ. *limiting oxygen concentration*), и в определенном диапазоне концентраций взвешенной пыли, зависящем от C_{OX} . Границы указанного диапазона называют нижним (LEL, от англ. *lower explosion limit*) и верхним концентрационны-

ми пределами распространения пламени. Вне этого диапазона концентраций пыли аэровзвесь не распространяет горение, т. е. является невзрывоопасной. Для ВГП, очевидно, при нормальных условиях $LOC \leq 0,21$.

Наряду с ВГП, встречаются невзрывоопасные горючие пыли (НГП), аэровзвеси которых при нормальных условиях и $C_{OX} = 0,21$ не распространяют горения ни при какой концентрации взвешенной пыли (LEL отсутствует). Взрывобезопасность горючих пылевидных материалов может быть вызвана, например, недостаточно малым размером частиц или присутствием в составе этих материалов компонентов, оказывающих флегматизирующее или ингибирующее воздействие на распространение пламени по аэровзвеси [2]. Широко известной НГП является антрацит [1]. Очевидно, что для НГП при нормальных условиях $LOC > 0,21$.

Естественно предположить, что всякая конкретная горючая пыль по результатам экспериментального исследования должна быть однозначно классифицирована, т. е. отнесена либо к ВГП, либо к НГП.

Данная процедура не вызывает у экспериментаторов сомнений при ярко выраженной взрывоопасности пыли или при отсутствии признаков взрыва в испытаниях, заведомо способствующих завышению взрывоопасности пыли. Проблема классификации пыли возникает лишь в том случае, когда ее аэровзвесь проявляет низкую взрывоопасность. Последнее указывает на принадлежность “проблемной” пыли к приграничной области между ВГП и НГП. Близость пыли к этой границе разумно характеризовать величиной LOC, которая для “проблемной” пыли, очевидно, удовлетворяет соотношению $LOC \approx 0,21$.

Как будет показано ниже, реальные условия стандартного исследования взрывоопасности пыли в силу различных обстоятельств отличаются от нормальных. Это влияет на величину LOC пыли и, следовательно, может привести к ошибочной классификации “проблемной” пыли. Классификация такой пыли усложняется еще из-за того, что параметры P и T , по значениям которых определяются нормальные условия испытаний, не являются исчерпывающей характеристикой всех факторов, влияющих на взрывоопасность пыли в конкретных экспериментах. К важнейшим из таких факторов относится склонность частиц пыли к агломерации и несовпадение дисперсного состава образца полидисперсной пыли от опыта к опыту.

Таким образом, проблему экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли следует считать весьма сложной. Цель настоящей работы — исследование некоторых аспектов этой проблемы, формулировку которых целесообразно предварить уточнением определения термина ВГП и кратким изложением истории возникновения современных методов ее исследования.

1. История проблемы и постановка задачи

Термин ВГП не имеет единого определения в действующей нормативной литературе, но можно выделить два основных варианта его толкования. Пример одного из толкований имеется в стандарте [3]. Комбинированием определений терминов “combustible dust” и “explosive dust atmosphere”, приведенных в данном стандарте, получим первое определение ВГП: “Твердые частицы размером не более 500 мкм, способные при нормальных условиях образовывать в открытом воздушном пространстве взвесь, в которой после воспламенения происходит самоподдерживающееся, т. е. ограниченное только габаритами аэровзвеси, распространение пламени”.

Другой вариант толкования термина ВГП имеется в стандарте [4]. Путем комбинирования определений терминов “combustible dust” и “dust explosion hazard area” получим второе определение ВГП:

“Тонкоизмельченный горючий твердый материал, взвесь которого в воздухе внутри герметичного объема при нормальных начальных условиях способна в определенном диапазоне концентраций горючего распространять пламя, представляющее опасность разрушения оболочки данного объема давлением продуктов горения”.

Приведенные определения ВГП не эквивалентны. Из общих соображений следует, что только первое определение, предполагающее стационарные условия движения пламени по аэровзвеси, соответствует теоретическим представлениям о качественном различии ВГП и НГП. Однако трудности создания стационарных (или квазистационарных) условий обращения исследуемых аэровзвесей в гравитационном поле Земли привели к тому, что широко используется в настоящее время лишь второе определение, имеющее, очевидно, прикладной характер. Выбору основного определения ВГП способствовали изменения в области экспериментального изучения горения аэровзвесей за последние несколько десятилетий.

Начало изменениям положило решение фирм BASF, Bayer, Ciba-Geigy и Hoechst об организации в 1966 г. рабочей группы во главе с В. Барткнехтом (W. Bartknecht), перед которой была поставлена задача — создать объективный экспериментальный метод оценки взрывоопасности пыли и разработать надежные методы исключения или ослабления разрушительных последствий взрыва пыли [5]. Данное решение промышленных корпораций было вызвано участвовавшими случаями аварий, сопровождавшихся пылевыми взрывами, и неудовлетворительным состоянием экспериментальных методов исследования взрывоопасности аэровзвесей пылевидных материалов, в которых использовались в основном малообъемные (от 1,3 до 8,0 л) взрывные камеры [1].

Финансируемые упомянутыми фирмами работы завершились созданием метода исследования в герметичной реакционной камере (далее — камере) объемом 1 м³, который впоследствии был стандартизован [6]. Поскольку исследованиями в камере такого объема установлено, что взрывоопасность аэровзвеси нередко проявляется при использовании энергоемкого пиротехнического источника зажигания (ИЗ), источник зажигания в этой камере имеет запас энергии $E_{ig} = 10$ кДж. Проведение исследований в крупномасштабной камере сопровождается значительными расходами дисперсных материалов и высокими затратами. В связи с этим рядом сотрудников рабочей группы во главе с Р. Сивеком (R. Siwek) был разработан метод исследования [7] в сферической или квазисферической камере объемом порядка 20 л, где с учетом упомянутой особенности проявления аэровзвесей взрывоопасно-

сти также используется энергоемкий ИЗ (E_{ig} от 2 до 10 кДж). Как в 20-л, так и в кубометровой камере критерием взрыва исследуемой аэровзвеси является превышение возникающим в камере давлением определенного порогового значения, что отвечает содержанию второго определения ВГП.

В дальнейшем 20-л камера была использована во многих нормативных документах в качестве эквивалентной замены камеры объемом 1 м^3 и оказалась в настоящее время основным инструментом исследования ВГП. Уже на стадии создания 20-л камеры отметили количественные отклонения полученных в ней данных от результатов исследования в камере объемом 1 м^3 . Причины этого несоответствия объяснялись различием удельной площади поверхности разномасштабных камер и турбулентных состояний аэровзвеси [1]. Результаты, полученные в камере объемом 1 м^3 , считают более надежными, поскольку большие размеры камеры, с одной стороны, позволяют улучшить соответствие выводов исследований первому определению термина ВГП, а с другой — сопоставимы с размерами промышленных аппаратов. В связи с этим результаты исследования в 20-л камере подвергаются определенной математической корректировке для приведения в соответствие с результатами, которые ожидают получить в камере объемом 1 м^3 [7].

Впоследствии обнаружили дисперсные материалы, которые по результатам исследований в 20-л камере относили к ВГП, а по более надежным результатам исследования в камере объемом 1 м^3 — к НГП [8–10]. Отмеченные случаи завышения опасности НГП не имели четких признаков, однако способствовали появлению трех эмпирических правил “недоверия” результатам, полученным в 20-л камере:

- 1) если при исследовании в 20-л камере US Bureau of Mines (USBM) пыль взрывается при энергии пиротехнического источника зажигания $E_{ig} = 5$ кДж, но при этом индекс взрывоопасности пыли $K_{st} < 0,15$ МПа·м/с, то весьма вероятно, что данная пыль по результатам испытаний в кубометровой камере будет отнесена к НГП [9];
- 2) если пыль в 20-л камере Р. Сивека не взрывается при $E_{ig} = 2,5$ кДж, но взрывается при $E_{ig} = 5$ кДж или $E_{ig} = 10$ кДж, то рекомендуется исследовать пыль в камере объемом 1 м^3 [10];
- 3) если в 20-л камере Р. Сивека при использовании ИЗ с $E_{ig} = 10$ кДж получено значение K_{st} менее 4,5 МПа·м/с, то весьма вероятно, что данная пыль по результатам испытаний в камере объемом 1 м^3 будет отнесена к НГП [8].

Последнее правило в стандарте [11] формулируется в менее жесткой, но обидной для использующих

20-л камеру форме: “Данная камера предназначена для имитации результатов исследований в камере объемом 1 м^3 . Если при исследовании пыли в 20-л камере получено значение K_{st} менее 5 МПа·м/с, то тестирование этой пыли в камере объемом 1 м^3 может привести к более низкому значению K_{st} ”. Возможность превращения недостатка 20-л камеры в ее преимущество будет рассматриваться в разд. 5.

Не отрицая положительной роли эмпирических правил “недоверия”, отметим их серьезный недостаток. Исполнение рекомендации “исследовать взрывоопасность пыли в камере объемом 1 м^3 ” сопряжено с намного большими, чем при исследовании в 20-л камере, финансовыми затратами и требует достаточной уверенности в необходимости такого исследования. Такую уверенность не порождают формулировки правил с расплывчатым оборотом “весьма вероятно”. Необходимо выявлять и анализировать процессы, способствующие качественному завышению опасности НГП в 20-л камере. К настоящему времени известны два таких процесса, ясно сформулированные в [10]:

I — локальное горение НГП в пламени ИЗ, приводящее к такому скачку давления в камере, который может быть принят за взрыв аэровзвеси;

II — существенное изменение начальных условий исследования свежей (т. е. находящейся вне зоны теплового влияния ИЗ) аэровзвеси НГП, которое переводит невзрывоопасную аэровзвесь во взрывоопасную и вызывает взрыв аэровзвеси во всем объеме камеры. Изменение опасности аэровзвеси авторы [10] связывали с повышением температуры свежей аэровзвеси под воздействием скачка давления в камере, вызванного первым процессом.

В то же время анализ процессов I и II, позволяющий выявить надежный признак взрыва НГП в 20-л камере, а также оценить для этого случая реальные начальные условия распространения пламени по свежей аэровзвеси, не был сделан ни в [10], ни в других работах, где завышение опасности НГП в 20-л камере получило название “overdrive”.

Известна оценка влияния энергии ИЗ E_{ig} на температуру исследуемой аэровзвеси в объеме 20-л камеры [8]. Однако пренебрежение неравномерностью нагрева среды в камере приводит к значительному завышению при данной оценке реального увеличения температуры исследуемой аэровзвеси, что препятствует использованию этой оценки. В [12] численно исследовали вытеснение частиц из слоя аэровзвеси, прилегающего к ИЗ, к стенкам камеры ударной волной, порожденной срабатыванием ИЗ. При этом ИЗ, производящий в основном конденсированные продукты горения, заменялся сжатым и нагретым газом с той же массой и тем же запасом энергии, 50 % которой расходуется на создание ударной волны. Хотя результат данной работы может привести

к уточнению массы НГП, выгорающей в области теплового влияния ИЗ, отсутствие экспериментальной проверки этого результата удерживает от его использования.

Таким образом, количественный анализ причин появления качественной ошибки при оценке взрывоопасности пыли в 20-л камере и поиск способов ее устранения представляется весьма актуальным. Настоящая работа посвящена:

- выявлению надежного признака взрыва аэровзвеси в 20-л камере;
- расчетно-экспериментальной оценке начального давления и температуры исследуемой аэровзвеси в 20-л камере; при оценке начальной температуры, наряду с известным механизмом нагрева аэровзвеси при срабатывании ИЗ [10], учитывается предварительный нагрев аэровзвеси, сопровождающий распыление дисперсного материала в 20-л камере;
- обсуждению возможных способов экспериментального выявления низкой взрывоопасности горючей пыли без применения крупномасштабного оборудования.

В качестве примера использования полученных в настоящей работе результатов приводится оценка температуры, при которой аэровзвесь антрацита, исследованная в [10], становится взрывоопасной.

Список использованных сокращений и обозначений приводится в конце работы.

2. Особенности методики исследования

В настоящей работе используются результаты исследований взрывоопасности аэровзвесей в 20-л камере при нормальных начальных условиях. Методика исследований допускает разнообразие парамет-

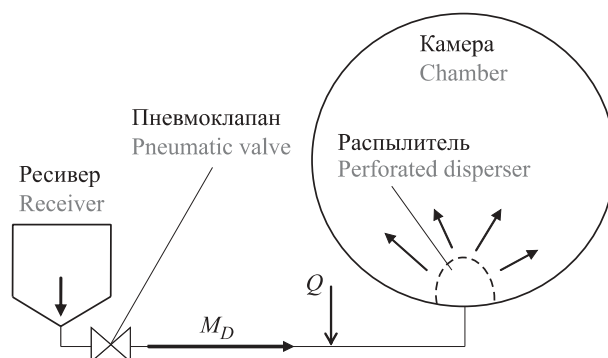


Рис. 1. Схема распыления
Fig. 1. Scheme of dispersing

ров и вспомогательных технических средств, которые влияют на решение поставленных задач. В связи с этим представляется целесообразным привести краткое описание методики с указанием ее возможных особенностей, в том числе особенностей исследования НГП.

2.1. Формирование аэровзвеси

Схема формирования аэровзвеси в камере объемом V_C порядка 20 л приведена на рис. 1. Образец исследуемой пыли массой M_D размещается на дне ресивера объемом V_R вблизи его выходного патрубка или в трубопроводе, соединяющем пневмоклапан с камерой. После размещения вблизи центра камеры ИЗ с энергией E_{ig} камеру вакуумируют до давления $P_{C,0} < P_0 = 100$ кПа.

Давление в ресивере поднимают до $P_{R,0} > P_{C,0}$. По команде с пульта управления открывают клапан на выходе из ресивера, что приводит к возникновению интенсивного потока воздуха из ресивера в камеру и распылению образца дисперсного материала. Параметры V_R , $P_{R,0}$ и $P_{C,0}$ подбирают таким образом, чтобы выравнивание давления в системе ресивер –

Таблица 1. Параметры методик исследования взрывоопасности пыли
Table 1. Parameters of methods for dust explosion investigation

Камера Chamber		Ресивер Receiver		Время распыления, 10^{-3} с Time of dispersing, 10^{-3} s	Энергия ИЗ E_{ig} , кДж Ignition energy E_{ig} , kJ	Задержка зажигания t_d , 10^{-3} с Ignition delay t_d , 10^{-3} s	Автор или фирма Author or firm
V_C , 10^{-3} м ³ V_C , 10^{-3} m ³	$P_{C,0}$, кПа $P_{C,0}$, kPa	V_R , 10^{-3} м ³ V_R , 10^{-3} m ³	$P_{R,0}$, МПа $P_{R,0}$, MPa				
20	40	0,6	2,1	40 ¹	2; 10	60	Р. Сивек [7] R. Siwek [7]
20	14	16	1	300 ²	2,5; 5; 10	400	USBM [9]
18,7 (камера № 1) 18.7 (Chamber No. 1)	65	0,76	1	100 ²	2,5; 5	110	ВНИИПО VNIIPPO
17,6 (камера № 2) 17.6 (Chamber No. 2)	40	0,76	1,5				

Примечание. Индексами обозначено место начального размещения образца пыли: ¹ — ресивер, ² — трубопровод.
Note. Place of initial placement of the dust sample: ¹ — receiver, ² — pipeline.

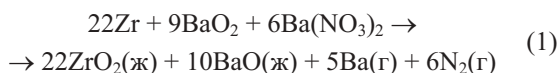
камера приходилось на величину P_0 , а закрытие клапана осуществляют до срабатывания ИЗ. При размещении образца пыли между ресивером и камерой можно снять ограничения на объем ресивера, и тогда закрытие клапана происходит в тот момент, когда давление в камере достигает P_0 . Концентрацию пыли в созданной таким способом аэровзвеси определяют как $C_D = M_D/V_C$. Параметры нескольких известных методик исследования взрывоопасности пыли приводятся в табл. 1.

Начальная температура пыли, воздуха в камере и воздуха в ресивере равна комнатной температуре, однако процесс распыления приводит к повышению температуры среды в камере. Действительно, за время процесса распыления (см. рис. 1) воздух в ресивере совершает работу по вытеснению определенной части своей массы и образца пыли M_D в камеру, вследствие чего охлаждается. Работа переходит в кинетическую энергию потока вытесняемого в камеру воздуха и пыли, а затем в тепловую энергию среды в камере из-за вязкости воздуха. Дополнительная энергия Q поступает к охлажденному потоку воздуха из ресивера путем теплопередачи от конструкций установки (на узком участке от выхода из ресивера до отверстий распылителя). К концу процесса распыления вложенная в поток энергия приведет к росту температуры воздуха и пыли в камере относительно начальной температуры. Расчет температуры аэровзвеси к моменту окончания распыления приводится в подразд. 4.1.

2.2. Срабатывание ИЗ и регистрация давления в камере

С задержкой t_d относительно начала распыления вызывают срабатывание ИЗ. Характерные значения t_d и E_{ig} приведены в табл. 1.

Для зажигания аэровзвеси в 20-л камере используют ИЗ, состоящий из одного или двух пиротехнических зарядов фирмы "Fr. Sobbe GmbH" [6, 7, 13–15]. Зарядом является смесь порошков циркония, диоксида бария и нитрата бария в соотношении масс 4:3:3 в форме таблетки, запрессованной в полуоткрытую оболочку U-образной (в сечении) формы и снабженной электрическим инициатором. Согласно [9] срабатывание ИЗ представляет собой экзотермическую реакцию:



с адиабатической температурой 3870 К. Выгорание образовавшихся паров бария происходит с участием кислорода воздуха:



Наличие газообразных продуктов реакций и перегретого расплава BaO (с температурой кипения около

3000 К) приводит к распылению конденсированных продуктов реакций в виде турбулентного факела. В интересующем нас случае для НГП возможны два сценария развития процесса зажигания с учетом предположений, описанных в работе [10].

Сценарий локального горения. Благодаря тепло- и массообмену продукты реакций (1) и (2) нагревают вовлеченную в факел аэровзвесь НГП и слой аэровзвеси НГП, прилегающий к факелу. Аэровзвесь НГП, нагретая до температуры, достаточной для перехода в состояние горючей аэровзвеси, выжигается вследствие локального распространения пламени. Тепловое расширение газообразных продуктов горения ИЗ и локального горения НГП приводит к скачку давления в камере и сжатию (вытеснению к стенкам камеры) свежей аэровзвеси НГП, которое сопровождается повышением ее температуры. По окончании локального горения НГП происходит снижение давления из-за охлаждения нагретой среды в камере стенками камеры.

Сценарий взрыва отличается от сценария локального горения тем, что изменение параметров свежей аэровзвеси НГП (рост температуры и давления) оказывается достаточным для ее перехода в аэровзвесь, распространяющую пламя. В этом случае процесс горения пыли выйдет за пределы области теплового воздействия ИЗ и приведет к взрыву свежей аэровзвеси в объеме всей камеры.

Единственным источником информации о процессе в камере является график зависимости давления в камере P от времени t . Основные результаты единичного опыта — абсолютное максимальное давление P_m , достигнутое в камере, и нормированное значение максимальной скорости нарастания давления $P'_m = (dP/dt)_m V_C^{1/3}$. Заключение о взрывоопасности пыли формируют на основании результатов, полученных при различных концентрациях пыли в аэровзвеси.

2.3. Критерий взрыва аэровзвеси

Как будет показано в разд. 4, оценка начальной температуры свежей аэровзвеси предполагает надежное разделение опытов в 20-л камере по сценариям развития процесса зажигания (состоялся взрыв аэровзвеси или нет). Такое разделение происходит на основе использования критерия взрыва аэровзвеси. В настоящее время единое мнение о таком критерии отсутствует.

В американских стандартах [13, 15] критерий взрыва в 20-л камере Р. Сивека имеет вид:

$$P_m \geq 200 \text{ кПа} + \Delta P_{ig}, \quad (3)$$

где ΔP_{ig} — экспериментально измеренное максимальное изменение первоначально нормального давления в камере, вызванное срабатыванием ИЗ в отсутствие пыли.

В руководстве [7] и европейских нормах [14] критерий взрыва в 20-л камере Р. Сивека имеет вид:

$$P_m \geq 120 \text{ кПа} + (E_{ig}/10 \text{ кДж}) \cdot 160 \text{ кПа}, \quad (4)$$

где второе слагаемое представляет собой расчетную оценку ΔP_{ig} .

Для 20-л камеры USBM [10] критерий взрыва требует выполнения двух условий, одно из которых совпадает с (3), а другое имеет вид:

$$P'_m \geq 0,15 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}. \quad (5)$$

Отсутствие единого нормативного критерия взрыва вызвано тем, что в основу его формирования принято закладывать формальное соответствие результатов исследования LEL в разномасштабных камерах (20 л и 1 м³) для нескольких видов пылей. При таком подходе на критерий взрыва в 20-л камере окажут влияние особенности методики исследования в камере объемом 1 м³, перечень использованных в сравнительных испытаниях видов пыли и низкая сходимость экспериментальной оценки LEL.

Очевидно, что приведенные варианты критерия взрыва неуниверсальны. В частности, возникает серьезное сомнение в правомерности их использования для случая, когда максимальное давление по всему спектру концентраций пыли в аэрозвеси немногим превосходит 200 кПа. Такое давление свидетельствует о маловероятной для случая взрыва турбулентной аэрозвеси эффективной температуре горения порядка 300 °С.

Объективный критерий взрыва в конкретной камере должен основываться на результатах исследования, полученных только в этой камере. Поиск такого критерия целесообразно связывать с тем обстоятельством, что переход от сценария локального горения к сценарию взрыва сопровождается существенным увеличением количества выгоревшей пыли и, следовательно, характеризуется значительным повышением P_m . По мнению автора, именно этот скачок давления следует использовать при выявлении принадлежности опыта (в том числе опыта с НГП) к случаю взрыва аэрозвеси. Обоснование правомерности такого подхода к формированию критерия взрыва приводится в разд. 3.

3. Уточнение критерия взрыва аэрозвеси

Из приведенного в подразд. 2.2 качественного описания процесса исследования взрывоопасности аэрозвеси НГП следует, что опыты с конкретным образцом НГП можно разделить на две группы в зависимости от сценария горения. Характерное значение P_m для опытов со взрывом должно быть существенно выше этого показателя для опытов с локальным горением.

Данное обстоятельство демонстрируется на графике рис. 2,а, где приводятся результаты исследования взрывоопасности пыли антрацита в 20-л камере USBM с $E_{ig} = 5 \text{ кДж}$ [10]. Краткие сведения о характеристиках исследованной в [10] пыли антрацита представлены в табл. 2.

Несложно разделить рассматриваемые опыты на две группы в зависимости от диапазона давлений, к которому принадлежит значение P_m : для первой группы опытов $185 \text{ кПа} \leq P_m \leq 300 \text{ кПа}$, для второй — $480 \text{ кПа} \leq P_m \leq 620 \text{ кПа}$. Существенный зазор между диапазонами (180 кПа) подтверждает качественное различие сценариев развития горения. Разумно полагать, что опытам с результатами из первой группы отвечает только локальное распространение пламени, из второй — взрыв аэрозвеси во всем объеме камеры.

При однородном распределении пыли по объему сосуда и постоянстве распределения частиц по раз-

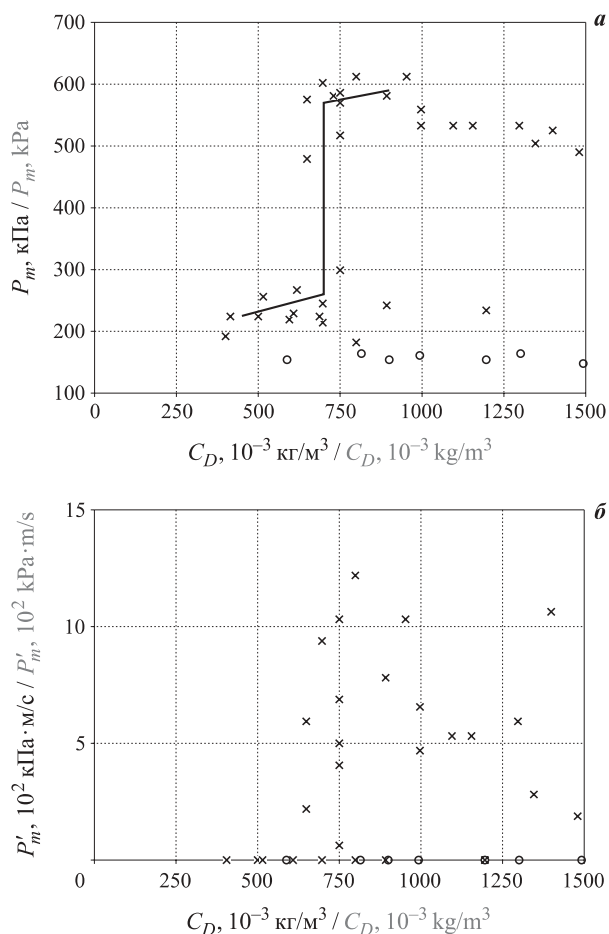


Рис. 2. Зависимость максимального давления (а) и нормированной максимальной скорости его нарастания (б) от концентрации антрацита для двух энергий источника зажигания [10]: ○ — 2,5 кДж; × — 5 кДж

Fig. 2. Dependence of the maximum pressure (a) and the normalized maximum rate of pressure rise (b) on the concentration of anthracite for two energies of the ignition source [10]: ○ — 2.5 kJ; × — 5 kJ

Таблица 2. Характеристики антрацита и гильсонита, исследованных в [10]**Table 2.** Characteristics of anthracite and gilsonite, investigated in [10]

Пыль Dust	Доля, % масс., фракции, мкм Dust, % weight, fraction, μm		Содержание, % масс. Content, % weight				Теплота сгорания, МДж/кг Heating value, MJ/kg
	< 75	< 20	связанного углерода fixed carbon	летучих volatile matter	зола ash	влаги moisture	
Антрацит Anthracite	85	23	79	8	11	2	29,7
Гильсонит Gilsonite	91	36	15	84	0	1	41,4

меру следует ожидать S-образную зависимость давления в камере от концентрации пыли, условно изображенную на рис. 2,а ломаной линией. Из-за неоднородности реального распределения пыли по объему камеры и флуктуаций дисперсного состава исследуемых проб переход между этими ветвями размыт. Это позволяет наблюдать разделение по упомянутым выше группам набора из опытов, отвечающих одной и той же средней концентрации пыли.

Хотя рассмотренный пример касается частного представителя НГП (антрацита), было бы разумно обобщить результаты анализа этого примера в следующей форме. Если многочисленные измерения P_m при различных концентрациях пыли не позволяют выделить диапазон концентраций, в пределах которого наблюдается S-образная зависимость давления в камере от концентрации пыли, то все опыты отвечают локальному горению данной пыли. И наоборот, если удастся выделить такой диапазон концентраций, то опыты, относящиеся к верхней ветви зависимости, отвечают случаю взрыва аэровзвеси.

Для обоснования правомерности сделанного обобщения добавим следующее рассуждение. Нижний предел диапазона концентраций пыли, занимаемого верхней ветвью S-образной зависимости $P_m(C_D)$ для антрацита (около $0,7 \text{ кг/м}^3$), является нижним концентрационным пределом распространения пламени по аэровзвеси ВГП, в которую перешла аэровзвесь антрацита после изменения параметров своего состояния (температуры и давления). Таким образом, для подтверждения существования скачка на графике $P_m(C_D)$ в области перехода от невзрывоопасной аэровзвеси к взрывоопасной можно также использовать экспериментальные данные по подобной зависимости $P_m(C_D)$ для аэровзвеси ВГП вблизи LEL.

С этой целью на рис. 3,а приводится зависимость $P_m(C_D)$ вблизи LEL для аэровзвеси гильсонита, относящегося к ВГП. Экспериментальные данные взяты из [10], обозначения аналогичны приведенным на рис. 2. Сведения о гильсоните представлены в табл. 2. При однородном распределении пыли по объему сосуда зависимость $P_m(C_D)$ должна иметь

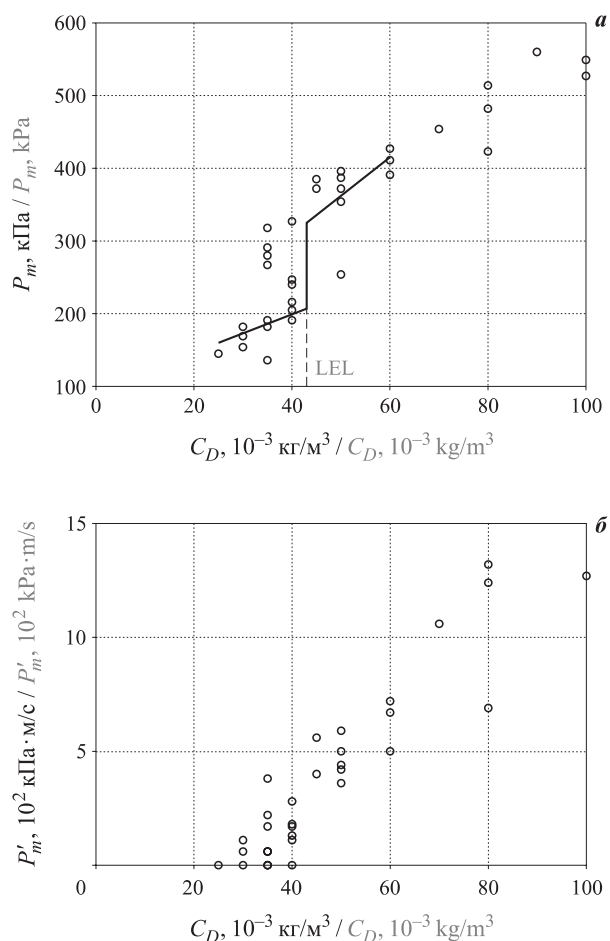


Рис. 3. Зависимость максимального давления (а) и нормированной максимальной скорости его нарастания (б) от концентрации гильсонита для источника зажигания с энергией 2,5 кДж [10]

Fig. 3. Dependence of the maximum pressure (a) and the normalized maximum rate of pressure rise (b) on the concentration of gilsonite for an ignition source with an energy of 2.5 kJ [10]

S-образный вид, условно изображенный на рис. 3,а ломаной линией. Нижний и верхний отрезки линии отвечают соответственно локальному горению пыли и взрыву во всем объеме камеры. Средний вертикальный отрезок линии соответствует, очевидно, LEL аэровзвеси, подогретой адиабатическим сжатием, реализованным продуктами горения ИЗ и продук-

тами локального горения пыли в пламени ИЗ. Неоднородность реального распределения пыли по объему камеры приводит к отличию экспериментальной зависимости $P_m(C_D)$ от ее модельного представления ломаной линией, которое выражается в появлении разброса результатов опытов. Тем не менее скачок давления P_m хорошо различим и обусловлен, как и в случае с НГП, распространением пламени по аэровзвеси, расположенной за пределами области теплового воздействия ИЗ.

С учетом сведений о P'_m на рис. 2,б и рис. 3,б можно заметить, что использованный в [10] критерий взрыва на основе уравнений (3) и (5) приводит к аналогичному разделению опытов на две группы. Однако этот критерий взрыва не имеет универсального характера по отношению к возможным особенностям методик исследования, поскольку P'_m зависит от уровня турбулентности аэровзвеси, который для методик, перечисленных в табл. 1, существенно разнится. Что касается современных критериев взрыва на основе уравнения (3) или (4), то их использование приведет к ошибочному переводу многих опытов из первой группы во вторую.

4. Эволюция температуры аэровзвеси НГП

Согласно качественному анализу методики исследования взрывоопасности пыли в 20-л камере, изложенному в разд. 3, первоначально нормальная (≈ 298 К) температура НГП и используемого для создания аэровзвеси воздуха повышается сначала на стадии распыления в 20-л камере, а затем на стадии горения ИЗ и локального выгорания пыли в пламени ИЗ. В данном разделе приводится оценка увеличения температуры аэровзвеси для каждой из этих стадий.

4.1. Расчет температуры аэровзвеси к моменту зажигания

Запишем уравнения, связывающие начальные (с индексом “0”) и конечные (с индексом “1”) значения параметров процесса распыления. Параметры, относящиеся к камере и ресиверу, отмечены индексами “С” и “R” соответственно:

$$\begin{aligned} \mu P_{C,0} V_C &= R M_{C,0} T_0; \quad \mu P_{R,0} V_R = R M_{R,0} T_0; \\ \mu P_{C,1} V_C &= R M_{C,1} T_{C,1}; \quad \mu P_{R,1} V_R = R M_{R,1} T_{R,1}; \\ (c_V M_{C,1} + c_D M_D)(T_{C,1} - T_0) &= \\ &= c_V M_{R,1} (T_0 - T_{R,1}) + Q; \\ P_{R,1} V_R^\gamma &= P_{R,0} V_{0,R}^\gamma; \quad M_{C,1} - M_{C,0} = M_{R,0} - M_{R,1}; \\ V_{0,R} / V_R &= M_{R,1} / M_{R,0}, \end{aligned} \quad (6)$$

где μ — средняя молекулярная масса воздуха; $\mu = 29$;
 P — давление воздуха, Па;
 V — объем, м³;

R — универсальная газовая постоянная;

$R = 8,314$ кДж/(кмоль·К);

M — масса воздуха, кг;

T — температура среды, К;

c_V — средняя теплоемкость воздуха в диапазоне температур от 200 до 500 К; $c_V \approx 720$ Дж/(кг·К);

c_D — средняя теплоемкость пыли в диапазоне температур от 298 до 500 К, Дж/(кг·К);

M_D — масса образца пыли, кг;

γ — показатель адиабаты воздуха в диапазоне температур от 200 до 500 К; $\gamma \approx 1,4$;

$V_{0,R}$ — объем воздуха, не покидавшего ресивер, м³.

Первые четыре уравнения системы (6) представляют собой уравнение состояния идеального газа, записанное для начального и конечного состояния воздуха в камере и в ресивере соответственно. Пятое уравнение выражает закон сохранения энергии, шестое является уравнением адиабаты для воздуха, не покидавшего ресивер, а остальные выражают закон сохранения массы воздуха. Различием температур пыли и воздуха в аэровзвеси пренебрегается.

Величина Q зависит от эффективности теплопередачи и принимает значения от 0 при отсутствии теплопередачи до максимального значения $Q_{\max}$, отвечающего случаю быстрой теплопередачи, восстанавливающей температуру вытесняемого из ресивера воздуха до T_0 . В результате несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} Q_{\max} &= \int_{M_{R,0}}^{M_{R,1}} c_{V,0} (T_0 - T) dM = \\ &= c_V M_{R,0} T_0 \left[\gamma - 1 + \frac{P_{R,1}}{P_{R,0}} - \gamma \left(\frac{P_{R,1}}{P_{R,0}} \right)^{1/\gamma} \right] \gamma^{-1}. \end{aligned}$$

С учетом того, что для методики USBM $P_{C,1} \approx P_0$, а для остальных методик $P_{C,1} = P_{R,1} \approx P_0$, система (6) из восьми уравнений содержит восемь неизвестных: $T_{C,1}$, $T_{R,1}$, $P_{R,1}$, $M_{C,0}$, $M_{C,1}$, $M_{R,0}$, $M_{R,1}$, $V_{0,R}$. Наличие малого параметра $(T_{C,1} - T_0)/T_0$ в методиках Р. Сивека и ВНИИПО и малого параметра $(T_0 - T_{R,1})/T_0$ в методике USBM позволяет представить решение для повышения начальной температуры аэровзвеси $\Delta T_1 = T_{C,1} - T_0$ в упрощенном виде. В результате несложных преобразований получим:

- для методик Р. Сивека и ВНИИПО:

$$\begin{aligned} \Delta T_{1,\min} &\approx T_0 (1 + \Theta)^{-1} \left[\left(\frac{P_{R,0}}{P_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \frac{V_R}{V_C}; \\ \Delta T_{1,\max} &\approx T_0 (1 + \Theta)^{-1} \frac{(\gamma-1)(P_0 - P_{C,0})}{\gamma P_0}; \end{aligned} \quad (7)$$

- для методики USBM:

$$\Delta T_1 \approx T_0 (1 + \Theta)^{-1} \frac{(\gamma-1)(P_0 - P_{C,0})}{P_0 + (\gamma-1)P_{C,0}},$$

где $\Theta = c_D M_D / (c_V M_{C,1})$;

Таблица 3. Результаты расчетной и экспериментальной оценок повышения начальной температуры в камере $\Delta T_1 = T_{C,1} - T_0$ (К (°C)) при заполнении ее воздухом из ресивера

Table 3. The results of the calculated and experimental estimates of the increase in the initial temperature in the chamber $\Delta T_1 = T_{C,1} - T_0$ (K (°C)) when it is filled with air from the receiver

Метод оценки Estimate method	USBM	Р. Сивек R. Siwek		ВНИИПО (камера № 1) VNIIPPO (chamber No. 1)		ВНИИПО (камера № 2) VNIIPPO (chamber No. 2)	
	ΔT_1	$\Delta T_{1,min}$	$\Delta T_{1,max}$	$\Delta T_{1,min}$	$\Delta T_{1,max}$	$\Delta T_{1,min}$	$\Delta T_{1,max}$
Расчет ($\Theta = 0$) Calculation ($\Theta = 0$)	97	12	51	12	34	15	51
Эксперимент ($\Theta = 0$) Experiment ($\Theta = 0$)	...	...	...	$\Delta T_{1,exp} = 16$		$\Delta T_{1,exp} = 22$	
Расчет ($\Theta = 0,4$) Calculation ($\Theta = 0,4$)	69	9	36	9	24	11	36
Эксперимент ($\Theta = 0,4$) Experiment ($\Theta = 0,4$)	...	...	...	...		$\Delta T_{1,exp} = 16$	

$\Delta T_{1,min}$, $\Delta T_{1,max}$ — значения повышения начальной температуры, отвечающие оценке ΔT_1 , выполненной для случая $Q = 0$ и $Q = Q_{max}$ соответственно; различием между $\Delta T_{1,min}$ и $\Delta T_{1,max}$ для методики USBM пренебрегают из-за незначительного изменения T_R при распылении.

Экспериментальную проверку расчетной оценки ΔT_1 осуществляли с использованием установок ВНИИПО следующим образом. Опыт по заполнению камеры воздухом из ресивера проводили как без участия дисперсного материала ($\Theta = 0$), так и с его участием ($\Theta = 0,4$). После быстрого (за время процесса наполнения камеры порядка 0,1 с) достижения равновесного давления $P \approx P_0$ наблюдалось медленное, насыщающееся со временем изменение давления в камере на величину $-\Delta P_{exp}$. Характерное время изменения давления в камере $t_p \approx (1,2 \pm 0,2)$ с. Уменьшение давления в камере объясняли охлаждением среды до температуры T_0 в результате ее контакта со стенками камеры.

Экспериментальную оценку $\Delta T_{1,exp}$ осуществляли путем использования соотношения

$$\Delta T_{1,exp} = T_0 \Delta P_{exp} / P_0. \quad (8)$$

Результаты оценки ΔT с помощью соотношений (7) и (8) приведены в табл. 3.

В общем случае, температура среды в центральной части камеры к моменту зажигания

$$T_2 = T_0 + \Delta T_2 \quad (9)$$

будет иметь прирост $\Delta T_2 < \Delta T_1$ из-за охлаждения аэровзвеси при контакте со стенками камеры за время t_d , прошедшее с момента начала распыления. С учетом упомянутых выше наблюдений за релаксацией давления (пропорционального среднему значению температуры воздуха в камере) и соотношения $t_d \ll t_p$ разумно предложить следующую зависимость:

$$\Delta T_2 \approx \Delta T_1 \exp(-t_d/t_p). \quad (10)$$

Давление в камере к моменту зажигания в соответствии с требованиями методики исследования $P_2 = 100$ кПа.

4.2. Расчет температуры аэровзвеси после ее локального выгорания в пламени ИЗ

В соответствии с результатами разд. 3 настоящей работы все опыты с НГП можно разделить на две группы: опыты, в которых имело место локальное горение аэровзвеси НГП, и опыты, сопровождавшиеся взрывом аэровзвеси НГП. В соответствии с методикой проведения экспериментов для каждого из опытов первой группы известно значение P_m . Установим связь между P_m и температурой свежей аэровзвеси T_m .

Будем считать, что начальные условия рассматриваемой задачи, отмеченные индексом “2”, известны и соответствуют параметрам, достигнутым к моменту срабатывания ИЗ после распыления в камере НГП (см. подразд. 4.1).

Горение ИЗ и НГП в пламени ИЗ приводит к тепловому расширению газовой фазы продуктов горения, охватывающих область, которую будем именовать областью теплового влияния источника зажигания, или для краткости RIA (от англ. *region of ignition source action*). Рассмотрим окружающий RIA слой аэровзвеси, внутренняя (обращенная к RIA) и внешняя (обращенная к стенкам камеры) поверхности которого находятся на достаточном удалении от границы RIA и стенок камеры соответственно, чтобы процесс сжатия выбранного слоя аэровзвеси считать адиабатическим.

Рассчитаем повышение температуры рассматриваемого слоя аэровзвеси. Пренебрегая различием между температурами и скоростями воздуха и частиц, запишем уравнения, которым должны удовлетворять изменения параметров аэровзвеси при адиабатическом сжатии:

$$d(PV) = (R/\mu) m dT;$$

$$-P dV = (c_V m + c_D m_D) dT,$$

где P — давление воздуха, Па;

T — температура аэровзвеси, К;

V — объем слоя аэровзвеси, м³;

m_D, m — масса соответственно НГП и воздуха в рассматриваемом слое аэровзвеси, кг.

Первое уравнение получено дифференцированием уравнения состояния идеального газа (воздуха) фиксированной массы m . Второе уравнение выражает закон сохранения энергии — переход работы по сжатию воздуха в тепловую энергию аэровзвеси.

Решение этих уравнений приводит к соотношению

$$T_m = T_2 \left(\frac{P_m}{P_2} \right)^{(\gamma-1)/(\gamma+\Theta)}. \quad (11)$$

При выводе (11) учитывалось соотношение $\Theta = c_D M_D / (c_V M) = c_D m_D / (c_V m)$, вытекающее из равенства скоростей воздуха и частиц, и тождество $R = \mu(\gamma - 1)c_V$.

5. Условия взрывоопасности аэровзвеси антрацита

Особенностью результатов, представленных на рис. 2,а и относящихся к опытам, в которых $E_{ig} = 5$ кДж, является весьма широкий диапазон концентраций пыли антрацита (от 0,65 до 1,2 кг/м³), в пределах которого случайным образом реализуются оба сценария развития горения. Дальнейший анализ будет относиться именно к этому диапазону концентраций пыли антрацита.

Другой особенностью рассматриваемых результатов является значительный разброс значений P_m , относящихся к разным опытам с одинаковой средней концентрацией пыли в аэровзвеси C_D . Этот разброс характерен для исследований турбулентного горения аэровзвесей и вызван, в частности, неоднородностью распределения горючего по объему пылевоздушного облака на масштабах не только порядка расстояния между соседними частицами, но и порядка характерного размера вихревых образований турбулентной среды в камере. Последнее случайным образом меняет количество пыли в RIA и, следовательно, количество выделившейся энергии, влияющей согласно (11) на величину P_m .

С учетом перечисленных особенностей результатов [10] естественно предполагать, что верхняя граница значений P_m , отвечающих первой группе данных в упомянутом диапазоне концентраций аэровзвеси, представляет собой критическое значение P_m^* , с превышением которого реализуется сценарий взрыва. С учетом (11) справедливо следующее соотношение между параметрами T_m^* и P_m^* :

$$T_m^* = T_2 \left(\frac{P_m^*}{P_2} \right)^{(\gamma-1)/(\gamma+\Theta)}. \quad (12)$$

Для построения объективных закономерностей турбулентного горения аэровзвеси требуется многократное повторение экспериментов. Этому требованию из всего диапазона рассматриваемых концентраций пыли в наибольшей степени соответствует достаточно узкий участок (675 ± 75) г/м³, в пределах которого проведено 14 опытов с равным (по 7 опытов) распределением между двумя группами данных. Для этого узкого участка разумно предположить, что $P_m^* \approx 295$ кПа. С учетом (7), (9)–(11) получим $T_m^* \approx 413$ К (140 °C).

Для случая (см. рис. 2,а) исследования взрывоопасности антрацита с ИЗ, у которого $E_{ig} = 2,5$ кДж, S-образной зависимости давления в камере от концентрации пыли не наблюдалось. Несмотря на отсутствие многократного повторения экспериментов разумно предполагать, что взрыв аэровзвеси в этом случае не может быть реализован. Используя (11) и значение $P_m \approx 165$ кПа, получим для начальной температуры аэровзвеси антрацита, сохраняющего принадлежность к НГП, значение $T_m \approx 373$ К (100 °C).

Таким образом, аэровзвесь антрацита, характеристики которого приведены в табл. 2, при температуре 140 °C и давлении 295 кПа способна распространять пламя при концентрации аэровзвеси (675 ± 75) г/м³, т. е. является взрывоопасной. Переход от невзрывоопасной аэровзвеси данного антрацита к взрывоопасной осуществляется при некоторой температуре T_m из диапазона от 373 до 413 К (от 100 до 140 °C) и давлении P_m , связанном с этой температурой соотношением (11). Для уточнения температуры такого перехода требуются сведения об испытаниях аэровзвеси данного антрацита в 20-л камере USBM при промежуточных значениях E_{ig} (между 2,5 и 5,0 кДж), которыми автор не располагает.

В заключение отметим, что предложенный выше прогноз появления взрывоопасности антрацита выполнен для случая одновременного повышения начальной температуры аэровзвеси и начального давления воздуха. В то же время наибольшую практическую ценность, очевидно, имеют отдельные сведения о влиянии начальных значений параметров состояния на взрывоопасность НГП. Не рассматривая возможность получения такой информации из опытов с различными, искусственно созданными начальными условиями исследования НГП, оценим относительное влияние температуры и давления на изменение взрывоопасности пыли антрацита.

“Проблемная” пыль антрацита при нормальных условиях относится к НГП, т. е. имеет $LOC(T_0, P_0)$, незначительно превышающий 0,21. Рост начальной температуры аэровзвеси антрацита и начального давления на величину ΔT_2 (К) и ΔP_2 (Па) соответственно приводит к уменьшению LOC, которое делает

аэровзвесь антрацита взрывоопасной. В линейном приближении можно записать

$$\text{LOC}(T_0 + \Delta T_2, P_0 + \Delta P_2) = \text{LOC}(T_0, P_0) + \left. \frac{\partial(\text{LOC})}{\partial T} \right|_{P_0} \Delta T_2 + \left. \frac{\partial(\text{LOC})}{\partial P} \right|_{T_0} \Delta P_2 \leq 0,21. \quad (13)$$

Влияние температуры аэровзвеси и давления на переход от невзрывоопасной аэровзвеси к взрывоопасной описывается соответственно вторым и третьим слагаемыми правой части равенства (13). Оценим величину этих слагаемых. Согласно эмпирическим данным [1] при $T_0 < 500$ К

$$\left. \frac{\partial(\text{LOC})}{\partial T} \right|_{P_0} \approx \frac{\text{LOC}(T_0, P_0)}{T_b - T_0}, \quad (14)$$

где $T_b \approx 1300$ К.

Скудность сведений о зависимости LOC от давления [1] не позволяет представить эту зависимость в аналитическом виде. Согласно экспериментальным данным для нескольких пылей органического происхождения [16] с ростом давления величина LOC может как уменьшаться, так и повышаться. При этом

$$-2 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1} < \left. \frac{\partial(\text{LOC})}{\partial P} \right|_{T_0} < 2 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}. \quad (15)$$

С учетом (13)–(15) и полученных для антрацита значений $\Delta T = 115$ К и $\Delta P = 200$ кПа несложно оценить искомые слагаемые ($0,023$ и $\pm 0,004$ соответственно) и отметить, что влияние изменения начальной температуры аэровзвеси антрацита на возможность перехода от невзрывоопасной аэровзвеси к взрывоопасной намного выше влияния начального давления.

6. Обсуждение результатов

Из материалов настоящей работы следует, что тестирование аэровзвеси в 20-л камере по известным методикам [7, 14, 15] не отвечает заявленным в этих методиках нормальным начальным условиям исследования аэровзвеси. Такое тестирование в действительности проводится при повышенной начальной температуре аэровзвеси и повышенном начальном давлении в камере. Сравнение с надежными результатами исследований в камере объемом 1 м^3 показывает, что отмеченная особенность исследований в 20-л камере приводит к завышению оценки опасности для пылей с низкой реальной взрывоопасностью. При этом особую озабоченность вызывает возможность появления качественной ошибки при исследовании в 20-л камере (далее — ошибки исследования), когда невзрывоопасная пыль будет отнесена к взрывоопасным пылям. Ошибка исследования приводит к неоправданным экономическим издержкам, связанным с необходимостью исполь-

зования оборудования во взрывозащищенном исполнении или переводом производственного помещения из пожароопасной во взрывопожароопасную категорию по взрывопожарной и пожарной опасности. В соответствии с правилами “недоверия” (см. введение) признаками возможной ошибки является низкое значение K_{st} .

В разд. 3–5 настоящей работы приведены расчетно-экспериментальные методы оценки повышения начальной температуры аэровзвеси и начального давления в 20-л камере. Фактически, эти методы позволяют прогнозировать результаты исследования аэровзвеси при повышенной температуре и давлении (см. разд. 5). Однако для подтверждения взрывоопасности пыли с низким показателем K_{st} (“проблемной” пыли) требуется устранить существенные изменения начальных условий исследования аэровзвеси.

Предложенные методы на примере данных табл. 3 показывают возможность уменьшения нежелательных изменений начальных условий исследования аэровзвеси путем соответствующего изменения параметров методики. Так, в частности, незначительным уменьшением глубины начального вакуумирования камеры ($P_0 - P_{C,0}$) и снижением объема ресивера V_R можно в соответствии с (7) и (10) сделать скачок температуры аэровзвеси к моменту зажигания несущественным: $\Delta T_2 < 10$ °С. В то же время для уменьшения скачка температуры аэровзвеси и давления в камере при локальном выгорании пыли в окрестности ИЗ требуется внести серьезные изменения в методику исследования.

Ниже обсуждаются два способа реализации квазинормальных условий исследования, близких к нормальным. По мнению автора, использование этих способов должно существенно снизить риск ошибки исследования.

Второй способ реализации квазинормальных условий исследования аэровзвеси “проблемной” пыли не затрагивает конструкцию установки, но требует проведения опытов по модифицированной методике, учитывающей то обстоятельство, что для “проблемной” пыли LOC мало отличается от 0,21. Из-за отсутствия теории турбулентного горения [17] для обоснования правомерности использования данного способа обратимся к двум эмпирическим закономерностям турбулентного горения аэровзвесей и разумным предположениям.

Первая из таких закономерностей заключается в том, что для пыли, LOC которой заметно меньше 0,21, в диапазоне $\text{LOC} \leq C_{O_2} \leq 0,21$ справедлива линейная зависимость [1]:

$$K_{st}(C_{O_2}) = \alpha(C_{O_2} - \text{LOC}), \quad (16)$$

где α — размерный коэффициент пропорциональности.

Для указанных видов пылей можно записать $\alpha = K_{st}(0,21)/(0,21 - LOC)$. Значительная крутизна зависимости (16) позволяет весьма точно прогнозировать LOC линейной интерполяцией экспериментальных данных K_{st} , полученных для нескольких (двух или более) значений C_{O_2} , расположенных на значительном удалении от LOC.

Поскольку $C_{O_2} = 0,21$ не является особенностью $K_{st}(C_{O_2})$, естественно предполагать, что зависимость (16) справедлива и для интересующего нас случая $LOC \approx 0,21$ при $C_{O_2} \geq 0,21$. Правомерность такого предположения подтверждается низким значением K_{st} при $C_{O_2} \approx 0,21$, которое для “проблемной” пыли следует из правил “недоверия” (см. введение). Таким образом, LOC для “проблемной” пыли определяют линейной интерполяцией (к значению $K_{st} = 0$) экспериментальных данных K_{st} , полученных для нескольких (двух или более) значений $C_{O_2} > 0,21$. После этого устанавливают принадлежность пыли к ВГП (если $LOC \leq 0,21$) или к НГП (если $LOC > 0,21$).

Алгоритм действий по модифицированной методике предполагает использование ИЗ с малым запасом энергии ($E_{ig} \leq 1$ кДж), который не приводит к заметному повышению начальной температуры взрывеси и начального давления в камере. Возможность использования такого ИЗ обусловлена второй эмпирической закономерностью, согласно которой с ростом C_{O_2} происходит резкое снижение E_{min} [1].

Второй способ связан с исследованием LEL “проблемной” пыли после формального изменения конструкции камеры (рис. 4), процедуры распыления и выбора надежного ИЗ без нарушений последовательности и содержания этапов исследования. Перечисленные изменения логически вытекают из материалов данной работы и состоят в следующем.

На нижнюю половину исходной камеры (см. рис. 1) устанавливают прозрачный (стеклянный) цилиндр объемом около 30 л, верхний торец которого закрывают гибкой полимерной пленкой одноразового использования. В первоначальном состоянии пленка прогибается внутрь цилиндра. Процедура распыления отличается от стандартной процедуры (см. разд. 3) отсутствием вакуумирования объема камеры. Воздух, поступающий в камеру из ресивера, приводит к увеличению ее объема путем вытеснения гибкого торца и практически не меняет атмосферное давление в камере. Несложно показать, что изменение температуры среды в камере увеличенного (до ~40 л) объема не превысит характерного масштаба изменений комнатной температуры (порядка 10 К (°C)).

Размер пленки подбирается таким, чтобы изменение внутреннего объема камеры, происходящее при выбросе воздуха из ресивера и срабатывании ИЗ (с энергией 5 или 10 кДж) при отсутствии пыли,



Рис. 4. Схема камеры с “гибким” торцом в начальном положении и при максимальном объеме (жирный пунктир)

Fig. 4. Scheme of the chamber with a “flexible” cap in the initial position and at the maximum capacity (fatty dotted line)

было в 2–3 раза меньше максимального изменения этого объема (см. рис. 4). Таким образом, срабатывание ИЗ и локальное выгорание пыли в окрестности пламени ИЗ не приведут к изменению начального давления в камере и согласно (11) не вызовут изменения начальной температуры свежей взрывеси. В целях безопасной эксплуатации установки “гибкий” торец служит сбросным клапаном модифицированной камеры, т. е. имеет слабое крепление с цилиндром.

Критерием взрыва взрывеси является распространение пламени, наблюдаемое через прозрачную оболочку камеры, и вскрытие верхнего торца камеры. Отметим, что в предлагаемом способе регистрации взрыва использовано первое определение термина ВГП (см. введение).

Считаем необходимым отметить, что практическому использованию изложенных способов реализации квазинормальных условий исследования взрывеси “проблемной” пыли должна предшествовать их апробация.

Заключение

Выполнен количественный анализ причин того, что экспериментальное исследование взрывеси пыли с низкой взрывоопасностью по современным методикам в камере объемом 20 л приводит к завышенным показателям взрыва. Показано, что тестирование взрывеси в 20-л камере не отвечает заявленным в методиках нормальным начальным условиям исследования (давлению 100 кПа, температуре 25 °C) и фактически является исследованием взрывоопасности взрывеси при повышенных начальных температуре среды и давлении в камере. К росту на

чальной температуры аэровзвеси приводят два процесса: распыление дисперсного материала в камере импульсом сжатого воздуха из ресивера; адиабатическое сжатие аэровзвеси при срабатывании источника зажигания и локальном выгорании пыли, оказавшейся в пламени и/или вблизи пламени источника зажигания. Последний процесс вызывает рост начального давления в камере.

Разработан надежный критерий взрыва пыли, поскольку единое представление о таком критерии, судя по нормам США и Европейских стран, до сих пор отсутствует. Новый критерий основан на двух предположениях: на ограничении разнообразия развития зажигания аэровзвеси двумя сценариями — локальным выгоранием пыли в некоторой окрестности источника зажигания и взрывом пыли, охватывающим весь объем камеры, и на существенном отличии скачков давления в камере, ожидаемых для разных сценариев.

Продемонстрированы два направления применения результатов настоящей работы.

Во-первых, возможен прогноз условий, при которых возникает взрывоопасность аэровзвеси пыли, невзрывоопасной при нормальных условиях. Такой прогноз делается в случае регистрации взрыва данной пыли в 20-л камере и при оценке реальных начальных условий исследования. В частности, для аэровзвеси антрацита, исследованной в 20-л камере US Bureau of Mines, предсказана взрывоопасность при температуре 140 °C.

Во-вторых, можно наметить способы реализации условий экспериментального исследования пыли с низкой взрывоопасностью, близких к нормальным. Они позволят существенно повысить надежность вывода о низкой взрывоопасности горючей пыли без использования крупномасштабного оборудования. В работе предложено два таких способа.

Первый способ основан на предположении о том, что для пыли с низкой взрывоопасностью минимальное взрывоопасное содержание кислорода в воздухе $LOC \approx 0,21$, и на известной эмпирической линейной зависимости индекса взрывоопасности K_{st} от содержания кислорода в воздухе. В рамках этого способа проводят поиск LOC, исследуя параметр K_{st} для взвесей пыли в воздухе, обогащенном кислородом. О взрывоопасности пыли судят по соотношению между полученным экстраполяцией значением LOC и обычным содержанием кислорода в воздухе (0,21).

Второй способ предполагает измененную конструкцию камеры, отличающуюся от стандартной 20-л камеры тем, что ее верхняя половина заменяется стеклянным цилиндром с переменным объемом. Последнее достигается использованием у цилиндра “гибкого” верхнего торца из полимерной пленки,

первоначально вогнутой внутрь камеры, но принимающей выпуклую форму после распыления и срабатывания источника зажигания.

Перечень использованных сокращений, обозначений и индексов

ВГП — взрывоопасная горючая пыль;
 НГП — невзрывоопасная горючая пыль;
 ИЗ — пиротехнический источник зажигания;
 LOC — минимальное взрывоопасное содержание кислорода в воздухе;
 LEL — нижний концентрационный предел распространения пламени;
 RIA — область влияния источника зажигания;
 USBM — US Bureau of Mines;
 C_D, C_{OX} — концентрация пыли в аэровзвеси и кислорода в воздухе соответственно;
 c_D, c_V — средняя теплоемкость пыли и воздуха;
 E_{ig} — энергия источника зажигания;
 K_{st} — индекс взрывоопасности пыли;
 m, M — масса; без индекса “D” относится к воздуху;
 P — давление; без индекса “R” относится к камере;
 $P_m, (dP/dt)_m$ — максимальное значение $P(t)$ и (dP/dt) в опыте;
 $P'_m — (dP/dt)_m V_C^{1/3}$;
 ΔP — изменение давления в камере;
 ΔP_{ig} — изменение давления при срабатывании ИЗ в отсутствие пыли;
 Q — энергия, переданная теплопередачей;
 R — универсальная газовая постоянная;
 t — время;
 t_d — задержка зажигания;
 t_p — характерное время релаксации давления в камере;
 T — температура; без индекса “R” относится к объектам в камере;
 ΔT — изменение температуры аэровзвеси в камере;
 V — объем;
 $V_{0,R}$ — начальный объем воздуха, не покидающего ресивер;
 Θ — отношение теплосодержаний фаз аэровзвеси;
 γ — показатель адиабаты для воздуха.

Индексы

Указывают на принадлежность:

0, 1, 2 — моменту: начальному, завершения распыления и срабатывания ИЗ;
 C, D, R — камере, пыли и ресиверу;
 $\max, \min$ — максимальному, минимальному значениям.

Благодарность

Автор выражает искреннюю благодарность Девликанову М. О. за помощь в получении экспериментальных данных в камерах ВНИИПО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Eckhoff R. K.* Dust explosions in the process industries. 3rd edition. — Boston : Elsevier Science, Gulf Professional Publishing, 2003. — 720 p.
2. Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben / Scholl E. W., Reeh D., Wiemann W. u. a. // SFT-Report. — 1979. — No. 2.2. — 100 p. (in German).
3. ISO/IEC 80079-20-2:2016. Explosive atmospheres — Part 20-2: Material characteristics — Combustible dusts test methods. 1st edition. — Geneva, Switzerland : ISO/IEC, 2016. — 100 p.
4. NFPA 654. Standard for the prevention of fire and dust explosions from the manufacturing, processing, and handling of combustible particulate solids. 2013 Edition. — Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association, 2012. — 56 p.
5. *Bartknecht W.* Explosionen, ablauf und schutzmaßnahmen. — Berlin, Springer-Verlag, 1980 — 259 p. (in German).
6. ISO 6184-1:1985. Explosion protection systems — Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air. — Geneva : International Organization of Standardization, 1985. — 5 p.
7. *Cesana C., Siwek R.* Operating instructions 20-l-apparatus. Ver. 7.0. — Birsfelden : Kühner AG, 2009.
8. *Proust Ch., Accorsi A., Dupont L.* Measuring the violence of dust explosions with the “20l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”: Systematic comparison and analysis of the discrepancies // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — Vol. 20, Issue 4-6. — P. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032.
9. *Hertzberg M., Cashdollar K. L., Zlochower I. A.* Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences // Symposium (International) on Combustion. — 1988. — Vol. 21, Issue 1. — P. 303–313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3.
10. *Cashdollar K. L., Chatrathi K.* Minimum explosible dust concentrations measured in 20-l and 1-m³ chambers // Combustion Science and Technology. — 1993. — Vol. 87, Issue 1-6. — P. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213.
11. NFPA 68. Standard on explosion protection by deflagration venting. 2013 Edition. — Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association, 2013.
12. *Cloney C. T., Ripley R. C., Amyotte P. R., Khan F. I.* Quantifying the effect of strong ignition sources on particle preconditioning and distribution in the 20-L chamber // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2013. — Vol. 26, Issue 6. — P. 1574–1582. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.08.010.
13. ASTM E1515–14. Standard test method for minimum explosible concentration of combustible dusts. — West Conshohocken, PA : ASTM International, 2014. — 9 p. DOI: 10.1520/E1515-14.
14. BS EN 14034-3:2006+A1:2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds — Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds. — European Committee for Standardisation (CEN), 2011. — 30 p.
15. ASTM E1226-12a. Standard test method for explosibility of dust clouds. — West Conshohocken, PA : ASTM International, 2012. — 13 p. DOI: 10.1520/E1226-12A.
16. *Siwek R.* Determination of technical safety indices and factors influencing hazard evaluation of dusts // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 1996. — Vol. 9, No. 1. — P. 21–31. DOI: 10.1016/0950-4230(95)00057-7.
17. *Lipatnikov A.* Fundamentals of premixed turbulent combustion. — Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. — 548 p. DOI: 10.1201/b12973.

Материал поступил в редакцию 19 мая 2017 г.

Для цитирования: *Поletaев Н. Л.* О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли в 20-литровой камере // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 6. — С. 5–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20.

English

ON THE PROBLEM OF EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF LOW EXPLOSIBILITY FOR DUST/AIR MIXTURE IN THE 20-L CHAMBER

POLETAEV N. L., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher,
All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia
(VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation;
e-mail address: nlpvniipo@mail.ru)

ABSTRACT

It is known (Eckhoff, 2003) that an experimental study of aero-suspension of dust with low explosivity in a 20-liter chamber leads to overestimation of the explosion. A special concern is the risk of a qualitative error, when non-explosive dust will be transferred to explosive dusts, which will cause unjustified costs for ensuring the safety of industries involving this dust. This work is aimed at reducing this risk.

In this work, a quantitative analysis of the causes of overstatement of dust explosiveness is performed. It is shown that the testing of dust/air mixture in a 20-liter chamber does not correspond to the normal initial conditions of the investigation (pressure 100 kPa, temperature 25 °C) stated in the methodologies and, in fact, is an explosion hazard study of dust/air mixture with an increased initial temperature and an increased initial pressure in the chamber. Two processes lead to an increase in the initial temperature: the dispersion of particulate material in the chamber by a pulse of compressed air from the receiver; adiabatic compression of dust/air mixture upon activation of the ignition source and local burning out of the dust found in the flame and/or near the flame of the ignition source. The latter process leads to an increase in the initial pressure in the chamber.

The implementation of this analysis required the development of a reliable criterion for the explosion of dust, since there is still no single idea of such a criterion, judging by the norms of the United States and European countries. The new criterion is based on two assumptions: (1) on limiting the variety of the development of dust ignition in two scenarios (Cashdollar and Chatrathi, 1993) — local burning out of dust in some neighborhood of the ignition source and dust explosion, covering the entire volume of the chamber and (2) on the essential difference between pressure jumps in the chamber, expected for different scenarios.

Two variants of application of the results of this work are demonstrated.

First, it is possible to forecast the conditions under which an explosive danger arises in the dust, which is not explosive under normal conditions. Such a forecast is made in case of recording the explosion of this dust in a 20-liter chamber and assessing the real initial conditions of the study. In particular, an explosion of anthracite, investigated in a 20-liter US Bureau of Mines, is predicted to be explosive at a temperature of 140 °C.

Secondly, it is possible to outline ways of realizing the conditions for experimental investigation of dust with a low explosivity, close to normal. They will significantly improve the reliability of the conclusion about the low explosiveness of combustible dust without the use of large-scale equipment. Two such methods are proposed in the work.

The first method is based on the reasonable assumption that for a dust with a low explosion hazard low oxygen concentration $LOC \approx 0.21$, and the known empirical linear dependence of the explosion index K_{st} on the oxygen content in air. Within the framework of this method, a search is made for the LOC, by examining K_{st} for dust suspensions in air enriched with oxygen. The explosion hazard of dust is judged by the ratio between the extrapolation obtained by the LOC and the usual oxygen content in the air (0.21).

The second method involves a modified design of a 20-l camera, which differs from the standard design of a 20-liter chamber in a vertically extended shape and variable volume. The latter is achieved by using a “flexible” top end of a polymer film, initially concave into the chamber, but assuming a convex shape after dust dispersion and triggering the ignition source.

Keywords: dust explosion; 20-l chamber; explosion criterion; low explosivity; high LOC; anthracite.

REFERENCES

1. Eckhoff R. K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd edition. Boston : Elsevier Science, Gulf Professional Publishing, 2003. 720 p.
2. Scholl E. W., Reeh D., Wiemann W. u. a. Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben. *SFT-Report*, 1979, no. 2.2. 100 s. (in German).
3. ISO/IEC 80079-20-2:2016. *Explosive atmospheres — Part 20-2: Material characteristics — Combustible dusts test methods*. 1st edition. Geneva, Switzerland, ISO/IEC, 2016. 100 p.

4. NFPA 654. *Standard for the prevention of fire and dust explosions from the manufacturing, processing, and handling of combustible particulate solids*. 2013 Edition. Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2012. 56 p.
5. Bartknecht W. *Explosionen, ablauf und schutzmaßnahmen*. Berlin, Springer-Verlag, 1980. 259 p. (in German).
6. ISO 6184-1:1985. *Explosion protection systems — Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air*. Geneva, International Organization of Standardization, 1985. 5 p.
7. Cesana C., Siwek R. *Operating instructions 20-l-apparatus*. Ver. 7.0. Birsfelden, Kühner AG, 2009.
8. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”: Systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 20, issue 4-6, pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032.
9. Hertzberg M., Cashdollar K. L., Zlochower I. A. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences. *Symposium (International) on Combustion*, 1988, vol. 21, issue 1, pp. 303–313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3.
10. Cashdollar K. L., Chatrathi K. Minimum explosible dust concentrations measured in 20-l and 1-m³ chambers. *Combustion Science and Technology*, 1993, vol. 87, issue 1-6, pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213.
11. NFPA 68. *Standard on explosion protection by deflagration venting*. 2013 Edition. Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2013.
12. Cloney C. T., Ripley R. C., Amyotte P. R., Khan F. I. Quantifying the effect of strong ignition sources on particle preconditioning and distribution in the 20-L chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, vol. 26, issue 6, pp. 1574–1582. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.08.010.
13. ASTM E1515–14. *Standard test method for minimum explosible concentration of combustible dusts*. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2014. 9 p. DOI: 10.1520/E1515-14.
14. BS EN 14034-3:2006+A1:2011. *Determination of explosion characteristics of dust clouds — Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds*. European Committee for Standardisation (CEN), 2011. 30 p.
15. ASTM E1226-12a. *Standard test method for explosibility of dust clouds*. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2012. 13 p. DOI: 10.1520/E1226-12A.
16. Siwek R. Determination of technical safety indices and factors influencing hazard evaluation of dusts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1996, vol. 9, no. 1, pp. 21–31. DOI: 10.1016/0950-4230(95)00057-7.
17. Lipatnikov A. *Fundamentals of premixed turbulent combustion*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. 548 p. DOI: 10.1201/b12973.

For citation: Poletaev N. L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 5–20 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20.

Д. С. КОРОЛЕВ, преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231; e-mail: otrid@rambler.ru)

А. В. КАЛАЧ, д-р хим. наук, профессор, заместитель начальника по научной работе, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231)

О. В. ЩЕРБАКОВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

УДК 614.84

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ДЕСКРИПТОРОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КЛАССА ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Показано, что одной из важнейших характеристик взрывозащищенного оборудования является его температурный класс. Установлено, что на определение температурного класса влияет температура самовоспламенения. Ввиду сложности экспериментального нахождения этого показателя пожаровзрывобезопасности предложено использовать методику прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки на основе молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей. Верификацию предлагаемой методики проводили на примере прогнозирования температуры самовоспламенения кислородсодержащих предельных углеводородов, в частности сложных эфиров пропионовой кислоты. Установлено, что среднее значение абсолютной погрешности при прогнозировании составило 6,25 °С, а относительной погрешности — 2 %. Сделан вывод, что методика прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки позволяет определять основные показатели пожаровзрывоопасности свойств веществ с приемлемой точностью, что дает возможность установить температурный класс взрывозащищенного электрооборудования.

Ключевые слова: прогнозирование; молекулярные дескрипторы; искусственные нейронные сети; эфиры; оборудование.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.21-30

Введение

В то время как совершенствуются технологии, все больше легковоспламеняющихся материалов используется в нефтеперерабатывающих отраслях промышленности. В связи с этим для безопасного обращения с опасными веществами необходимо применять соответствующее взрывобезопасное электрическое оборудование [1].

Допустимая максимальная температура поверхности этого оборудования является одной из важнейших характеристик, определяющих степень их защиты. Немаловажную роль при этом играет также температура самовоспламенения используемых в производстве веществ и материалов. Например, в одном из основных нормативных документов [2] представлена классификация взрывозащищенного электрооборудования, основанная на температуре

самовоспламенения вещества. В [2] указывается минимальная температура, при которой вещество может воспламениться в воздухе при атмосферном давлении без воздействия внешнего источника зажигания, такого как искра или пламя. Следовательно, спонтанное возгорание веществ будет оказывать негативное влияние на людей, которые их транспортируют, хранят и используют.

Основной задачей настоящего исследования была разработка методики, позволяющей прогнозировать пожароопасные свойства продуктов нефтепереработки в режиме реального времени без проведения сложных технических операций [3].

Методология

Одним из перспективных направлений является методика прогнозирования пожароопасных свойств

продуктов нефтепереработки, основанная на использовании молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей, которая успешно была применена нами ранее [4–7].

Предлагаемая методика лишена таких проблем, как большие временные и ресурсные затраты, сложности при расчетах, и позволяет в режиме реального времени без прерывания процесса прогнозировать пожароопасные свойства продуктов нефтепереработки.

Данная методика широко применяется для прогнозирования таких показателей пожаровзрывоопасности продуктов нефтепереработки, как: низшая теплота сгорания, массовая скорость выгорания, удельная скорость пламени, используемые в расчетах пожарного риска; максимальное давление взрыва, применяемое в расчетах по определению категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности, и др.

Ниже описана процедура реализации предлагаемой методики.

1. *Загрузка базы данных.* База данных представляет собой молекулярные дескрипторы, описывающие строение молекулы вещества.

2. *Определение параметров сети.* На данном этапе устанавливают количество слоев, их размеры, а также номера для текущих слоев $i = 0$.

3. *Построение сети для слоев $i, i + 1$.* Множество сигналов, поступающих на вход искусственного нейрона, одновременно являются и выходом нейрона, и входным сигналом искусственной нейронной сети. Величина входящего сигнала умножается на поправочный коэффициент, так называемый вес, который аналогичен синаптической силе биологического нейрона. Затем с помощью коэффициентов определяется параметр, влияющий на состояние

нейрона. Все произведения суммируются, и по полученной сумме устанавливается уровень активации нейрона s .

Состояние нейрона определяется по формуле

$$S = \sum_{i=1}^n \varphi_i w_i, \quad (1)$$

где φ_i — множество сигналов, поступающих на вход;
 w_i — весовые коэффициенты нейрона.

4. *Обучение сети на наборе X_i .* Обучение искусственной нейронной сети проводится методом градиентного спуска, т. е. на каждой итерации изменение веса определяется по формуле

$$W(t+1) = W(t) + e + \frac{de}{dw}, \quad (2)$$

где $W(t)$ — функция состояния;
 e — коэффициент обучения.

5. *Удаление вспомогательного слоя сети.*

6. *Сохранение весов W_i связей слоев $i, i + 1$.*

7. *Генерация набора данных X_{i+1} для следующей сети* (для этого необходимо пропустить через пару слоев $i, i + 1$ набор данных X_i).

8. *Получение параметров сети.*

В целях реализации предлагаемой методики прогнозирования была разработана оригинальная объектно-ориентированная компьютерная программа “Нейропакет КДС 1.0” [8].

Работоспособность программы основывается на проектировании персептрона, который адекватно реагирует на предоставленные примеры (молекулярные дескрипторы изученных веществ). Причем при увеличении числа нейронов внутреннего слоя персептрона погрешность обучения обычно падает. На рис. 1 схематически показана работа программы.

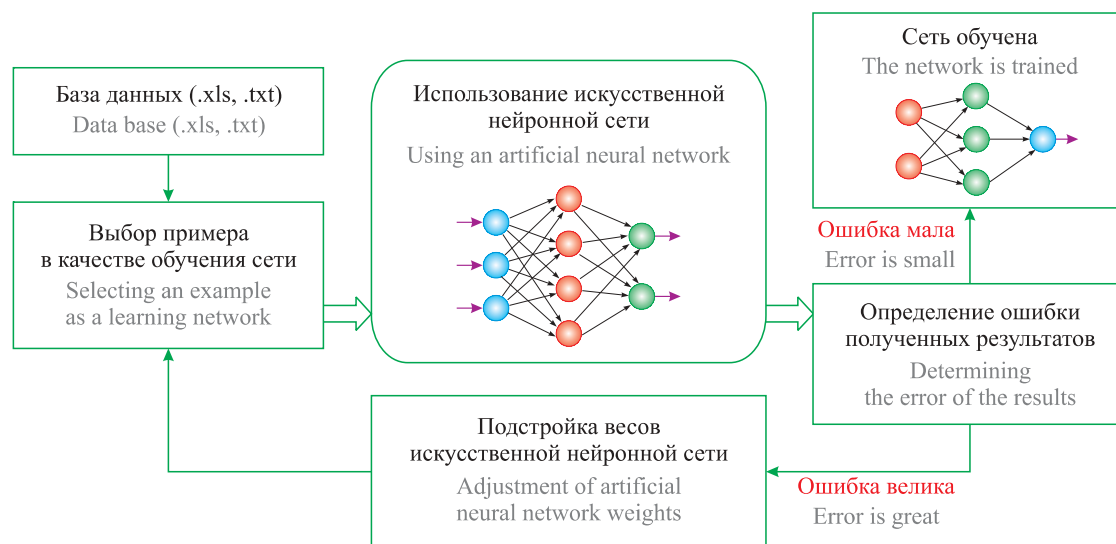


Рис. 1. Процесс работы компьютерной программы “Нейропакет КДС 1.0”

Fig. 1. The work of the computer program “NeuroPacket KDS 1.0”

Более детально работа авторской компьютерной программы “Нейропакет КДС 1.0” базируется на алгоритме, представленном на рис. 2.

В табл. 1 приведены данные, использованные в качестве исходной базы для нашего исследования. Это показатели физико-химических и пожароопасных свойств сложных эфиров пропионовой кислоты, взятые из электронных баз данных и справочной литературы [9–11] и представляющие собой молекулярный дескриптор.

Молекулярный дескриптор — это некоторая величина, которая представляет собой числовое значе-

ние и содержит закодированную информацию о физико-химических свойствах вещества [12]. На рис. 3 приведена классификация основных молекулярных дескрипторов, применяемых в прогнозировании пожароопасных свойств соединений.

Для описания строения молекул исследуемых соединений применяли дескрипторы структурной формулы — топологические индексы (индексы Винера W и Рандича χ) и геометрические дескрипторы (площадь поверхности молекулы S , гравитационные индексы G_1 (всех связей) и G_2 (всех пар)). Указанные дескрипторы были выбраны на основе

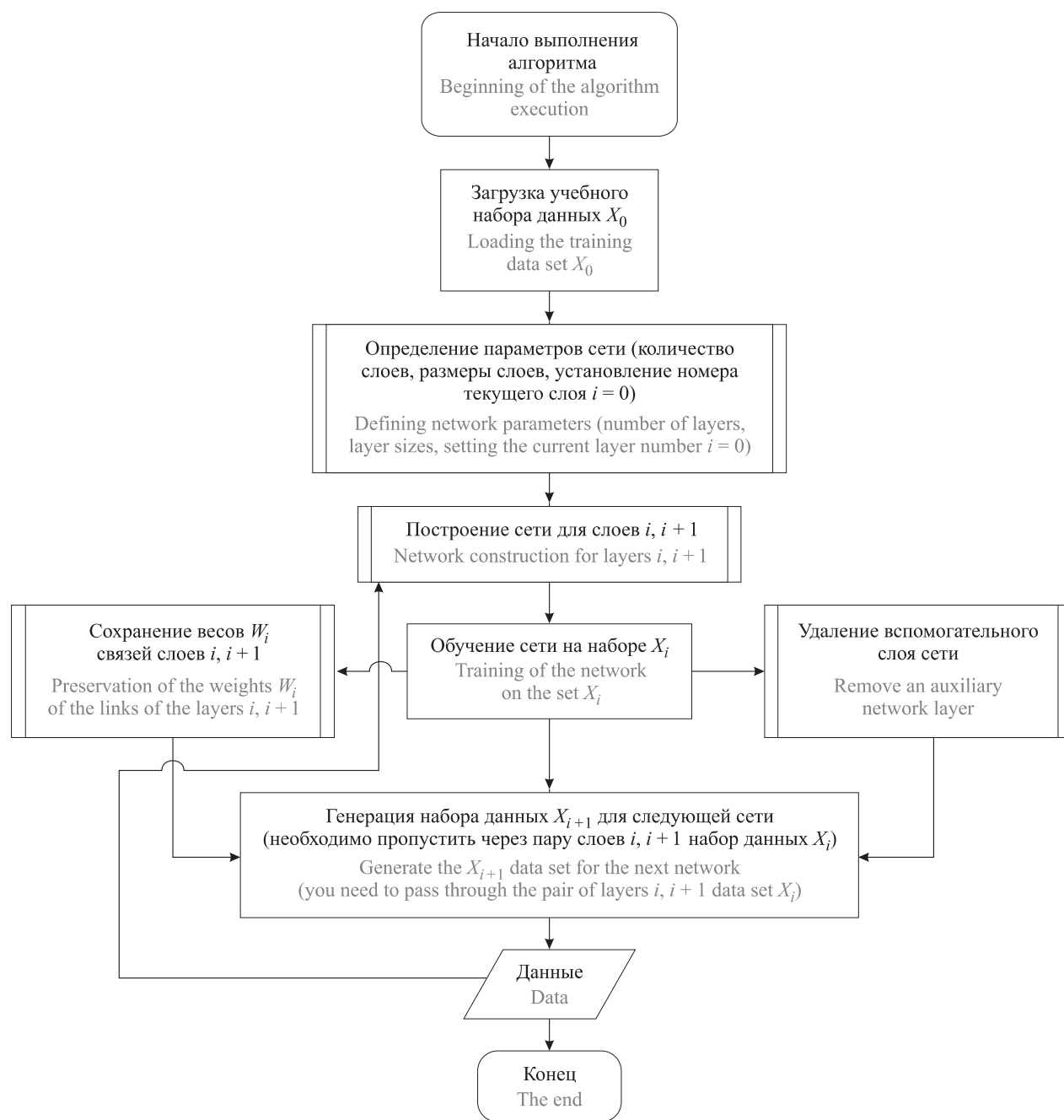


Рис. 2. Алгоритм работы компьютерной программы “Нейропакет КДС 1.0”

Fig. 2. Algorithm of the computer program “Neuropacket KDS 1.0”

Таблица 1. Справочные и расчетные физико-химические и пожароопасные свойства сложных эфиров пропионовой кислоты
Table 1. Reference and calculated physico-chemical and fire-hazardous properties of propionic acid esters

Дескрипторы структурной формулы вещества Descriptors of the structural formula of substance	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Число атомов Number of atoms	10	9	11	15	10	9	8	6
Число атомов С Number of C atoms	8	7	9	13	8	7	6	4
Относительное число атомов С Relative number of C atoms	0,8	0,7778	0,8182	0,8667	0,8	0,7778	0,75	0,6667
Число атомов О Number of O atoms	2	0	2	2	0	2	2	2
Относительное число атомов О Relative number of O atoms	0,2	0	0,1818	0,1333	0	0,2222	0,25	0,3333
Количество связей Number of bonds	9	2	10	14	2	8	7	5
Количество одиночных связей Number of single bonds	8	0,2222	9	13	0,2	7	6	4
Относительное число одиночных связей Relative number of single bonds	0,8889	8	0,9	0,9286	9	0,875	0,8571	0,8
Число двойных связей Number of double bonds	1	7	1	1	8	1	1	1
Относительное число двойных связей Relative number of double bonds	0,1111	0,875	0,1	0,0714	0,8889	0,125	0,1429	0,2
Молекулярный вес Molecular weight	128,086	1	140,09	188,14	1	116,07	104,06	80,042
Относительный молекулярный вес Relative molecular weight	12,8086	0,125	12,736	12,542	0,1111	12,897	13,008	13,340
Гравитационный индекс связей Gravitation index (all bonds)	835,311	116,07	897,55	1220,7	128,08	733,57	651,69	527,61
Гравитационный индекс пар Gravitation index (all pairs)	1428,9	12,897	1528,7	2071,5	12,808	1317,6	1176,8	876,98
Индекс Винера Wiener index	153	733,60	206	538	814,78	104	71	31
Индекс Рандича (0-го порядка) Randic index (order 0)	7,82	1269,9	8,5271	11,355	1438,7	7,276	6,5689	4,9916
Индекс Рандича (1-го порядка) Randic index (order 1)	4,8081	110	5,3081	7,3081	146	4,1639	3,6639	2,8081
Индекс Рандича (2-го порядка) Randic index (order 2)	3,3628	7,1129	3,7163	5,1305	7,9831	3,4846	3,143	1,9217
Индекс Рандича (3-го порядка) Randic index (order 3)	2,2474	4,3081	2,4974	3,4974	4,6639	1,9337	1,5707	1,3938
Индекс Киер-Хола (0-го порядка) Kier & Hall index (order 0)	4,8165	3,0092	5,3165	7,3165	3,8382	4,3165	3,8165	2,8165
Индекс Киер-Хола (1-го порядка) Kier & Hall index (order 1)	2,1124	1,9974	2,3624	3,3624	2,1753	1,8624	1,6124	1,1124
Индекс Киер-Хола (2-го порядка) Kier & Hall index (order 2)	0,9916	4,3165	1,1166	1,6166	4,8165	0,9916	0,8436	0,5145
Индекс Киер-Хола (3-го порядка) Kier & Hall index (order 3)	0,4218	1,8624	0,4843	0,7343	2,1124	0,3479	0,2968	0,1948
Индекс формы Киера (1-го порядка) Kier shape index (order 1)	9,63	0,8666	10,63	14,63	1,1166	8,63	7,63	5,63

Дескрипторы структурной формулы вещества Descriptors of the structural formula of substance	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Форма Киера (2-го порядка) Kier shape index (order 2)	6,7459	0,3593	7,7338	11,703	0,4218	4,5033	3,6098	2,846
Форма Киера (3-го порядка) Kier shape index (order 3)	6,63	8,63	7,5276	11,557	9,63	5,5019	4,63	2,63
Индекс гибкости Киера Kier flexibility index	6,4963	5,7611	7,4737	11,414	5,4176	4,3182	3,4428	2,6705
Среднее информационное содержание (0-го порядка) Average information content (order 0)	1,961	5,5019	1,8676	1,5589	6,63	2,1972	2,1556	2,2516
Информационное содержание (0-го порядка) Information content (order 0)	19,6096	5,5242	20,544	23,384	5,2172	19,774	17,245	13,509
Среднее структурное информационное содержание (0-го порядка) Average complementary information content (order 0)	0,5903	2,0588	0,5399	0,399	2,171	0,6931	0,7185	0,871
Структурное информационное содержание (0-го порядка) Complementary information content (order 0)	5,9031	18,529	5,9385	5,9853	21,709	6,2381	5,7484	5,2263
Среднее дополнительное информационное содержание (0-го порядка) Average bonding information content (order 0)	1,361	0,6495	1,5918	2,348	0,6535	0,9728	0,8444	0,3333
Дополнительное информационное содержание (0-го порядка) Bonding information content (order 0)	13,6096	5,8454	17,509	35,219	6,5352	8,7549	6,7549	2
Среднее содержание информации о соеди- нении (0-го порядка) Bonding information content (order 0)	0,6186	1,1111	0,5622	0,4095	1,151	0,7324	0,7679	0,9697
Соединение информационного содержания (0-го порядка) Bonding information content (order 0)	6,1862	10	6,1844	6,1418	11,509	6,5915	6,1428	5,8183
Среднее информационное содержание (1-го порядка) Average information content (order 1)	2,9219	0,6863	2,8454	2,4635	0,6849	2,9477	2,75	2,585
Информационное содержание (1-го порядка) Information content (order 1)	29,2193	6,1764	31,298	36,951	6,8486	26,529	22	15,509
Среднее структурное информационное содержание (1-го порядка) Average structural information content (order 1)	0,8796	2,9477	0,8225	0,6305	3,1219	0,9299	0,9167	1
Структурное информационное содержание (1-го порядка) Structural information content (order 1)	8,80	26,53	9,05	9,46	31,22	8,37	7,33	6,00
Среднее дополнительное информационное содержание (1-го порядка) Average complementary information content (order 1)	0,40	0,93	0,61	1,44	0,94	0,22	0,25	0,00
Дополнительное информационное содержание (1-го порядка) Complementary information content (order 1)	4,00	8,37	6,75	21,65	9,40	2,00	2,00	0,00
Среднее содержание информации о соеди- нении (1-го порядка) Average bonding information content (order 1)	0,92	0,22	0,86	0,65	0,20	0,98	0,98	1,11

Дескрипторы структурной формулы вещества Descriptors of the structural formula of substance	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Соединение информационного содержания (1-го порядка) Bonding information content (order 1)	9,22	2,00	9,42	9,71	2,00	8,84	7,84	6,68
Среднее информационное содержание (2-го порядка) Average information content (order 2)	3,32	0,98	3,46	3,13	0,98	2,95	2,75	2,59
Информационное содержание (2-го порядка) Information content (order 2)	33,22	8,84	38,05	46,99	9,85	26,53	22,00	15,51
Среднее структурное информационное содержание (2-го порядка) Average structural information content (order 2)	1,00	3,17	1,00	0,80	3,12	0,93	0,92	1,00
Структурное информационное содержание (2-го порядка) Structural information content (order 2)	10,00	28,53	11,00	12,03	31,22	8,37	7,33	6,00
Момент инерции А Moment of inertia A	0,59	9,51	0,41	0,36	9,85	0,30	0,33	0,72
Момент инерции В Moment of inertia B	0,02	2,97	0,01	0,00	3,12	0,03	0,05	0,10
Момент инерции С Moment of inertia C	0,02	0,63	0,01	0,00	0,29	0,03	0,04	0,09

П р и м е ч а н и е. I — амилпропионат; II — бутилпропионат; III — гексилпропионат; IV — децилпропионат; V — изоамилпропионат; VI — третбутилпропионат; VII — пропилпропионат; VIII — метилпропионат.

N o t e . I — amyl propionate; II — butyl propionate; III — hexyl propionate; IV — decyl propionate; V — isoamyl propionate; VI — tert-butyl propionate; VII — propyl propionate; VIII — methyl propionate.



Рис. 3. Классификация основных молекулярных дескрипторов

Fig. 3. Classification of basic molecular descriptors

Таблица 2. Результаты прогнозирования температуры самовоспламенения**Table 2.** Results of predicting the autoignition temperature

Исследуемое вещество The test substance	Температура самовоспламенения, °С Autoignition temperature		Δ , °С	Относительная погрешность, % Relative error, %	Температурный класс [1] Temperature class [1]
	[5, 6]	прогнозируемая projected			
Амилпропионат / Amyl propionate	300	305	5	1,6	T1, T2
Бутилпропионат / Butyl propionate	385	391	6	1,5	T1, T2
Гексилпропионат / Hexyl propionate	260	270	10	3,8	T1–T3
Децилпропионат / Decyl propionate	–	300	–	–	T3
Изоамилпропионат / Isoamyl propionate	395	387	8	2	T1, T2
Изобутилпропионат / Isobutyl propionate	435	435	–	–	T1, T2
Изопропилпропионат / Isopropyl propionate	425	417	8	1,8	T1, T2
Метилпропионат / Methyl propionate	455	438	17	3,7	T1, T2
Октилпропионат / Octyl propionate	230	247	17	7,3	T1–T3
Пропилпропионат / Propyl propionate	–	248	–	–	T1–T3
Третбутилпропионат / Tert-butyl propionate	–	257	–	–	T1–T3
Этилпропионат / Ethyl propionate	440	444	4	0,9	T1

сопоставления закономерностей изменения температуры вспышки в зависимости от строения молекул вещества [13].

Выбор данных веществ для анализа обусловлен широким спектром применения их во всех отраслях промышленности, а также их высокой пожарной опасностью.

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, с увеличением длины углеводородного радикала соединения наблюдается возрастание гравитационных индексов, индексов Винера и Рандича.

Результаты и их обсуждение

В ходе процесса прогнозирования пожароопасных свойств сложных эфиров пропионовой кислоты определяли их температуру самовоспламенения. В табл. 2 представлены полученные результаты и возможный температурный класс взрывозащищенного электрооборудования.

Из данных табл. 2 видно, что с уменьшением числа атомов углерода в структурной формуле исследуемого вещества температура самовоспламенения возрастает.

Кроме того, анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что средняя абсолютная погрешность прогноза составляет 6,25 °С, а относительная погрешность не превышает 2 %, что является хорошим показателем.

Выводы

Таким образом, в результате исследования показана работоспособность методики, позволяющей прогнозировать пожароопасные свойства продуктов нефтепереработки на основе молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей, сведения о которых отсутствуют в справочной и нормативной литературе. По сравнению с другими существующими общеизвестными моделями прогнозирования свойств веществ данная методика состоит из большого набора данных и позволяет предсказывать с приемлемой точностью значения параметров, которые выдерживают сравнение с экспериментальными данными.

На основании полученных значений температуры самовоспламенения определяли минимальный температурный класс взрывозащищенного электрооборудования, обеспечивающий его надежную работу в определенной зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ngoc Lan Mai, Yoon-Mo Koo. Quantitative prediction of lipase reaction in ionic liquids by QSAR using COSMO-RS molecular descriptors // *Biochemical Engineering Journal*. — 2014. — Vol. 87. — P. 33–40. DOI: 10.1016/j.bej.2014.03.010.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). — 6-е изд. — СПб.: Изд-во ДЕАН, 2003. — 928 с.
3. Varnek A., Fourches D., Hoonakker F., Solov'ev V. P. Substructural fragments: an universal language to encode reactions, molecular and supramolecular structures // *Journal of Computer-Aided Molecular Design*. — 2005. — Vol. 19, No. 9-10. — P. 693–703. DOI: 10.1007/s10822-005-9008-0.

4. Королев Д. С., Калач А. В., Каргашилов Д. В. Прогнозирование температуры вспышки с помощью нейропакета КДС 1.0 на примере сложных эфиров масляной кислоты // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 21–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.21-26.
5. Королев Д. С., Калач А. В., Сорокина Ю. Н. Сравнительный анализ способов прогнозирования физико-химических свойств веществ // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. — 2016. — № 1(23). — С. 78–84.
6. Королев Д. С., Калач А. В. Категорирование помещений на основе дескрипторов и метода нейронных сетей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 5. — С. 210–213.
7. Калач А. В., Карташова Т. В., Сорокина Ю. Н., Облиенко М. В. Прогнозирование пожароопасных свойств органических соединений с применением дескрипторов // Пожарная безопасность. — 2013. — № 1. — С. 70–73.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614070. Нейропакет КДС 1.0 / Королев Д. С., Калач А. В., Каргашилов Д. В., Жучков А. В.; правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский институт ГПС МЧС России. — № 2016611455; заявл. 24.02.2016; опубл. 20.05.2016.
9. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник. — В 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. I. — 713 с.
10. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник. — В 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. II. — 774 с.
11. Алексеев С. Г., Смирнов В. В., Алексеев К. С., Барбин Н. М. Температура вспышки. Часть III. Методы расчета через температуру кипения // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 3. — С. 30–43.
12. Baskin I., Varnek A. Building a chemical space based on fragment descriptors // Combinatorial Chemistry and High Throughput Screening. — 2008. — Vol. 11, No. 8. — P. 661–668. DOI: 10.2174/138620708785739907.
13. Алексеев С. Г., Алексеев К. С., Смирнов В. В., Барбин Н. М. Температура вспышки. Часть IV. Дескрипторный метод расчета // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 5. — С. 18–37.

Материал поступил в редакцию 2 мая 2017 г.

Для цитирования: Королев Д. С., Калач А. В., Щербаков О. В. Применение методики прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки на основе молекулярных дескрипторов для обоснования температурного класса взрывозащищенного электрооборудования // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 6. — С. 21–30. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.21-30.

English

APPLICATION OF METHODS OF FORECASTING FIRE HAZARD PROPERTIES OF REFINED PETROLEUM PRODUCTS ON THE BASIS OF MOLECULAR DESCRIPTORS FOR THE JUSTIFICATION OF TEMPERATURE CLASS OF EXPLOSION-PROOF ELECTRICAL EQUIPMENT

KOROLEV D. S., Lecturer of Fire Safety Technological Processes
Department, Voronezh Institute of State Firefighting Service
of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya St., 231, Voronezh, 394052,
Russian Federation; e-mail: otrid@rambler.ru)

KALACH A. V., Doctor of Chemical Sciences, Professor, Deputy Head
of Institute for Research, Voronezh Institute of State Firefighting Service
of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya St., 231, Voronezh, 394052,
Russian Federation)

SHCHERBAKOV O. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor
of Department of Applied Mathematics and Information Technologies,
Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia
(Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

ABSTRACT

The article raises the topical issue — the lack of physical and chemical properties of new synthesized substances. These properties will allow supervisors to develop fire safety systems at security facilities. The efficiency of such systems is achieved by eliminating the combustible environment or the ignition source.

Using the example of esters of butyric acid, which are used practically in all areas of industry and produced according to reference data in the amount of more than several tens of millions of tons per year, it was possible to predict one of the most important fire hazard properties of a substance — the self-ignition temperature, using the technique for predicting the fire hazard properties of refined products based on molecular descriptors and artificial neural networks. The proposed methodology is implemented with the help of the author's computer program "NeuroPacket KDS 1.0".

The program "NeuroPacket KDS 1.0" allows you to: download and view databases containing chemical compound structures and their properties; to correlate the input data; statistically evaluate the resulting models; use the obtained neuronet models to predict the properties of substances without conducting a complex experiment.

This approach to predicting the fire hazard property of oil refining products describes the structure of the molecule with the help of molecular descriptors and establishes quantitative correlations between the values found using artificial neural networks.

Based on some reference data, data was verified. Analysis of the results obtained showed that the average relative error does not exceed 3 %, which is a good indicator.

In addition, the autoignition temperature of esters of butyric acid was predicted, information on which is absent in the reference and regulatory literature. This makes it possible to build on the values obtained in the development of fire safety systems.

Based on the obtained results on the self-ignition temperature of the substance, there were determined the temperature classes of the explosion-proof electrical equipment, which, on the whole, ensures fulfillment of item 4, article 50 of the "Technical Regulations on Fire Safety Requirements" (Federal Law No. 123).

It is also worth noting that the methodology for predicting the fire-hazardous properties of oil refining products based on the use of molecular descriptors and artificial neural networks allows us to conclude that this technique can be used to predict other fire-hazardous properties of organic substances.

Keywords: prediction; molecular descriptors; artificial neural network; ethers; equipment.

REFERENCES

1. Ngoc Lan Mai, Yoon-Mo Koo. Quantitative prediction of lipase reaction in ionic liquids by QSAR using COSMO-RS molecular descriptors. *Biochemical Engineering Journal*, 2014, vol. 87, pp. 33–40. DOI: 10.1016/j.bej.2014.03.010.
2. *Electrical Installation Regulations*. Saint Petersburg, DEAN Publ., 2003. 928 p. (in Russian).
3. Varnek A., Fourches D., Hoonakker F., Solov'ev V. P. Substructural fragments: an universal language to encode reactions, molecular and supramolecular structures. *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, 2005, vol. 19, no. 9-10, pp. 693–703. DOI: 10.1007/s10822-005-9008-0.
4. Korolev D. S., Kalach A. V., Kargashilov D. V. Forecasting of flash point by means of KDS 1.0 neuro-package on the example of esters of oleic acid. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 21–26 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.21-26.
5. Korolev D. S., Kalach A. V., Sorokina Yu. N. Comparative analysis of methods of forecasting of physical and chemical properties of substances. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus / Herald of Command and Engineering Institute of MES of Belarus*, 2016, no. 1(23), pp. 78–84 (in Russian).
6. Korolev D. S., Kalach A. V. Categorization of premises on the basis descriptors and neural network method. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova / Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2015, no. 5, pp. 210–213 (in Russian).
7. Kalach A. V., Kartashova T. V., Sorokina Yu. N., Oblienko M. V. Prediction of fire hazardous properties of organic compounds using descriptors. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2013, no. 1, pp. 70–73 (in Russian).

8. Korolev D. S., Kalach A. V., Kargashilov D. V., Zhuchkov A. V. *KDS 1.0 neuropackage*. Proof of the computer program of state registration, no. 201614070, publ. date 20.05.2016 (in Russian).
9. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik*. 2-e izd. [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of extinguishing. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part I. 713 p. (in Russian).
10. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik*. 2-e izd. [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of extinguishing. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part II. 774 p. (in Russian).
11. Alexeev S. G., Smirnov V. V., Alexeev K. S., Barbin N. M. Flash point. Part III. Calculation via a boiling temperature. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 30–43 (in Russian).
12. Baskin I., Varnek A. Building a chemical space based on fragment descriptors. *Combinatorial Chemistry and High Throughput Screening*, 2008, vol. 11, no. 8, pp. 661–668. DOI: 10.2174/138620708785739907.
13. Alexeev S. G., Alexeev K. S., Smirnov V. V., Barbin N. M. Flash point. Part IV. The descriptors method. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 5, pp. 18–37 (in Russian).

For citation: Korolev D. S., Kalach A. V., Shcherbakov O. V. Application of methods of forecasting fire hazard properties of refined petroleum products on the basis of molecular descriptors for the justification of temperature class of explosion-proof electrical equipment. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 21–30 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.21-30.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу



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

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

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

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

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

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

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

Е. А. ШУВАЛОВА, аспирант кафедры "Технология вяжущих веществ и бетонов", Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: sh.elena@list.ru)

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

УДК 699.812

ГОРЮЧЕСТЬ И ДЫМООБРАЗУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ ОЛИГОМЕРОВ

Рассмотрено влияние содержания и химической природы исходных компонентов на термостойкость, воспламеняемость и дымообразующую способность композиционных материалов на основе эпоксидных олигомеров. Установлено, что фосфатные пластификаторы практически не влияют на горючесть эпоксидных полимеров, но снижают их дымообразующую способность. Показано, что при содержании минеральных наполнителей менее 45 % масс. их химическая природа мало влияет на воспламеняемость эпоксидных композитов, а коэффициент дымообразования линейно уменьшается с ростом степени наполнения. Для снижения горючести эпоксидных композитов предложено использовать аддитивные бромсодержащие антипирены в виде раствора в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине. Показана высокая эффективность ацетилферроцена и α -оксиэтилферроцена, используемых в качестве дымоподавителей эпоксидных композитов. Выявлена корреляция кислородного индекса с предельной концентрацией кислорода и критической плотностью теплового потока воспламенения композитов.

Ключевые слова: антипирен; воспламеняемость; горючесть; дымообразующая способность; композиты; наполнители; пластификаторы; производные ферроцена; эпоксидные олигомеры.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.31-42

Введение

Крупнотоннажным потребителем диановых эпоксидных олигомеров является строительная индустрия. Это обусловлено широким диапазоном технологических, физико-механических и физико-химических свойств материалов на их основе и относительно доступной сырьевой базой для синтеза таких олигомеров [1–3]. Эпоксидные олигомеры используют в качестве связующего при производстве угле-, базальто- и стеклопластиков, композитной арматуры, химически стойких лакокрасочных покрытий, полимеррастворов и полимербетонов, пенопластов, клеев и монолитных покрытий пола [4–8]. Их применяют, как правило, в виде многокомпонентных композиций, содержащих, помимо эпоксидных олигомеров

и отвердителей, различные наполнители, модификаторы, антипирены, синергисты и другие функциональные добавки.

Широкое применение в строительной индустрии полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе эпоксидных олигомеров сдерживается их повышенной пожарной опасностью [9–13]. В связи с этим в России и за рубежом большое внимание уделяется разработке пожаробезопасных эпоксидных композитов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками. Целью работы является установление влияния содержания и химической природы исходных компонентов на термостойкость и основные показатели пожарной опасности эпоксидных ПКМ, что даст возможность целенаправ-

ленно регулировать воспламеняемость, горючесть и дымообразующую способность таких материалов.

Материалы и методы исследования

Объектом настоящего исследования являлись ПКМ на основе эпоксидной смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587–84), содержащие в качестве отверждающего агента алифатические аминные отвердители: диэтилентриамин (ТУ 6-02-914–86), полиэтиленполиамин (ПЭПА, ТУ 2413-357-00203447–99), триэтилентетрамин (ТУ 6-09-11-2119–93), имидазолины марок УП-0640, УП-0641 и УП-0642 (ТУ 6-05-241-514–87) и моноцианэтилдиэтилентриамин УП-0633М (ТУ 2494-552-00203521–99). Упругоэластические характеристики композитов регулировали за счет применения низкомолекулярных бутадиен-нитрильных карбоксилатных каучуков марок СКН-18-1А и СКН-26-1А (ТУ 38.303-01-41–92), фосфатных пластификаторов — ди(2-этилгексил)фенилфосфата, дифенил(2-этилгексил)фосфата, трифенилфосфата, дифенилкрезилфосфата, дифенил(п-третбутил)фенилфосфата (ТУ 6-06-241–92), дифенилизопропилфенилфосфата (ТУ 6-05-211-1211–80), трихлорпропилфосфата (ТУ 2493-513-05763441–2007), трихлорэтилфосфата (ТУ 2493-319-05763441–2000), свойства которых приведены в работе [14], а также хлорпарафина марки Парахлор-380 (ТУ 2493-005-13164401–92), содержащего 54–57 % хлора. В качестве тонкодисперсных (3–25 мкм) минеральных наполнителей использовали оксиды и гидроксиды металлов, гетит, маршалит, андезит, кварцевую муку и гидратсодержащие минералы. Теплофизические свойства использованных оксидов металлов приведены в работе [15], а термические свойства гидратсодержащих минералов и разлагающихся минеральных наполнителей — в [16, 17].

Для снижения горючести эпоксидных ПКМ применяли промышленные марки броморганических антипиренов и синтезированные бромсодержащие соединения серии “Редант”, физико-химические и термические свойства которых приведены в работе [18], а в качестве дымоподавителей — производные ферроцена [19]. Синтезированные антипирены серии “Редант” содержат атомы брома и хлора в ароматическом и алифатическом фрагментах молекулы и представляют собой продукты бромирования 1,1-дихлор-2,2-ди(4-хлорфенил)этилена (Редант 1), конденсации п-хлорбензола с хлоралем (Редант 2), а также бромпроизводные дегидрохлорированных продуктов конденсации п-хлорбензола с хлоралем (Редант 1-2, Редант 2-1). В зависимости от степени бромирования исходного хлоралкилароматического соединения антипирены серии “Редант” содержат 15,5–26,5 % хлора и 44–46 % брома.

Термический анализ наполнителей, антипиренов, производных ферроцена и эпоксидных композиций на воздухе и в токе азота проводили с помощью автоматизированной модульной термоаналитической системы “DuPont-9900” при скорости нагрева 10 °С/мин. Кислородный индекс (КИ), температуры воспламенения T_v и самовоспламенения T_{sv} , коэффициент дымообразования D_m в режиме пиролиза и пламенного горения, теплоту сгорания, критическую плотность теплового потока воспламенения $q_{кр}$, предельную концентрацию кислорода $c_{пр}$ и скорости распространения пламени $V_{рп}$ по горизонтальной поверхности эпоксидных полимеров и ПКМ на их основе определяли по ГОСТ 12.1.044–89* и по методикам, приведенным в работах [14–16].

Результаты и их обсуждение

Наличие в диановых смолах эпоксидных (1–24 %) и гидроксильных (0,2–10 %) функциональных групп позволяет отверждать их органическими, неорганическими и элементоорганическими соединениями различных классов [1–3]. Установлено, что химическое строение исследованных отвердителей мало влияет на горючесть и дымообразующую способность эпоксидных композитов [20]. Значения $c_{пр}$ ПКМ превышают КИ более чем на 25 %, что связано с большими теплотермиями при распространении пламени по горизонтальной поверхности материалов. При этом скорость распространения пламени $V_{рп}$ по поверхности исследованных композитов возрастает с 0,17–0,20 мм/с при концентрации кислорода в потоке окислителя $[O_2]$ 30 % до 0,32–0,69 мм/с при концентрации кислорода 45 % (рис. 1). С ростом содержания аминных отвердителей (ПЭПА) в связующем не только повышается степень отвержде-

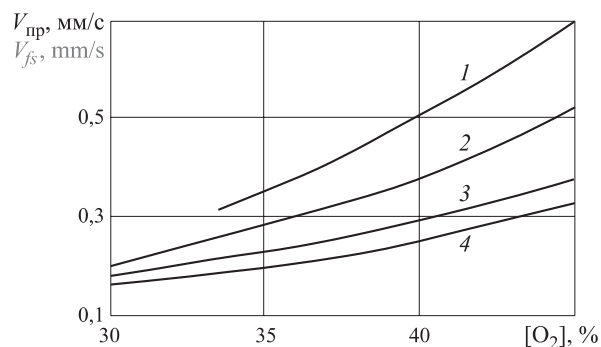


Рис. 1. Зависимость скорости распространения пламени по горизонтальной поверхности эпоксидных композиций от концентрации кислорода в потоке окислителя и природы аминного отвердителя: 1 — полиэтиленполиамин; 2 — УП-663М; 3 — триэтилентетрамин; 4 — диэтилентриамин

Fig. 1. Dependencies between fire spread speed V_{fs} (flat horizontal surface of epoxy matrix composite), oxygen concentration in stream and type of amine hardener: 1 — polyethylenepolyamine; 2 — hardener of type UP-663M; 3 — triethylenetetramine; 4 — diethylenetriamine

ния эпоксидной смолы марки ЭД-20, но и снижается горючесть и возрастает дымообразующая способность полимеров. Поэтому выбор аминных отвердителей следует проводить лишь с учетом требуемых технологических и эксплуатационных показателей эпоксидных композитов.

Эффективным методом повышения деформационно-прочностных показателей эпоксидных композитов является их модификация различными соединениями [21]. При этом низкомолекулярные органические соединения повышают горючесть и коэффициент дымообразования D_m эпоксидных ПКМ. Промышленные марки фосфатных пластификаторов повышают КИ и температуру самовоспламенения эпоксидных связующих с 22,1 % и 470 °С до 23,1–24,5 % и 500–510 °С соответственно, снижают величину $q_{кр}$ с 11,7 до 9,2–10,7 кВт/м² [20]. По эффективности пламегасящего действия трихлорэтил(пропил)фосфаты превосходят арил- и алкилфосфаты. Низкая эффективность фосфатных пластификаторов обусловлена их относительно высокой горючестью (КИ = 23,1÷29,9 %) по сравнению с полимером ЭД-20 (КИ = 21,6÷22,3 %) [14]. Существенное влияние на дымообразующую способность эпоксидных композитов оказывает химическая природа пластификаторов. Так, например, коэффициент ды-

мообразования D_m эпоксидного полимера, содержащего 8,3–15,4 % масс. дифенил(2-этилгексил)фосфата, незначительно снижается в режиме пиролиза с 980 до 910–640 м²/кг, пламенного горения — с 990 до 840–970 м²/кг. Трихлорэтил(пропил)фосфаты повышают коэффициент дымообразования в режиме пиролиза.

Кислородный индекс эпоксидного композита, наполненного андезитом (45 % масс.) и содержащего 4,4 % масс. хлорпарафина марки Парахлор-380 в сочетании с 2,2 % масс. Sb₂O₃, равен 29,1 %. Для получения аналогичного значения КИ для композитов, модифицированных синтетическим каучуком марки СКН-26-1А, необходимо содержание Парахлора-380 11,7 % масс. Установлено, что оптимальным является его содержание в композитах 10–15 % масс. относительно массы эпоксидного олигомера ЭД-20. В этом случае обеспечиваются не только высокие физико-механические свойства и химическая стойкость эпоксидных композитов, но и пониженная горючесть.

Существенное влияние на структуру эпоксидных полимеров оказывают минеральные наполнители [15, 16]. Влияние тонкодисперсных минеральных наполнителей на показатели пожарной опасности эпоксидных ПКМ показано в табл. 1. Установлено, что при степени наполнения менее 45 % масс. хими-

Таблица 1. Показатели пожарной опасности эпоксидных композитов

Table 1. Properties related to fire safety of epoxy matrix composites

Наполнитель Filler	Показатель Value					
	$T_{св}, ^\circ\text{C}$ $T_{si}, ^\circ\text{C}$	КИ, % LOI, %	$c_{пр}, \%$ $c_l, \%$	$q_{кр}, \text{кВт/м}^2$ $q_l, \text{kW/m}^2$	$D_m, \text{м}^2/\text{кг}$, в режиме $D_m, \text{m}^2/\text{kg}$, for	
					пиролиза pyrolysis	пламенного горения combustion
—	470	19,3	20,1	10,9	1350	890
CaO	480	21,2	27,0	11,7	520	350
CaCO ₃	495	20,5	25,1	11,4	790	390
Ca(OH) ₂	480	20,1	23,8	11,2	410	290
MgO	490	20,6	25,6	11,7	720	400
Al ₂ O ₃	490	20,1	23,3	10,8	800	460
CuO	480	19,8	21,8	10,6	590	480
Fe ₂ O ₃	500	21,9	29,7	—	760	500
Sb ₂ O ₃	510	20,6	25,4	11,2	630	470
Гетит Goethite	500	21,5	28,2	11,4	760	500
Кварцевая мука Grinded quartz sand	480	21,6	28,8	12,7	840	540
Mg(OH) ₂	500	22,1	30,9	14,8	680	330
Al(OH) ₃	515	22,3	31,6	16,2	780	360

Примечание. Содержание минеральных наполнителей равно 43,5 % масс., пластификатора (диоктилфталата) — 8,7 % масс.

Note. Amount of mineral fillers is 43.5 % by mass, amount of plasticizer (dioctylphthalate) is 8.7 % by mass.

ческая природа минеральных наполнителей мало влияет на показатели пожарной опасности эпоксидных композитов: $KI = 19,8 \div 22,3 \%$; $T_b = 280 \div 310^\circ C$; $T_{св} = 480 \div 515^\circ C$; $q_{кр} = 10,6 \div 16,2 \text{ кВт/м}^2$; в режиме пиролиза $D_m = 520 \div 840 \text{ м}^2/\text{кг}$, пламенного горения — $D_m = 350 \div 540 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Значительное снижение пожарной опасности эпоксидных композитов происходит при степени наполнения более 50 % масс. С ростом содержания минеральных наполнителей до 61 % масс. KI полимеррастворов увеличивается до 30,8 % (рис. 2), T_b — до $290\text{--}320^\circ C$, $T_{св}$ — до $490\text{--}520^\circ C$, величина $q_{кр}$ линейно возрастает с 10,3 до $12,2\text{--}18,5 \text{ кВт/м}^2$, а D_m снижается в режиме пиролиза с 1470 до $460\text{--}550 \text{ м}^2/\text{кг}$, пламенного горения — с 800 до $190\text{--}250 \text{ м}^2/\text{кг}$. Коэффициент дымообразования в режиме пиролиза и пламенного горения при содержании наполнителей более 20 % масс. линейно снижается с ростом степени наполнения ПКМ и незначительно зависит от химической природы используемых наполнителей [20].

При этом маршалит незначительно повышает, а гетит и лимонит снижают термостойкость композитов, что обусловлено, по нашему мнению, различной устойчивостью наполнителей к действию повышенных температур и различной концентрацией гидроксильных групп на их поверхности [22]. Следует отметить, что для всех исследованных композитов наблюдается линейная зависимость величины $100/KI$ от относительного содержания минеральных наполнителей k . При этом тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс $\text{tg}\alpha$ пропорционален удельному теплосжиганию наполнителя (рис. 3). Величина $\text{tg}\alpha$ может быть использована для оценки эффективности пламегасящего действия наполнителей [16]. Значения $\text{tg}\alpha$ для пластифицированного полимера ЭД-20 при разных наполнителях приведены ниже:

Al_2O_3	0,04
$CaCO_3$	0,13
CaO	0,24
Серпентин	1,07
$Al(OH)_3$	1,2
$Mg(OH)_2$	1,25
Лимонит	1,32

Эффективным методом снижения горючести эпоксидных композитов является применение аддитивных броморганических антипиренов (табл. 2). С ростом их содержания закономерно снижается горючесть эпоксидных композитов. Так, например, с повышением содержания тетрабромдiana до 9,8 % масс. температура воспламенения T_b ПКМ уменьшается с 300 до $280^\circ C$, а самовоспламенения $T_{св}$, напротив, возрастает с $460\text{--}470$ до $480\text{--}490^\circ C$, KI увеличивается с 21,6 до 29,2 %. Коэффициент дымообразования D_m в режиме пиролиза практи-

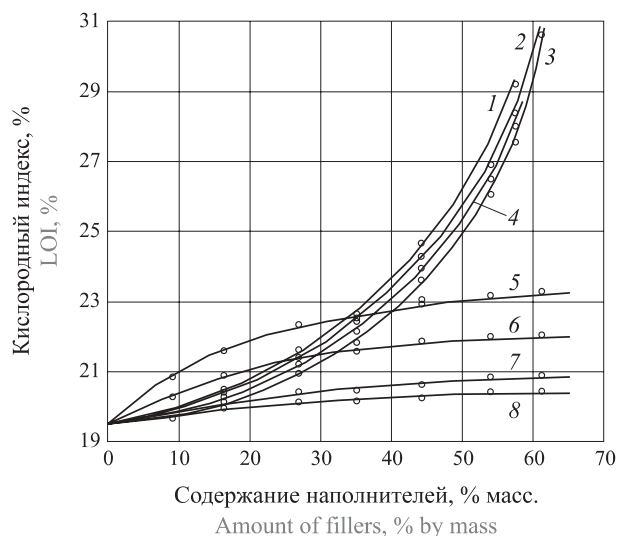


Рис. 2. Зависимость кислородного индекса эпоксидных композитов от химической природы и содержания минеральных наполнителей: 1 — лимонит; 2 — $Mg(OH)_2$; 3 — $Al(OH)_3$; 4 — серпентин; 5 — гетит; 6 — SiO_2 ; 7 — $CaCO_3$; 8 — Al_2O_3

Fig. 2. Dependencies between LOI of epoxy matrix composites and chemical type and amount of mineral fillers: 1 — limonite; 2 — $Mg(OH)_2$; 3 — $Al(OH)_3$; 4 — serpentine; 5 — goethite; 6 — SiO_2 ; 7 — $CaCO_3$; 8 — Al_2O_3

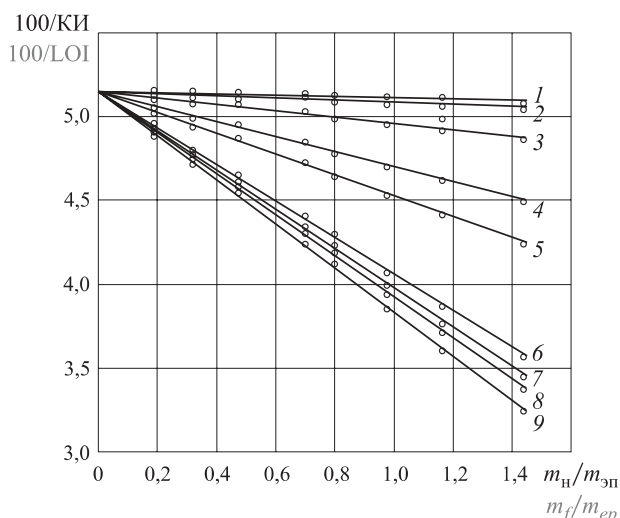


Рис. 3. Зависимость величины $100/KI$ от соотношения массы минерального наполнителя к массе эпоксидного полимера $m_n/m_{эп}$ для ПКМ, наполненных: 1 — Al_2O_3 ; 2 — $CaCO_3$; 3 — CaO ; 4 — SiO_2 ; 5 — гетит; 6 — серпентин; 7 — $Al(OH)_3$; 8 — $Mg(OH)_2$; 9 — лимонит

Fig. 3. Dependencies between $100/LOI$ and mineral filler/epoxy polymer fraction for PCM filled with: 1 — Al_2O_3 ; 2 — $CaCO_3$; 3 — CaO ; 4 — SiO_2 ; 5 — goethite; 6 — serpentine; 7 — $Al(OH)_3$; 8 — $Mg(OH)_2$; 9 — limonite

чески не зависит от содержания антипиренов и составляет $420\text{--}440 \text{ м}^2/\text{кг}$, а в режиме пламенного горения возрастает с 750 до $990 \text{ м}^2/\text{кг}$. Следует отметить, что антипирены аддитивного типа эффективнее реакционноспособных соединений. Так, для получения ПКМ с $KI = 27 \%$ концентрация брома при

Таблица 2. Показатели пожарной опасности эпоксидных ПКМ

Table 2. Fire safety properties of epoxy matrix composites

Марка антипирена Type of fire retardant	$T_{в}, ^\circ\text{C}$ $T_{с}, ^\circ\text{C}$	КИ, % LOI, %	$c_{пр}, \%$ $c_p, \%$	$V_{рп}$ при концент- рации кислорода менее 45 %, мм/с V_{fs} for oxygen concentration less than 45 %, mm/s	$D_m, \text{м}^2/\text{кг}$, в режиме $D_m, \text{m}^2/\text{kg}$, for	
					пиролиза pyrolysis	пламенного горения combustion
Без антипирена No fire retardant	300	21,6	29,4	0,41	410	570
Гексахлорбензол Hexachlorobenzene	290	27,2	37,4	0,35	470	580
Гексабромбензол Hexabromobenzene	280	28,8	36,1	0,38	440	1000
Декабромдифенилоксид Decabromodiphenyl oxide	270	28,6	36,8	0,32	460	900
Тетрабромпарахлорил Tetrabrom P-xylene	270	27,9	37,9	0,33	490	890
2,4,6-триброманилин 2,4,6-tribromaniline	300	28,4	38,9	0,32	480	820
N(2,4,6-трибромфенил)малеинимид N(2,4,6-tribromophenyl)maleimide	290	28,2	36,5	0,36	430	830
3,5,3',5'-тетрабром-4,4'-диамидифенилсульфон 3,5,3',5'-tetrabromo-4,4'-diamidiphenylsulfone	295	28,1	36,1	0,35	470	810
2,4,6-трибромфенол 2,4,6-tribromophenol	290	28,5	38,6	0,23	550	820
Тетрабромдифенилпропан Tetrabromodiphenylpropane	290	28,2	36,7	0,37	—	—
Тетрабромфталевый ангидрид Tetrabromphthalic anhydride	260	28,3	37,3	0,36	490	900

использовании пентабромфенола составляет 8,3 %, а при применении бромсодержащего олигомера марки УП-631 — 20 %. Влияние синтезированных броморганических антипиренов серии “Редант” на термостойкость и пожарную опасность эпоксидных ПКМ приведено в табл. 3. Эпоксидные композиты, модифицированные антипиреном Редант 1-С, имеют более высокую теплопроводную способность по сравнению с материалами, модифицированными антипиренами Редант 1-20 и Редант 1-22 (удельная теплота сгорания композиции, содержащей 20 масс. ч. антипирена Редант 1-С, равна 31570 кДж/кг, Редант 1-20 — 29030 кДж/кг, Редант 1-22 — 29900 кДж/кг) и пониженную термостойкость. Массовая скорость выгорания композитов, модифицированных 20 масс. ч. антипиренов Редант 1-С и Редант 2-1, равна соответственно 32,17 и 30,59 г/(м²·с) при плотности теплового потока воспламенения 10,58 кВт/м².

Коэффициент дымообразования ПКМ повышается в режиме пиролиза с 410 до 440–490 м²/кг, пламенного горения — с 570 до 890–990 м²/кг. Основным критерием, определяющим эффективность таких антипиренов, является близость температуры

начала интенсивного разложения $T_{нр}$ для полимера ЭД-20 и бромсодержащего соединения. Механизм действия бромсодержащих антипиренов детально рассмотрен в работах [23–25]. Таким образом, применение аддитивных броморганических антипиренов позволяет получать умеренногорючие эпоксидные композиты при их содержании 8–10 % масс. Следует отметить, что для получения слабогорючих композитов кислородный индекс должен быть более 31 %.

Учитывая, что аддитивные броморганические антипирены являются порошкообразными кристаллическими или амфотными веществами, их целесообразно использовать в виде раствора в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине. Установлено, что с ростом концентрации антипирена Редант 1 в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине до 50 % КИ композитов повышается с 25,8 до 30,1 %, массовая скорость выгорания при плотности теплового потока 10,58 кВт/м² снижается с 29,1 до 23,4 г/(м²·с), а теплота сгорания линейно уменьшается с 34400 до 30150 кДж/кг (рис. 4). Максимальные значения D_m имеют композиты, содержащие 20–30 %-ный раствор антипирена

Таблица 3. Термостойкость, горючесть и дымообразующая способность эпоксидных композитов**Table 3.** Thermal stability, combustibility and fume evolution of epoxy matrix composites

Показатель Value	Марка антипирена Type of fire retardant			
	Редант 1-2 Redant 1-2	Редант 2-1 Redant 2-1	Редант 2 Redant 2	Редант 1 Redant 1
Кислородный индекс, % / LOI, %	32,3	33,2	30,5	33,7
Температура, °C / Temperature, °C:				
начала разложения / beginning of decomposition	284	252	253	264
максимальной скорости разложения на стадии / maximal rate of decomposition for stage:				
1	317	322	322	333
2	447	445	447	440
Скорость распространения пламени, мм/с, при концентрации кислорода в потоке окислителя, % / Flame spread rate, mm/s, for oxygen concentration, %:				
40	—	0,27	—	0,27
50	0,48	0,5	0,56	0,46
Теплота сгорания, кДж/кг / Heat of combustion, kJ/kg	29900	—	29030	31570
Коэффициент дымообразования, м ² /кг, в режиме / Fume evolution, m ² /kg, for:				
пиролиза / pyrolysis	770	870	760	850
пламенного горения / combustion	650	730	690	630
Примечание. Содержание антипиренов составляет 8,6 % масс., маршалита — 47,2 % масс. Note. Amount of fire retardants is 8.6 % by mass, amount of marshalite is 47.2 % by mass.				

на Редант 1 в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине (рис. 5).

Применение антипиренов серии “Редант” в растворе N,N-диметил-2,4,6-триброманилина позволяет получать слабогорючие (Г1), не распространяющие пламя по поверхности строительных материалов (РП1) эпоксидные ПКМ, обладающие высокими физико-механическими показателями.

Эффективным дымоподавителем полимерных материалов является ферроцен (рис. 6). Установлено, что цикlopентадиенильные сэндвичеобразные

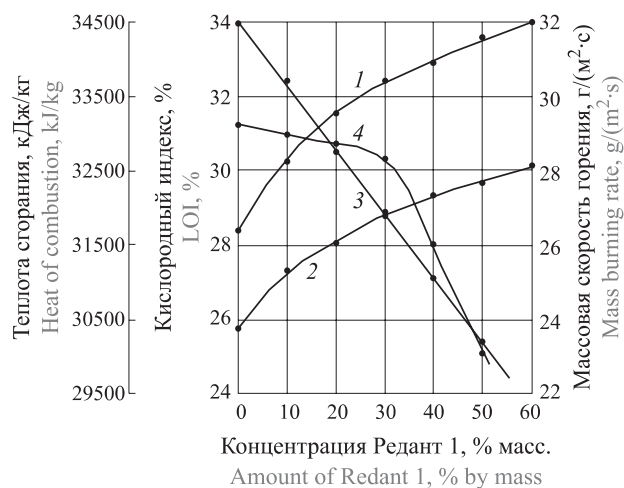


Рис. 4. Зависимость КИ (1, 2), теплоты сгорания (3) и массовой скорости горения (4) эпоксидных ПКМ от концентрации антипирена Редант 1 в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине при его содержании в ПКМ: 1 — 8,6 % масс.; 2, 3, 4 — 4,5 % масс.

Fig. 4. Dependencies between combustibility of epoxy matrix composites and amount of Redant 1 in N,N-dimethyl-2,4,6-tribromoaniline: 1, 2 — LOI; 3 — heat of combustion; 4 — mass burning rate; 1 — amount of fire retardant in the composition is 8.6 % by mass; 2, 3, 4 — 4.5 % by mass

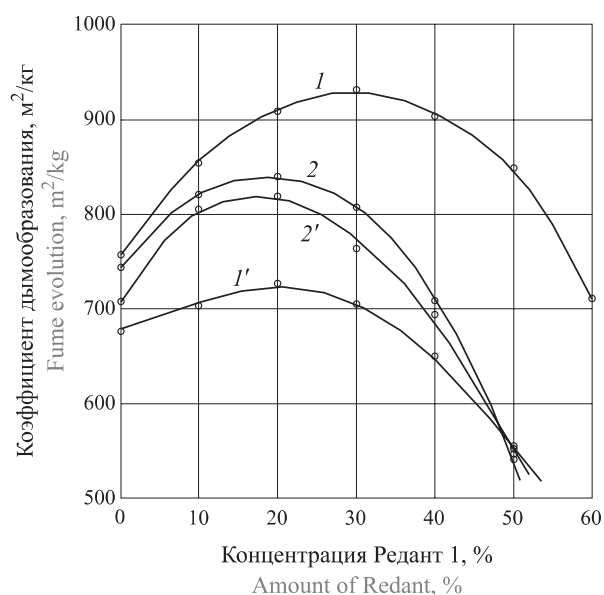


Рис. 5. Зависимость коэффициента дымообразования ПКМ от концентрации антипирена Редант 1 в N,N-диметил-2,4,6-триброманилине в режиме пиролиза (1, 2) и пламенного горения (1', 2') при содержании антипирена 4,1 % масс. (1, 1') и 7,9 % масс. (2, 2')

Fig. 5. Dependencies between fume evolution of epoxy matrix composites and amount of Redant 1 in N,N-dimethyl-2,4,6-tribromoaniline: 1, 2 — pyrolysis mode; 1', 2' — flaming combustion; 1, 1' — amount of fire retardant is 4.1 % by mass; 2, 2' — 7.9 % by mass

производные железа не влияют на температуру воспламенения (220–230 °C) и разложение эпоксидных композиций в низкотемпературной области

(табл. 4), но существенно влияют на их пиролиз при температуре выше 300 °С. При этом чем выше эффективность производных ферроцена, тем с большей скоростью разлагаются эпоксидные композиты на второй стадии и тем ниже их температура самовоспламенения.

Так, например, на второй стадии для исходной композиции температура максимальной скорости разложения $T_{\max}$ и скорость разложения $V_{\text{разл}}$ равны соответственно 485 °С и 18,8 %/мин, а для композитов, содержащих 0,29 % масс. α -оксиэтилферроцена, — 468 °С и 24,5 %/мин. При 10 %-ной конверсии значения эффективной энергии активации $E_{\text{эфф}}$ разложения исходной композиции и составов с добавкой ацетилферроцена и ферроцена равны соответственно 170,5; 161,3 и 185,5 кДж/моль, при 30 %-ной конверсии — 193,2; 189,3 и 207,5 кДж/моль. Это обусловлено, по нашему мнению, тем, что образовавшиеся при разложении производных ферроцена оксиды железа повышают скорость разложения k -фазы.

Воспламеняемость эпоксидных композиций снижается с ростом концентрации производных ферро-

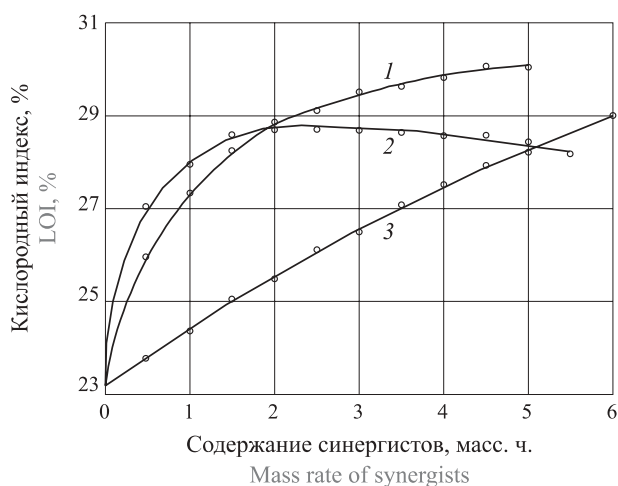


Рис. 6. Зависимость кислородного индекса эпоксидных композитов от содержания синергистов: 1 — ферроцен; 2 — бор; 3 — Sb_2O_3

Fig. 6. Dependencies between LOI of epoxy matrix composites and amount of synergists: 1 — ferrocene; 2 — boron; 3 — Sb_2O_3

цена, при этом КИ эпоксидных композитов возрастает с 23,3 до 25,6–28,3 %. Значительное повышение КИ полимеров происходит при увеличении кон-

Таблица 4. Термостойкость и горючесть наполненных (35 % масс.) эпоксидных композиций, содержащих 0,29 % масс. производных ферроцена

Table 4. Thermal stability and combustibility of filled epoxy matrix composites (amount of filler is 35 % by mass) with 0.29 % by mass of ferrocene derivatives

Показатель Value	Без добавки No admixtures	Ферроцен Ferrocene	α -оксиэтил- ферроцен α -oxyethyl ferrocene	Ацетил- ферроцен Acetyl- ferrocene	Ферроцен- дикарбоно- вая кислота Ferrocene dicarboxylic acid	Поли-ди(α -окси- изопропиленил)- ферроцен Poly-di(α -oxy- isopropylene- yl) ferrocene	Sb_2O_3
Температура, °С / Temperature, °С:							
воспламенения / ignition	220	240	230	220	220	220	—
начала интенсивного разложения / start of decomposition	284	276	285	273	284	282	284
при максимальной скорости раз- ложения на стадии / maximal rate of decomposition on stage:							
1	304	301	305	300	305	306	306
2	485	500	468	459	483	481	496
самовоспламенения / self-ignition	515	490	470	480	480	480	—
Максимальная скорость разложе- ния, %/мин, на стадии / Maximal rate of decomposition, %/min, on stage:							
1	19,9	19,9	20,0	21,2	18,4	21,4	22,2
2	18,9	24,2	24,5	20,8	18,8	16,0	22,9
Тепловой эффект разложения, кДж/кг / Specific heat of decompo- sition, kJ/kg	4070	4300	3960	4300	4300	3300	4360
Кислородный индекс, % / LOI, %	23,3	27,6	28,3	25,6	26,1	25,8	27,9

Таблица 5. Влияние производных ферроцена на дымообразующую способность пластифицированных эпоксидных композиций

Table 5. Effect of ferrocene derivatives on the smoke-forming ability of plasticized epoxy compositions

Производные ферроцена Ferrocene derivatives	D_m , м ² /кг, в режиме D_m , m ² /kg, for	
	пиролиза pyrolysis	пламенного горения flame combustion
Без добавки No admixtures	1030	890
Ферроцен Ferrocene	720	480
Ацетилферроцен Acetylferrocene	660	340
Диацетилферроцен Diacetylferrocene	560	430
α -оксиэтилферроцен α -oxyethylferrocene	580	380

центрации производных ферроцена до 0,6 % масс. (рис. 7). При этом их концентрация не влияет на температуру воспламенения T_v и снижает температуру самовоспламенения T_{cv} эпоксидных композиций. Так, с ростом концентрации диацетилферроцена с 0,17 до 1,7 % масс. величина T_{cv} снижается с 505 до 490 °С. Это подтверждает вывод о том, что действие производных ферроцена проявляется в высокотемпературной области разложения эпоксидных ПКМ. Влияние исследованных циклопентадиенильных производных железа на дымообразующую способность пластифицированных эпоксидных композиций приведено ниже в табл. 5.

Более высокая эффективность ацетилферроцена и α -оксиэтилферроцена по сравнению с ферроценом обусловлена легкостью образования при их пиролизе ультрадисперсных каталитически активных оксидов железа (Fe_2O_3 , Fe_3O_4), которые влияют на механизм пиролиза коксующихся полимеров, повышают вероятность образования на поверхности полимерного материала карбонизованного слоя, ингибируют образование бензола и дыма. При этом

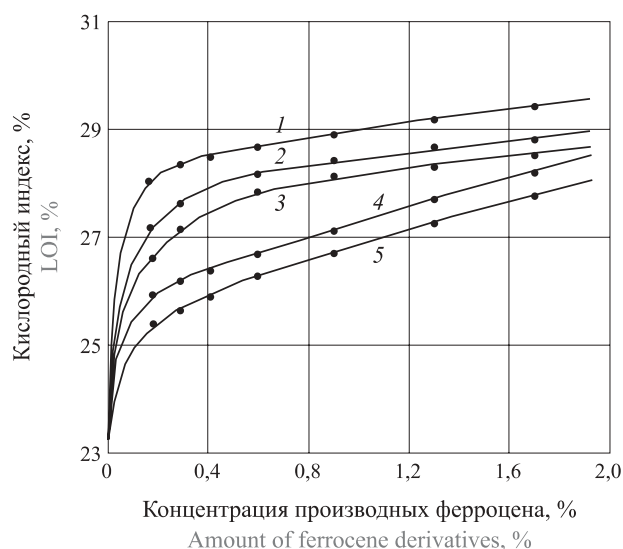


Рис. 7. Зависимость кислородного индекса эпоксидных полимеррастворов от концентрации производных ферроцена в исходной композиции: 1 — α -оксиэтилферроцен; 2 — ферроцен; 3 — диацетилферроцен; 4 — ферроцендикарбоновая кислота; 5 — ацетилферроцен

Fig. 7. Dependence between LOI of epoxy matrix mortars and amount of ferrocene derivatives: 1 — α -oxyethylferrocene; 2 — ferrocene; 3 — diacetylferrocene; 4 — ferrocenedicarboxylic acid; 5 — acetylferrocene

оптимальной концентрацией производных ферроцена в эпоксидных ПКМ является 0,3–0,5 % масс.

Заключение

Выполненный авторами комплекс экспериментальных исследований позволил выявить количественные закономерности влияния рецептурных факторов — химической природы и содержания дисперсных фаз и модификаторов — на термостойкость, воспламеняемость и дымообразующую способность композитов на основе эпоксидных олигомеров.

Определены составы эпоксидных композитов, характеризующихся повышенными показателями эксплуатационных свойств и отличающихся умеренной и малой горючестью. Разработанные композиты могут быть успешно использованы в строительной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев Ю. С., Кочергин Ю. С., Пактер М. К., Кучер Р. В. Эпоксидные олигомеры и клеевые композиции. — Киев : Наукова думка, 1990. — 200 с.
2. Кочнова З. А., Жаворонок Е. С., Чалых А. Е. Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты. — М. : ООО “Пейнт-Медиа”, 2006. — 200 с.
3. Чернин И. З., Смехов Ф. М., Жердев Ю. В. Эпоксидные полимеры и композиции. — М. : Химия, 1982. — 232 с.
4. Баженов С. Л., Берлин А. А., Кульков А. А., Ошмян В. Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология. — Долгопрудный : Изд. дом “Интеллект”, 2010. — 347 с.

5. Баженов Ю. М., Батаев Д. К.-С., Муртазаев С.-А. Ю. Энерго- и ресурсосберегающие материалы и технологии для ремонта и восстановления зданий и сооружений. — М. : Комтех-Принт, 2006. — 235 с.
6. Степанова В. Ф., Степанов А. Ю., Жирков Е. П. Арматура композитная полимерная. — М. : Бумажник, 2013. — 200 с.
7. Шилин А. А., Пиеничный В. А., Картузов Д. В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. — М. : Стройиздат, 2007. — 184 с.
8. Селяев В. П., Иващенко Ю. Г., Низина Т. А. Полимербетоны. — Саранск : Изд-во Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, 2016. — 284 с.
9. Полимерные материалы с пониженной горючестью / Под ред. А. Н. Праведникова. — М. : Химия, 1986. — 221 с.
10. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. — СПб. : Научные основы и технологии, 2011. — 416 с.
11. Karbhari V. M., Chin J. W., Hunston D., Benmokrane B., Juska T., Morgan R., Lesko J. J., Sorathia U., Reynaud D. Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure // Journal of Composites for Construction. — 2003. — Vol. 7, No. 3. — P. 238–247. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2003)7:3(238).
12. Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L., Cosenza E., Davalos J. F., Lesko J. J., Machida A., Rizkalla S. H., Triantafyllou T. C. Fiber-reinforced polymer composites for construction — state-of-the-art review // Journal of Composites for Construction. — 2002. — Vol. 6, No. 2. — P. 73–87. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2002)6:2(73).
13. Mouritz A. P., Gibson A. G. Fire properties of polymer composite materials. — Dordrecht : Springer, 2006. — 401 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-5356-6.
14. Ушков В. А., Лалаян В. М., Невзоров Д. И., Ломакин С. М. О влиянии фталатных и фосфатных пластификаторов на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 10. — С. 25–33.
15. Ушков В. А., Лалаян В. М., Ломакин С. М., Невзоров Д. И. О влиянии неразлагающихся наполнителей на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 6. — С. 32–39.
16. Ушков В. А., Лалаян В. М., Ломакин С. М., Невзоров Д. И. Горючесть и дымообразующая способность полимерных композиционных материалов с разлагающимися минеральными наполнителями // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 8. — С. 15–24.
17. Ушков В. А., Абрамов В. В., Григорьева Л. С., Кирьянова Л. В. Термостойкость и пожарная опасность эпоксидных полимеррастворов // Строительные материалы. — 2011. — № 12. — С. 68–71.
18. Ушков В. А., Григорьева Л. С., Абрамов В. В. Горючесть эпоксидных полимеров // Вестник МГСУ. — 2011. — № 1-2. — С. 352–356.
19. Ушков В. А., Невзоров Д. Н., Копытин А. В., Лалаян В. М. Воспламеняемость и дымообразующая способность полимерных материалов, содержащих производные ферроцена // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 7. — С. 27–35.
20. Ушков В. А., Абрамов В. В., Лалаян В. М., Кирьянова Л. В. Слабогорючие эпоксидные полимеррастворы, используемые для восстановления и ремонта строительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 10. — С. 36–40.
21. Панина Н. Н., Чурсова Л. В., Бабин А. Н., Гребенева Т. А., Гуревич Я. М. Основные способы модификации эпоксидных полимерных материалов в России // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2014. — № 9. — С. 10–17.
22. Брык М. Т. Деструкция наполненных полимеров : монография. — М. : Химия, 1989. — 192 с.
23. Халтуринский Н. А. О механизме действия галогенсодержащих ингибиторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2009. — № 11. — С. 22–30.
24. Халтуринский Н. А. О механизме действия галогенсодержащих ингибиторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2009. — № 12. — С. 30–37.
25. Халтуринский Н. А., Рудакова Т. А. Физические аспекты горения полимеров и механизм действия ингибиторов // Химическая физика. — 2008. — Т. 27, № 6. — С. 73–84.

Материал поступил в редакцию 10 июня 2017 г.

Для цитирования: Ушков В. А., Копытин А. В., Шувалова Е. А., Смирнов В. А. Горючесть и дымообразующая способность композиционных материалов на основе эпоксидных олигомеров // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 6. — С. 31–42. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.31-42.

COMBUSTIBILITY AND FUME EVOLUTION OF EPOXY MATRIX COMPOSITES

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

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

SHUVALOVA E. A., Postgraduate Student of Technology of Binders and Concretes Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: sh.elena@list.ru)

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

ABSTRACT

Introduction. Epoxy oligomers are widely used as binders in construction industry. At the same time, wide use of polymers in modern construction industry requires careful examination and optimization of operational properties related to fire safety. It is known that such properties can be controlled by chlorinated paraffins, synthesized fire retardants of type “Redant” and many other compounds. However, the effect of such compounds to the properties of epoxy matrix composites has not been thoroughly investigated to date. The choice of an admixture that reduces the fume evolution of epoxy composites is an important task also.

Purpose of the work. The purpose of this work is to study the thermal stability, flammability, fume evolution of epoxy matrix composites with different types and amounts of hardeners, fillers, plasticizers, fire retardants and ferrocene derivatives.

Materials and methods. Dependencies between thermal stability, flammability, fume evolution of polymer matrix composites based on ED-20 epoxy resin and amount and chemical type of components are examined in the present work. To control operational properties of interest the chemical type and content of hardeners, fillers, plasticizers, fire retardants and ferrocene derivatives are varied. DuPont-9900 device is used for thermal analysis. Properties related to fire safety are determined in accordance with RU GOST 12.1.044–89 and several methods that were previously developed by authors of this work.

Results. It is shown that while phosphate-based plasticizers are of almost no effect on combustibility of epoxy-based polymer matrix composites, they can successfully be used for the reduction of fume evolution. It is revealed that chemical nature of mineral fillers has little effect on the flammability when amount of such fillers are less than 45 % by weight; at the same time, fume evolution linearly decreases with the increase of degree of filling. To reduce the flammability of epoxy composites, we propose additive bromine-containing flame retardants in the form of a solution in N,N-dimethyl-2,4,6-tribromoaniline. High efficiency of acetylferrocene and α -hydroxyethylferrocene as reducers of fume evolution is shown. The correlation between critical density of the heat flux of ignition and limiting oxygen index and also limiting concentration of oxygen is revealed.

Conclusion. In the present work we have summarized results of several laboratory tests. The tests were allowed to select the type and amount of components of epoxy matrix composites with improved operational properties, intermediate and small combustibility. Such composites can successfully be used in different areas of construction industry.

Keywords: fire retardant; flammability; combustibility; fume evolution; composites; fillers; plasticizers; ferrocene derivatives; epoxies.

REFERENCES

1. Zaytsev Yu. S., Kochergin Yu. S., Pakter M. K., Kucher R. V. *Epoksidnyye oligomery i kleyevyye kompozitsii* [Epoxy oligomers and glue compositions]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 200 p. (in Russian).
2. Kochnova Z. A., Zhavoronok E. S., Chalykh A. E. *Epoksidnyye smoly i otverditeli: promyshlennyye produkty* [Epoxy resins and hardeners: industrial products]. Moscow, Peynt-Media Publ., 2006. 200 p. (in Russian).
3. Chernin I. Z., Smekhov F. M., Zherdev Yu. V. *Epoksidnyye polimery i kompozitsii* [Epoxy polymers and compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 232 p. (in Russian).
4. Bazhenov S. L., Berlin A. A., Kulkov A. A., Oshmyan V. G. *Polimernyye kompozitsionnyye materialy. Prochnost i tekhnologiya* [Polymer matrix composites. Strength and technology]. Dolgoprudnyy, Intel-ekt Publ., 2010. 347 p. (in Russian).
5. Bazhenov Yu. M., Bataev D. K.-S., Murtazaev S.-A. Yu. *Energo- i resursoberegayushchiye materialy i tekhnologii dlya remonta i vosstanovleniya zdaniy i sooruzheniy* [Sustainable materials and technologies for repair and reconstruction of buildings and constructions]. Moscow, Komtekhn-Print Publ., 2006. 235 p. (in Russian).
6. Stepanova V. F., Stepanov A. Yu., Zhirkov E. P. *Armatura kompozitnaya polimernaya* [Polymer matrix composite reinforcement]. Moscow, Bumazhnik Publ., 2013. 200 p. (in Russian).
7. Shilin A. A., Pshenichnyy V. A., Kartuzov D. V. *Vneshneye armirovaniye zhelezobetonnykh konstruktсий kompozitsionnymi materialami* [External reinforcement of ferroconcrete by composite materials]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2007. 184 p. (in Russian).
8. Selyaev V. P., Ivashchenko Yu. G., Nizina T. A. *Polimerbetony* [Polymer matrix concretes]. Saransk, Ogarev Mordovia State University Publ., 2016. 284 p. (in Russian).
9. Pravednikov A. N. (ed.). *Polimernyye materialy s ponizhennoy goryuchestyu* [Polymers of low flammability]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 221 p. (in Russian).
10. Mikhaylin Yu. A. *Teplo-, termo- i ognestoykost polimernykh materialov* [Thermal stability and fire resistance of polymers]. Saint Petersburg, Nauchnyye osnovy i tekhnologii [Scientific foundations and technologies] Publ., 2011. 416 p. (in Russian).
11. Karbhari V. M., Chin J. W., Hunston D., Benmokrane B., Juska T., Morgan R., Lesko J. J., Sorathia U., Reynaud D. Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure. *Journal of Composites for Construction*, 2003, vol. 7, no. 3, pp. 238–247. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2003)7:3(238).
12. Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L., Cosenza E., Davalos J. F., Lesko J. J., Machida A., Rizkalla S. H., Triantafillou T. C. Fiber-reinforced polymer composites for construction — state-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 2002, vol. 6, no. 2, pp. 73–87. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(2002)6:2(73).
13. Mouritz A. P., Gibson A. G. *Fire properties of polymer composite materials*. Dordrecht, Springer, 2006. 401 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-5356-6.
14. Ushkov V. A., Lalayan V. M., Nevzorov D. I., Lomakin S. M. The effect of phthalate and phosphorus plasticizer for flammability and smoke-forming ability of polymer composite materials. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 25–33 (in Russian).
15. Ushkov V. A., Lalayan V. M., Lomakin S. M., Nevzorov D. I. About influence of non-degradable fillers for flammability and smoke-forming ability of polymer composite materials. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 32–39 (in Russian).
16. Ushkov V. A., Lalayan V. M., Lomakin S. M., Nevzorov D. I. Flammability and smoke generation ability of polymer composite materials with degradable mineral fillers. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 8, pp. 15–24 (in Russian).
17. Ushkov V. A., Abramov V. V., Grigorieva L. S., Kirianova L. V. Heat-resistance and fire hazards of epoxy polymer mortars. *Stroitel'nye materialy / Construction Materials*, 2011, no. 12, pp. 68–71 (in Russian).
18. Ushkov V. A., Grigoryeva L. S., Abramov V. V. Burning of epoxy polymer solution. *Vestnik MGSU / Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, no. 1-2, pp. 352–356 (in Russian).
19. Ushkov V. A., Nevzorov D. N., Kopytin A. V., Lalayan V. M. Flammability and smoke-forming ability of polymeric materials containing ferrocene derivatives. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 7, pp. 27–35 (in Russian).
20. Ushkov V. A., Abramov V. V., Lalayan V. M., Kiryanova L. V. Hard combustible epoxy polymer solutions in restoration and repair of building constructions. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 10, pp. 36–40 (in Russian).

21. Panina N. N., Chursova L. V., Babin A. N., Grebeneva T. A., Gurevich Ya. M. The most used ways of modifications of epoxy polymers that are common in Russia. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik / All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2014, no. 9, pp. 10–17 (in Russian).
22. Bryk M. T. *Destruktsiya napolnennykh polimerov: monografiya* [Destruction of the filled polymers. Monograph]. Moscow, Khimiya Publ., 1989. 192 p. (in Russian).
23. Khalturinskiy N. A. Processes that causes the destruction of halide retardants. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik / All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2009, no. 11, pp. 22–30 (in Russian).
24. Khalturinskiy N. A. Processes that causes the destruction of halide retardants. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik / All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2009, no. 12, pp. 30–37 (in Russian).
25. Khalturinskii N. A., Rudakova T. A. Physical aspects of polymer combustion and the inhibition mechanism. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2008, vol. 2, issue 3, pp. 480–490. DOI: 10.1134/s1990793108030238.

For citation: Ushkov V. A., Kopytin A. V., Shuvalova E. A., Smirnov V. A. Combustibility and fume evolution of epoxy matrix composites. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 31–42 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.31-42.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу

Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко

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

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



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

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

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

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

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

Д. М. НИГМАТУЛЛИНА, адъюнкт, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4; e-mail: Dinaraond81@mail.ru)

А. Б. СИВЕНКОВ, д-р техн. наук, доцент, ученый секретарь, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Учебно-научный комплекс проблем пожарной безопасности в строительстве, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4; e-mail: sivenkov01@mail.ru)

Е. Ю. ПОЛИЩУК, канд. техн. наук, докторант, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4; e-mail: epyur@ya.ru)

Е. И. СЕНИНА, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инновационных технологий и оборудования деревообработки, Институт лесопромышленного бизнеса и дорожного строительства, Уральский государственный лесотехнический университет (Россия, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; e-mail: sten_elena@mail.ru)

В. М. БАЛАКИН, канд. хим. наук, доцент, профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров, Уральский государственный лесотехнический университет (Россия, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; e-mail: balakin_v.m@mail.ru)

УДК 614.841.1

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ПОЖАРООПАСНЫЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ С ГЛУБОКОЙ ПРОПИТКОЙ ОГНЕБИОЗАЩИТНЫМИ СОСТАВАМИ

Представлены результаты исследования влияния трех огнебиозащитных систем, различных по своей химической природе и механизму огнезащитного действия, при их глубоком введении в структуру древесного материала на физико-механические свойства и показатели пожарной опасности древесины. Установлено влияние степени поглощения и глубины пропитки на прочностные характеристики древесины и показатели ее пожарной опасности. Показано благоприятное влияние глубокой пропитки древесины при незначительной степени поглощения на снижение ее воспламеняемости и способности распространять пламя по поверхности. Обнаружено, что при введении в структуру древесины огнебиозащитных составов с данным уровнем поглощения ухудшения физико-механических показателей не происходит. Получены данные по снижению дымообразующей способности импрегнированной древесины исследуемыми составами.

Ключевые слова: древесина; деревянные конструкции; прочность; пожарная опасность; антипирены; глубокая пропитка.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.43-51

Введение

Благодаря высокой экологичности, возобновляемости растительного сырья и высоким эксплуатационным свойствам древесина как конструкционный и отделочный материал имеет неоспоримые преимущества перед иными традиционными и современными полимерными композиционными материалами. В то же время серьезным сдерживающим фактором, ограничивающим возможности ее применения в строительстве, является высокая пожарная опасность.

Для обеспечения пожарной безопасности древесины и конструкций на ее основе в строительстве

широкое распространение получили огнезащитные системы различного состава [1–3], которые могут либо наноситься на поверхность древесины, либо вводиться в ее объем с применением различных технических приемов пропитки.

В практике огнезащиты наибольшее распространение получила поверхностная обработка, что объясняется ее высокой доступностью, простотой, низкой стоимостью и практически полным отсутствием влияния на прочностные и иные эксплуатационные свойства древесины. Вместе с тем данный способ обработки имеет и ряд недостатков, связанных, в первую очередь, с ее низкой надежностью [4].

© Нигматуллина Д. М., Сивенков А. Б., Полищук Е. Ю., Сенина Е. И., Балакин В. М., 2017

Глубокая пропитка ввиду высокой технологичности и стоимости обработки, а также потребности в специализированном оборудовании не получила широкого распространения при решении вопросов обеспечения пожарной безопасности. Кроме того, многие исследователи считают, что применение данного способа пропитки, с одной стороны, нецелесообразно для массивных деревянных конструкций [5], а с другой — крайне негативно влияет на их физико-механические свойства [6, 7].

Вместе с тем введение антипиренов в объем древесного материала в заводских условиях позволяет обеспечивать относительно высокую стабильность противопожарных свойств. Однако, как показывают результаты немногочисленных исследований, влияние глубокой пропитки на прочностные свойства древесины неоднозначно [5, 8]. Ряд проблемных вопросов, связанных с применением глубокой пропитки деревянных конструкций, был снят с развитием техники импульсной пропитки [9, 10], которая при меньших временных и энергетических затратах не приводит к формированию напряжений и повреждений внутри пропитываемого материала и позволяет обеспечить достаточный уровень поглощения.

Цели и задачи исследования

В настоящей работе была поставлена цель — изучить влияние огнезащитных систем, различных по своей химической природе, на физико-механические и пожароопасные свойства древесины. Для достижения этой цели необходимо было решить задачи установления уровней поглощения огнебиозащитных составов для обеспечения требуемых показателей прочности и пожарной опасности древесного материала.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования в работе использовались образцы древесины сосны, подготовленные в соответствии с требованиями стандартных методов исследования на прочность при сжатии вдоль волокон по ГОСТ 16483.10–73, при статическом изгибе по ГОСТ 16483.3–84 и при скалывании вдоль волокон по ГОСТ 16483.5–73, воспламеняемость по ГОСТ 30402–96, дымообразующую способность и индекс распространения пламени по ГОСТ 12.1.044–89.

Результаты исследования и их обсуждение

В рамках настоящей работы были проведены исследования физико-механических свойств и пожарной опасности древесины, обработанной с использованием трех огнезащитных систем [11]:

- 1) на основе раствора неорганических азот-фосфорсодержащих соединений (состав 1);
- 2) на основе органических азот-фосфорсодержащих соединений — промышленно выпускаемый огнебиозащитный состав Аммофон-1 (состав 2);
- 3) на основе органических пленкообразующих вспучивающихся веществ — продукт окисления растительных полисахаридов (ОПС) [12] (состав 3).

Физико-механические свойства исходной и обработанной огнебиозащитными системами древесины оценивались по трем показателям: прочности при сжатии вдоль волокон по ГОСТ 16483.10–73, при статическом изгибе по ГОСТ 16483.3–84 и при скалывании вдоль волокон по ГОСТ 16483.5–73.

Пропитка образцов древесины проводилась в лабораторном автоклаве (рис. 1) с применением импульсно-создаваемого глубокого вакуума и невысокого переменного гидродавления (вакуум-давление (ВД)) [10, 11].

Одной из основных проблем при проведении пропитки является разброс значений уровня поглощения, что объясняется высокой анизотропией свойств древесины, являющейся природным композиционным материалом. Кроме того, уровень поглощения в значительной степени зависит от геометрических размеров пропитываемого материала (снижение поглощающей способности наблюдается с увеличением размеров образцов). Даже в стандартных условиях различные образцы ведут себя неодинаково, поэтому для оценки влияния пропитывающих составов на прочностные характеристики древесины полученные данные сравнивались с результатами



Рис. 1. Внешний вид лабораторного автоклава
Fig. 1. The appearance of the laboratory autoclave

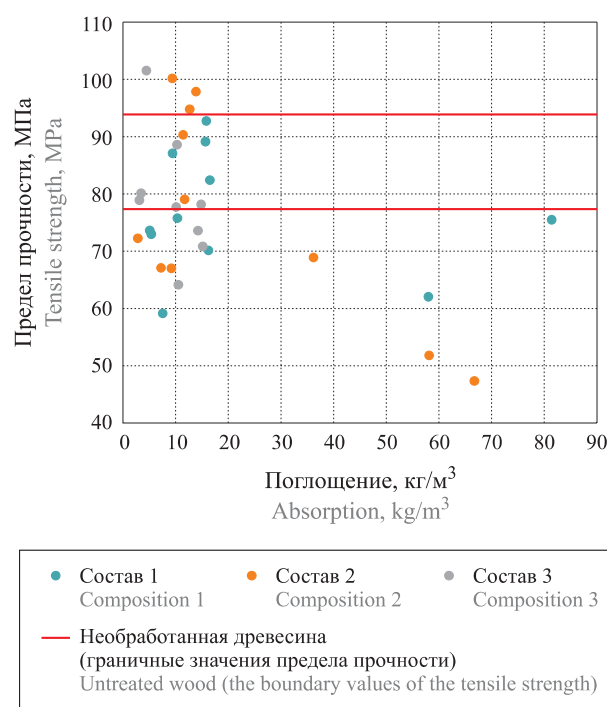


Рис. 2. Результаты испытаний образцов древесины на прочность при изгибе

Fig. 2. Test results of wood samples in terms of bending strength

испытаний необработанной древесины, а также с нормативными характеристиками [13].

Так, например, при проведении испытаний по установлению предела прочности на изгиб (рис. 2) выявлено, что при уровне поглощения до 20 кг/м³ прочностные характеристики пропитанных образцов соответствуют необработанной древесине независимо от применяемого пропиточного состава.

Некоторое снижение прочности отмечается у образцов, пропитанных составом 2, при уровне поглощения более 50 кг/м³. Так, минимальное значение предела прочности при поглощении 66 кг/м³ составило 47 МПа, что на 39 % ниже минимального значения, полученного для необработанной древесины. Вместе с тем в соответствии с приложением В [14] для элементов класса К26 сорта 1 минимальное значение временного предела прочности на изгиб составляет 42 МПа.

Что касается состава 1, на основании полученных данных можно говорить об отсутствии негативного влияния его на прочностные характеристики древесины независимо от уровня поглощения. Так, при поглощении 81 кг/м³ предел прочности составил 75,5 МПа, что только на 2 % ниже минимального измеренного показателя для необработанной древесины.

При оценке влияния огнебиозащитных составов на показатели прочности при сжатии (рис. 3,а) и при скалывании (рис. 3,б) отмечается отсутствие негативного влияния составов 1 и 2.

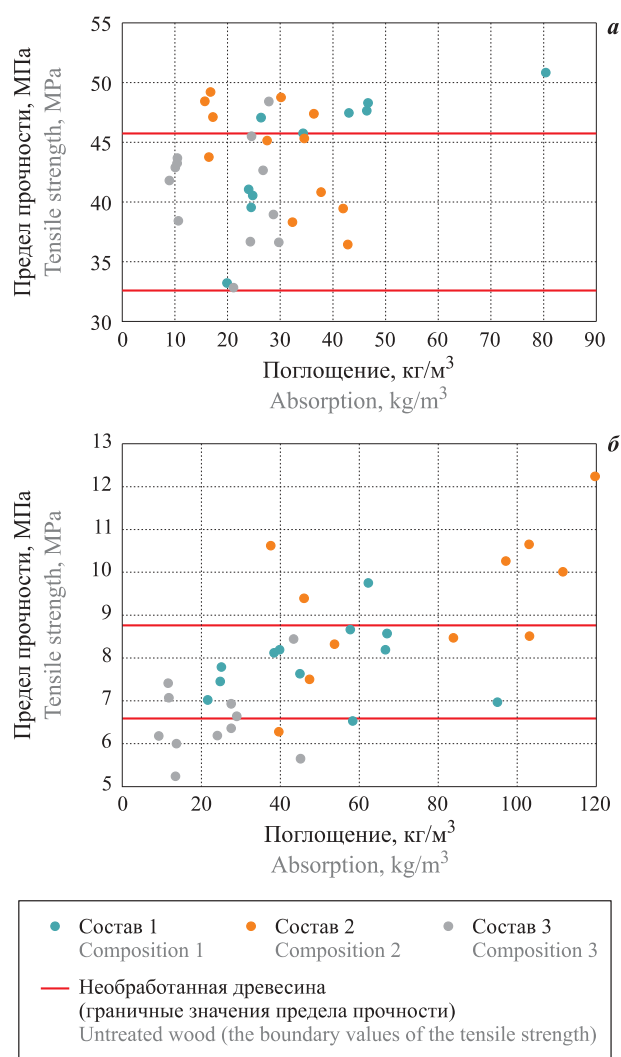


Рис. 3. Результаты испытаний образцов древесины на прочность при сжатии (а) и при скалывании (б)

Fig. 3. Test results of wood samples in terms of compressive strength (а) and of shear strength (б)

Состав 1 повышает предел прочности древесины на сжатие при больших значениях поглощения (более 40 кг/м³), а состав 2 — предел прочности на скалывание при экстремально высоких значениях поглощения (более 80 кг/м³). Некоторое снижение прочности на скалывание отмечается у состава 3: минимальное значение, полученное в ходе испытаний, на 13 % ниже нормативного, приведенного в приложении В [14].

Таким образом, полученные данные позволяют говорить об отсутствии отрицательного влияния глубокой пропитки древесины огнезащитными составами на ее прочностные свойства, что определяет целесообразность проведения дальнейших исследований, направленных на выявление особенностей влияния различных антипиренирующих составов на показатели пожарной опасности элементов деревянных конструкций.

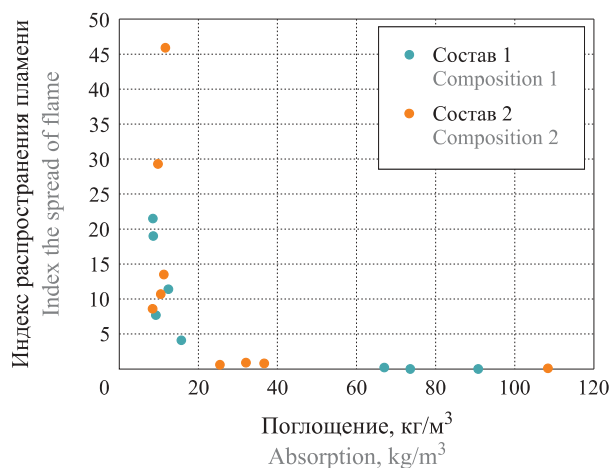


Рис. 4. Результаты определения индекса распространения пламени для древесины, пропитанной составами 1 и 2
Fig. 4. The results of the determination of the index the spread of flame for wood impregnated with compositions 1 and 2

Ранее [11] нами было показано, что огнезащитная эффективность составов при глубокой пропитке зависит не только от уровня поглощения и вида огнезащитного средства, но и от глубины его проникновения. Так, для состава 1 было установлено, что 1-я группа огнезащитной эффективности может быть достигнута при уровне поглощения 55 кг/м^3 при введении состава на глубину до 1 мм, а при поглощении 30 кг/м^3 — на глубину до 15 мм (сквозная пропитка стандартных образцов по ГОСТ Р 53292–2009). Это позволяет говорить о наличии потенциальных возможностей оптимизации процессов глубокой пропитки древесины, снижении расхода сырьевых компонентов и, соответственно, о повышении экономической привлекательности метода. В то же время по результатам испытаний на огнезащитную эффективность было показано, что состав 3, огнезащитное действие которого основано на формировании над поверхностью защищаемого материала защитного карбонизированного слоя, при введении в объем изделий не обеспечивает огнезащиты.

В рамках данной работы была проведена сравнительная оценка влияния глубокой пропитки ис-

Таблица 1. Классификация материала по ИРП в зависимости от поглощения антипиренов

Table 1. Classification of material on flame spread index on the magnitude of the absorption of flame retardants

Защитный состав Protective composition	Поглощение антипирена, кг/м^3 Absorption of flame retardants, кг/м^3		
	Материалы, не распространяющие пламя Do not distribute	Материалы, медленно распространяющие пламя Slowly distribute	Материалы, быстро распространяющие пламя Fast distribute
1	Более 25 Higher 25	Более 10 Higher 10	Менее 10 Below 10
2	Более 25 Higher 25	Более 9 Higher 9	Менее 9 Below 9
3	Не достигнута Not achieved		Менее 28 Below 28

следуемыми составами на ряд показателей пожарной опасности древесины, определенных в соответствии с [13].

Так, при исследовании влияния глубокой пропитки на воспламеняемость древесины по ГОСТ 30402–96 наилучшие показатели отмечены у состава 3, который согласно ГОСТ Р 53292–2009 не обладает огнезащитным действием. Высокая эффективность данного состава по показателю воспламеняемости относится, по всей видимости, к его способности заполнять поры древесного материала, препятствуя выходу на поверхность газообразных продуктов термического разложения, обеспечивая перевод древесины в группу по воспламеняемости В2 (критическая плотность теплового потока 20 кВт/м^2) при уровне поглощения от 19 кг/м^3 , в то время как составы 1 и 2 позволяют получить подобные показатели воспламеняемости при поглощении 25 и 40 кг/м^3 соответственно.

Хорошие характеристики при снижении распространения пламени по поверхности древесных материалов по ГОСТ 12.1.044–89* показали составы 1 и 2, при уровне поглощения которых более 10 кг/м^3

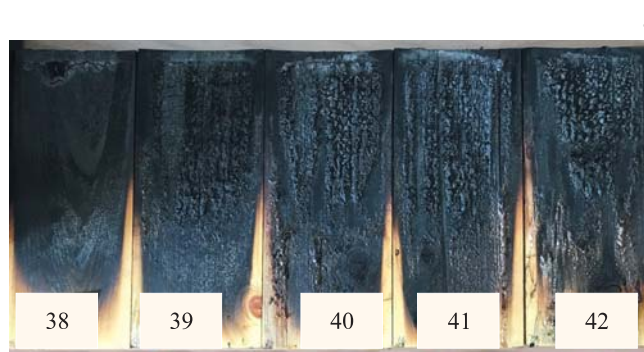
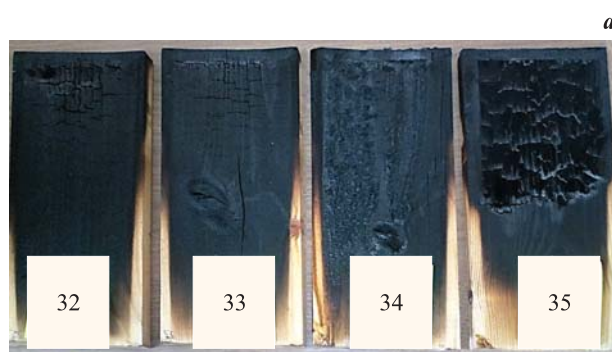


Рис. 5. Внешний вид образцов, пропитанных составами 1 (а) и 2 (б), после испытаний на определение ИРП

Fig. 5. Appearance of samples impregnated with liquid 1 (a) and 2 (b) after the test to determine the flame spread index

Таблица 2. Классификация материалов по прочностным показателям и пожарной опасности в зависимости от величины поглощения антипиренов

Table 2. Classification of materials on strength characteristics and fire hazard depending on the magnitude of the absorption of flame retardants

Показатель Property	Состав 1 Composition 1	Состав 2 Composition 2	Состав 3 Composition 3
Характер влияния на прочностные характеристики материалов Effect on mechanical properties			
Прочность на изгиб Bending strength	Не влияет (до 80 кг/м³)* No effect (to 80 kg/m³)*	Снижение (более 30–40 кг/м³) Reduce (higher 30–40 kg/m³)	Не влияет (до 15 кг/м³) No effect (to 15 kg/m³)
Прочность на сжатие Compression strength	Повышение (более 40 кг/м³) Increasing (higher 40 kg/m³)	Не влияет (до 45 кг/м³) No effect (to 45 kg/m³)	Не влияет (до 30 кг/м³) No effect (to 30 kg/m³)
Прочность на скалывание Shear strength	Не влияет (до 100 кг/м³) No effect (to 100 kg/m³)	Повышение (более 100 кг/м³) Increasing (higher 100 kg/m³)	Не влияет (до 45 кг/м³) No effect (to 45 kg/m³)
Влияние на показатели пожарной опасности материалов Effect on fire properties			
Воспламеняемость Flammability	Умеренно воспламеняемые (более 25 кг/м³) Moderately flammable (higher 25 kg/m³)	Умеренно воспламеняемые (более 40 кг/м³) Moderately flammable (higher 40 kg/m³)	Умеренно воспламеня- емые (более 19 кг/м³) Moderately flammable (higher 19 kg/m³)
Индекс распространения пламени Flame spread index	Не распространяющие (более 25 кг/м³) Do not distribute (higher 25 kg/m³)		Быстро распростра- няющие (до 28 кг/м³) Fast distribute (to 28 kg/m³)
	Медленно распространяющие (более 10 кг/м³) Slowly distribute (higher 10 kg/m³)		
Дымообразующая способность Smoke generation	Д2 (40–75 кг/м³) D2 (40–75 kg/m³)	Д2 (40–75 и более 200 кг/м³) D2 (40–75 and higher 200 kg/m³)	Д2 (более 45 кг/м³) D2 (higher 45 kg/m³)
	Д1 (75–200 кг/м³) D1 (75–200 kg/m³)		Не достигается Not available
* В скобках указан уровень поглощения * In brackets the level of absorption.			

* В скобках указан уровень поглощения

* In brackets the level of absorption.

(рис. 4) обеспечивается перевод древесины в группу медленно распространяющих (табл. 1), а при расходе более 25–30 кг/м³ — в группу не распространяющих пламя по поверхности материалов.

Внешний вид образцов после испытания представлен на рис. 5.

Менее стабильные результаты продемонстрировали образцы древесины сосны, пропитанные составом 3. В данном случае при уровне поглощения 4–6 кг/м³ индекс распространения пламени изменялся от 5,8 до 27,9, в связи с чем данные материалы отнесены к материалам, быстро распространяющим пламя (см. табл. 1).

Что касается снижения дымообразующей способности, определяемой по ГОСТ 12.1.044–89*, все исследуемые составы обладают сравнительно одинаковой эффективностью, обеспечивая перевод древесины в группу Д2 при поглощении, близком к 40 кг/м³ (рис. 6).

Составы 1 и 2 способны обеспечить перевод древесины в группу материалов Д1, однако уровень поглощения (более 75 кг/м³) оказывается фактически

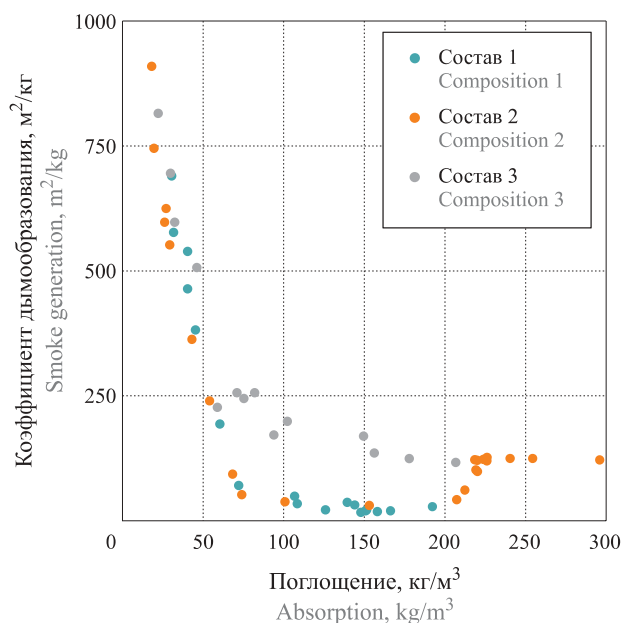


Рис. 6. Результаты испытаний на дымообразующую способность в зависимости от уровня поглощения

Fig. 6. The results of the test to determine smoke generation ability depending on the level of absorption

недостижимым для крупноразмерных образцов и является чрезмерным, поскольку в соответствии с [13] для конструкций классов пожарной опасности К1 и К2 достаточным условием является достижение группы Д2.

На примере состава 2 также интересно отметить, что при уровне поглощения более 200 кг/м³ древесина вновь переходит в группу Д2, что, по всей видимости, можно связать с перенасыщением материала антипиреющими веществами.

Таким образом, по результатам исследований можно выделить контрольные значения, характеризующие влияние уровня поглощения на физико-механические свойства и показатели пожарной опасности (табл. 2).

Выводы

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Применение метода глубокой пропитки деревянных конструкций антипиреющими составами позволяет потенциально обеспечить их перевод в класс конструктивной пожарной опасности К2 и К1 при поглощении от 40 кг/м³.
2. Использование для глубокой пропитки древесного материала составов, реализующих “технический” механизм защиты, нерационально. Ранее было установлено [11], что данные составы обладают низкой проникающей способностью при обработке крупноразмерных деталей из древесины, что не позволит достичь уровня поглощения, необходимого для снижения пожарной опасности защищаемых конструкций.
3. Применение огнезащитных систем на основе неорганических и органических азот-фосфорсодержащих соединений (составы 1 и 2) при их введении

в структуру древесного материала в объеме, достаточном для достижения нормативных значений пожарной опасности конструкций (см. табл. 6 в [13]), не оказывает негативного влияния на физико-механические свойства древесины.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что введение огнебиозащитных составов в структуру древесины наиболее благоприятно влияет на такие показатели пожарной опасности, как воспламеняемость и способность к распространению пламени по поверхности. При этом необходимые уровни поглощения не приводят к ухудшению физико-механических показателей, что свидетельствует о перспективности применения метода глубокой пропитки для снижения пожарной опасности несущих и ограждающих конструкций из древесины, исключающей возможность развития скрытого горения и быстрого развития пожара.

Наиболее сложным вопросом является снижение дымообразующей способности и токсичности продуктов горения, так как для достижения цели необходимо вводить в структуру древесины составы в объеме, превышающем экономически обоснованные уровни. Более того, в данном случае, действительно, может происходить некоторое снижение физико-механических показателей древесины и ее склеиваемости [5]. В то же время избыточная пропитка может эффективно использоваться для декоративных слоев клееных конструкций либо деревянных элементов, не выполняющих несущей функции и применяемых в отделке помещений, в том числе путей эвакуации. В данном случае с учетом, как правило, незначительных размеров деревянных отделочных элементов процесс избыточной пропитки не представляет сложности в технологическом отношении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Russell L. J., Marney D. C. O., Humphrey D. G., Hunt A. C., Dowling V. P., Cookson L. J. Combining fire retardant and preservative systems for timber products in exposed applications — State of the art review / Forest and Wood Products Research and Development Corporation // Manufacturing & Products, Project number: PN04.2007. — 2004. — 35 p.
2. Park H.-J., Wen M.-Y., Kang C.-W., Sun Y.-X. Development of physical pretreatment method for wood fire retardant impregnation // BioResources. — 2017. — Vol. 12, No. 2. — P. 3778–3789. DOI: 10.15376/biores.12.2.3778-3789.
3. Балакин В. М., Полищук Е. Ю. Азот-фосфорсодержащие антипирены для древесины и древесных композиционных материалов (литературный обзор) // Пожаровзрывобезопасность. — 2008. — Т. 17, № 2. — С. 43–51.
4. Полищук Е. Ю., Сивенков А. Б., Бирюков Е. П. Нормативные требования к огнезащите древесины и экспертная оценка ее качества // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2016. — № 2. — С. 77–80.
5. Таубкин С. И. Способы и средства огнезащиты древесины. — М.–Л. : Изд-во Наркомхоза РСФСР, 1944. — 76 с.

6. Сморгачев А. А., Орлов Д. А., Кретова В. М. Исследование влияния огнезащитной пропитки конструкций из древесины на их напряженно-деформированное состояние // Промышленное и гражданское строительство. — 2012. — № 4. — С. 20–21.
7. Ермолина Т. В., Ермолина А. В. Исследование свойств древесины, подвергнутой огнезащитной пропитке // Лесной и химический комплексы — проблемы и решения : материалы Всероссийской научно-практической конференции. — Красноярск : СибГТУ, 2007. — С. 27.
8. Soltani A., Hosseinpourpia R., Adamopoulos S., Taghiyari H. R., Ghaffari E. Effects of heat-treatment and nano-wollastonite impregnation of fire properties of solid wood // BioResources. — 2016. — Vol. 11, No. 4. — P. 8953–8967. DOI: 10.15376/biores.11.4.8953-8967.
9. Ермолин В. Н. Повышение проницаемости древесины хвойных пород жидкостями : дис. ... д-ра техн. наук. — Красноярск, 2001. — 332 с.
10. Стенина Е. И. Технология пропитки древесины мышьяксодержащими антисептиками : дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург, 2009. — 199 с.
11. Нигматуллина Д. М., Стенина Е. И., Полищук Е. Ю., Сивенков А. Б. Антипирирование деревянных конструкций способом глубокой пропитки // Технологии техносферной безопасности : интернет-журнал. — 2016. — № 5(69). — 6 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-5/04-05-16.ttb.pdf> (дата обращения: 06.05.2017).
12. Пат. 2204547 Российская Федерация, МПК C07C 59/105 (2000.01), A62D 1/02 (2000.01), C09K 21/06 (2000.01), C09K 21/14 (2000.01), A62C 2/00 (2000.01), A62C 5/00 (2000.01), A62C 5/027 (2000.01). Интумесцентный коксообразующий антипирен, способ его получения, способ огнезащитной обработки горючего субстрата и способ тушения очага горения / Скибида И. П., Асеева Р. М., Сахаров П. А., Сахаров А. М. — № 2001119199/04; заявл. 12.07.2001; опубл. 20.05.2003, Бюл. № 14.
13. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 03.07.2016). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 06.05.2017).
14. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции (актуализированная ред. СНиП II-25-80). — Введ. 20.05.2011. — М. : ОАО «ЦПП», 2011.

Материал поступил в редакцию 10 мая 2017 г.

Для цитирования: Нигматуллина Д. М., Сивенков А. Б., Полищук Е. Ю., Стенина Е. И., Балакин В. М. Физико-механические и пожароопасные свойства древесины с глубокой пропиткой огнебиозащитными составами // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 6. — С. 43–51. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.43-51.

English

PHYSICAL, MECHANICAL AND FIRE PROPERTIES OF WOOD DEEP IMPREGNATED BY FLAME AND BIORETARDANTS

NIGMATULLINA D. M., Graduate Student, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: Dinaraond81@mail.ru)

SIVENKOV A. B., Doctor of Technical Sciences, Docent, Scientific Secretary, Professor of Fire Safety in Construction the Educational Research Center of Fire Safety in Construction, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: sivenkov01@mail.ru)

POLISHCHUK E. Yu., Candidate of Technical Sciences, Doctoral Candidate, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: epyur@ya.ru)

STENINA E. I., Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Innovative Technologies and Equipment for Woodworking Department, Institute of Timber Processing Business and Road Construction, Ural State Forest Engineering University (Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: sten_elena@mail.ru)

BALAKIN V. M., Candidate of Chemical Sciences, Docent, Professor of Technology of Pulp and Paper Industries and Polymer Processing Department, Ural State Forest Engineering University (Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: balakin_v.m@mail.ru)

ABSTRACT

This paper presents the results of research of influence on physical, mechanical and fire properties of wood to its impregnation with the use of three fire and bio protective systems:

1. The system is based on the solution of inorganic nitrogen — phosphorus-containing compounds (composition 1).

2. The system is based on organic nitrogen-phosphorus-containing compounds, which was used as the commercially available fire and bio protective composition Ammofon-1 (composition 2);

3. The system is based on organic film-forming intumescent substances, which was used as a product of oxidation of plant polysaccharides (composition 3).

The obtained results demonstrate that the introduction of the fire and bio protective compounds in the wood structure is the most positive effect on such indicators of fire hazard such as flammability and ability to spread flame over the surface. At the same time, the levels of absorption (from 25–30 kg/m³) do not lead to deterioration of physical and mechanical properties that says about the prospects of using the method of deep impregnation to reduce the fire hazard of bearing and enclosing structures made of wood, eliminating the possibility of the development of latent combustion and rapid development of the fire.

The most difficult issue is the reduction of smoke generation ability and toxicity of combustion products, to reduce which it is necessary to enter in the structure of the wood compounds in excess of commercially reasonable levels (more than 40 kg/m³). Moreover, in this case may indeed be some degradation of physical and mechanical properties of wood and its adhesion properties. At the same time, the excess impregnation can effectively be used for decorative layers of glued structures, or when using wooden elements (do not perform structure functions) in the decoration of the premises, including emergency exits. In this case, given the generally small size wooden finishing elements, the excess impregnation does not pose any technological difficulties.

The results of the work determined control values, characterizing the influence of absorption level on the physical, mechanical and fire properties of wood (see Table).

Classification of material on strength characteristics and fire hazard depending on the magnitude of the absorption of flame retardants

Property	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3
Effect on mechanical properties			
Bending strength	No effect (to 80 kg/m ³)*	Reduce (higher 30–40 kg/m ³)	No effect (to 15 kg/m ³)
Compression strength	Increasing (higher 40 kg/m ³)	No effect (to 45 kg/m ³)	No effect (to 30 kg/m ³)
Shear strength	No effect (to 100 kg/m ³)	Increasing (higher 100 kg/m ³)	No effect (to 45 kg/m ³)
Effect on fire properties			
Flammability	Moderately flammable (higher 25 kg/m ³)	Moderately flammable (higher 40 kg/m ³)	Moderately flammable (higher 19 kg/m ³)
Flame spread index	Do not distribute (higher 25 kg/m ³)		Fast distribute (to 28 kg/m ³)
	Slowly distribute (higher 10 kg/m ³)		
Smoke generation	D2 (40–75 kg/m ³)	D2 (40–75 kg/m ³ and higher 200 kg/m ³)	D2 (higher 45 kg/m ³)
	D1 (75–200 kg)		Not available
* In brackets the level of absorption.			

Keywords: wood; timber construction; strength; fire hazard; fire retardants; impregnation.

REFERENCES

1. Russell L. J., Marney D. C. O., Humphrey D. G., Hunt A. C., Dowling V. P., Cookson L. J. Combining fire retardant and preservative systems for timber products in exposed applications — State of the art review. Forest and Wood Products Research and Development Corporation. *Manufacturing & Products, Project number: PN04.2007*, 2004. 35 p.
2. Park H.-J., Wen M.-Y., Kang C.-W., Sun Y.-X. Development of physical pretreatment method for wood fire retardant impregnation. *BioResources*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 3778–3789. DOI: 10.15376/biores.12.2.3778-3789.
3. Balakin V. M., Polishchuk E. Yu. Nitrogen-phosphorus-containing flame retardants for wood and wood composite materials (literary review). *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2008, vol. 17, no. 2, pp. 43–51 (in Russian).
4. Polishchuk E. Yu., Sivenkov A. B., Birukov E. P. Regulatory requirements to wood protection from fires and its quality expert assessment. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya / Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2016, no. 2, pp. 77–80 (in Russian).
5. Taubkin S. I. *Sposoby i sredstva ognезashchity drevesiny* [The ways and means of fire protection of wood]. Moscow–Leningrad, Izdatelstvo Narkomkhoza RSFSR, 1944. 76 p. (in Russian).
6. Smorchkov A. A., Orlov D. A., Kretova V. M. Research of influence of fireproof impregnation of timber structures on their stressed-strained state. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo / Industrial and Civil Engineering*, 2012, no. 4, pp. 20–21 (in Russian).
7. Ermolina T. V., Ermolina A. V. The study of the properties of wood subjected to fire-resistant impregnation. In: *Lesnoy i khimicheskiy kompleksey — problemy i resheniya: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Forest and chemical complexes — problems and solutions. Proceedings of All-Russian Research and Practice Conference]. Krasnoyarsk, Siberian State Technological University Publ., 2007. 27 p. (in Russian).
8. Soltani A., Hosseinpourpia R., Adamopoulos S., Taghiyari H. R., Ghaffari E. Effects of heat-treatment and nano-wollastonite impregnation of fire properties of solid wood. *BioResources*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 8953–8967. DOI: 10.15376/biores.11.4.8953-8967.
9. Ermolin V. N. *Increased permeability of softwood liquids*. Dr. tech. sci. diss. Krasnoyarsk, 2001. 332 p. (in Russian).
10. Stenina E. I. *Technology impregnation wood preservatives arsenic*. Cand. tech. sci. diss. Yekaterinburg, 2009. 199 p. (in Russian).
11. Nigmatullina D. M., Stenina E. I., Polishchuk E. Yu., Sivenkov A. B. Wooden structures fire hardening by the method of deep impregnation. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet-zhurnal / Technology of Technosphere Safety. Internet-Journal*, 2016, issue 5(69). 6 p. (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-5/04-05-16.ttb.pdf> (Accessed 6 May 2017).
12. Skibida I. P., Aseeva R. M., Sakharov P. A., Sakharov A. M. *Intumescent fire retardant foaming coke forming, method of its obtaining, method of fire-retardant treatment of combustible substrate and method of extinguishing the fire burning*. Patent RU, no. 2204547, publ. date 20.05.2003 (in Russian).
13. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22.07.2008 No. 123 (ed. 03.07.2016) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 6 May 2017).
14. *Set of rules 64.13330.2011. Timber structures*. Moscow, Center of Design Production in Construction Publ., 2011 (in Russian).

For citation: Nigmatullina D. M., Sivenkov A. B., Polishchuk E. Yu., Stenina E. I., Balakin V. M. Physical, mechanical and fire properties of wood deep impregnated by flame and bioretardants. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 43–51 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.43-51.

А. Л. ДУШКИН, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, старший научный сотрудник, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)

С. Е. ЛОВЧИНСКИЙ, инженер, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4; e-mail: Lovchinskiy@inbox.ru)

Н. Н. РЯЗАНЦЕВ, старший научный сотрудник, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4; e-mail: n-r-60@mail.ru)

УДК 614.841

ЭКРАНИРОВАНИЕ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОЖАРА

Освещены результаты теоретического и экспериментального исследования экранирующих свойств капельного потока тонкораспыленной воды, применяемого для защиты объекта от теплового излучения на пожаре. Показано, что эффективность защиты противопожарной завесой в меньшей степени зависит от температуры очага пожара, а в большей — от диаметра водяных капель и расхода воды. Показано также, что относительно эффективная и экономичная по расходу воды завеса создается при диаметре генерируемых капель менее 200 мкм, а при размере более 500 мкм инфракрасное излучение пожара экранируется менее чем на 25 %. Экспериментальными исследованиями установлено, что увеличение коэффициента затенения инфракрасного излучения связано с повышением объемной концентрации капель (расход завесы), с уменьшением среднего медианного диаметра (дисперсности потока капель).

Ключевые слова: тепловое излучение; экранирование; тонкораспыленная вода; пожар; водяная завеса.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.52-59

Введение

Распыленная вода различной степени дисперсности находит широкое применение в качестве агента пожаротушения. В связи с этим возникают вопросы, связанные с экранирующими свойствами капель при противопожарной защите различных технологических объектов от теплового излучения. Использование дренчерных водяных завес как средства для предотвращения распространения пожара становится все более актуальным [1]. Противопожарная функция водяной завесы совмещает различные защитные функции, снижая действие опасных факторов пожара (ОФП) на людей и материальные ценности (ослабление лучистого и конвективного тепловых потоков, осаждение дыма и вредных продуктов горения, охлаждение воздуха и твердых поверхностей). Применение завес предусматривается ст. 37 “Технического регламента о требованиях пожарной безопасности” (Федеральный закон от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ).

При достаточном нормативном обосновании функционирования водяных завес весьма скудны в информационном плане документы, регламентиру-

ющие их применение [2]. Нормативные документы трактуют водяную завесу как поток воды или ее растворов, препятствующий распространению через него пожара и/или способствующий предупреждению прогрева технологического оборудования до предельно допустимых температур. Водяные завесы выполняют функции охлаждения и предотвращения распространения пожара и его опасных факторов через оконные, дверные и технологические проемы, за пределы защищаемого оборудования, зоны или помещений, а также обеспечения безопасных условий для эвакуации людей из горящих помещений.

Обзор научных публикаций по теме водяных завес и источников их создания по России показал недостаточную изученность этого вопроса [3]. Создание методов и расчетных методик определения экранирующих свойств водяных завес достаточно интенсивно в последнее время происходит за рубежом [4–11].

При прохождении теплового излучения через различные преграды происходит его поглощение и рассеяние, что приводит, как правило, к снижению

его мощности. Энергия инфракрасных лучей при этом преобразуется в другие формы энергии, чаще всего в тепловую. Чистый и сухой воздух практически не поглощает тепловых лучей. При наличии в воздухе многоатомных газов (например, углекислого газа), как правило генерируемых в ходе окислительно-восстановительных реакций процесса горения, происходит уменьшение прозрачности газовой среды. Наличие в воздухе паров и капель воды селективно увеличивает степень поглощения и уменьшает пропускание в пределах длин волн 2,24...3,27, 4,8...8,7 и 12...25 мкм. С уменьшением длины волны рассеяние излучения увеличивается, так как оно обратно пропорционально четвертой степени длины волны. Оптические свойства воды (прозрачность, коэффициенты преломления и отражения) позволяют использовать ее для экранирования инфракрасного излучения. Водяные завесы применяются при интенсивности излучения 350...1400 Вт/м². Воду используют в качестве теплозащитного фильтра, так как ее пленка толщиной несколько сантиметров непрозрачна для инфракрасного потока с длинами волн более 1 мкм.

Цели и задачи

Из анализа публикаций можно увидеть, что эффективность защиты противопожарной завесы в меньшей степени зависит от температуры очага пожара, а в большей — от диаметра водяных капель и расхода воды. Относительно эффективная и экономичная по расходу воды в случае однократного рассеяния завеса создается при диаметре генерируемых капель менее 200 мкм. При размере капель более 500 мкм инфракрасное излучение пожара экранируется менее чем на 25 %. Цель экспериментального исследования заключается в определении возможности более высокой степени экранирования лучистых потоков тонкораспыленной водой — до 80 % (пропускание 20 %) в условиях многократного рассеяния и в нахождении зависимости степени ослабления их мощности от параметров капельного потока.

При расчете устройств генерирования водяных завес, как правило, учитываются геометрические размеры защищаемых объектов, их пространственное расположение, суммарный и удельный расход воды и погонная интенсивность орошения. При этом не учитываются параметры завес, определяющие их защитные свойства, такие как коэффициент экранирования, диаметр капель и их концентрация. На основании имеющихся данных лишь весьма условно можно выбрать тип оросителей, их количество и пространственное расположение, геометрические размеры трубопроводов и давление подачи воды. Кроме того, техническая документация на

оросители не содержит параметров генерируемого капельного потока, определяющего параметры создаваемых ими завес.

В связи с вышесказанным для определения экранирующих свойств капельных потоков возникает задача установления взаимосвязи их параметров (диаметров и концентрации капель в потоке) со степенью ослабления мощности лучистых потоков, а также уточнения коэффициента экстинкции.

Теория и расчеты

В среде, рассеивающей излучение, пропускание его на длине пути x соответствует закону Бугера – Ламберта – Бера, полученному для однократного рассеяния ($I/I_0 \approx 0,6...0,7$):

$$I/I_0 = e^{-\pi n k r^2 x}, \quad (1)$$

где I — интенсивность излучения, прошедшего путь x ;
 I_0 — интенсивность излучения источника;
 n — счетная концентрация капель в единице объема;
 k — эффективный коэффициент экстинкции или экранирования излучения за счет рассеяния и поглощения его каплями;
 r — радиус капель.

Коэффициент рассеяния складывается из эффектов отражения, преломления и дифракции и в сумме равен 2. При этом при больших по сравнению с длиной волны излучения λ каплях коэффициент дифракции равен единице. Однако дифрагированный свет сосредоточен в конусе с половиной угла раствора, равного $\theta = 10\lambda/(2\pi r)$. Так, при $r = 30$ мкм и $\lambda = 2$ мкм (длина волны излучения очага возгорания) значение θ составляет 6°, поэтому для таких частиц в реальных условиях дифрагированный свет частично или полностью попадает на окружающие предметы за капельным экраном. Тогда коэффициент рассеяния может быть принят равным 1, как в работе [4].

При многократном рассеянии оно происходит по всем направлениям, а степень экранирования возрастает вплоть до полного интерференциального гашения, что и наблюдается в зоне тумана большой протяженности [12]. Отметим, что даже при сильном дожде этого гашения не происходит. Приведенные наблюдения однозначно говорят о сильном влиянии размера капель на явление рассеяния излучения. В тумане радиусы капель лежат в диапазоне 0,5...80 мкм, а минимальный радиус капель дождя составляет 250 мкм [12]. Однократность рассеяния для тонкораспыленной воды при радиусе капель $r = 20$ мкм и их счетной концентрации $n = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ возможна на длине в несколько сантиметров.

Закон Бугера – Ламберта – Бера (1) записан для монодисперсной капельной среды. Для полидисперс-

ного потока этот закон можно записать с использованием заутеровского диаметра d_{32} и объемной доли капель c_V :

$$d_{32} = \frac{\sum d_i^3 n_i}{\sum d_i^2 n_i}; \quad c_V = \frac{4}{3} \pi r_i^3 n_i, \quad (2)$$

где $r_i = d_i/2$.

После алгебраических преобразований окончательно получим для полидисперсной среды в условиях многократного рассеяния:

$$\frac{I}{I_0} = \exp - \frac{1,5 c_V x k}{d_{32}}. \quad (3)$$

Реальный капельный поток из распылителя имеет коническую форму с различным объемом, занятым каплями. По этой причине объемная доля частиц c_V на длине луча излучения, перпендикулярного оси факела, будет изменяться от сечения к сечению. Очевидно, количество капель N на пути луча, например, цилиндрической симметрии будет оставаться неизменным, несмотря на то что длина пути в капельном объеме (длина цилиндра) будет меняться (увеличиваться). Однако дополнительного притока капель в область рассеяния при этом происходить не будет, а количество капель может только несколько уменьшиться за счет уноса с граничной поверхности при турбулентном взаимодействии с окружающим воздухом. Можно считать, что размер капель существенно не изменится за счет коагуляции и дробления. К тому же заутеровский диаметр полидисперсного потока мало чувствителен к таким изменениям. Суммируя все вышесказанное, естественно предположить, что $c_V x \approx \text{const}$. Это положение позволяет при инструментальном измерении капельного потока на начальном расстоянии $L = 0,2 \dots 0,3$ м от среза сопла распылителя знать необходимые параметры c_V , d_{32} на участке завесы при фиксированной длине луча, равной диаметру (хорде) факела распыления.

Дисперсный капельный поток существует до объемной доли жидкости $c_V < 0,1$, а при превышении ее поток жидкости преобразуется в пузырьковый или эмульсионный. В рассмотрении задачи экранирования существенную роль играет средний заутеровский диаметр d_{32} , и в первую очередь при многократном рассеянии, как будет показано в дальнейшем. Поглощение молекулами воды излучения сплошного спектра, которое характерно для очагов горения, с учетом излучения с нагретых поверхностей различных материалов носит селективный характер в узких областях длин волн излучения (1,4...1,9; 1,9...2,7; 2,7...4,3; 4,3...5,9 мкм). В результате большинства процессов горения образуются углекислый газ и пары воды. При температуре пламени 1000 °C максимальному излучению непосредственно пламени соответствует полоса 4,38 мкм, а при температу-

ре 600 °C — полоса 4,34 мкм [12]. Спектры многих различных пламен мало различаются: для всех характерна сильная полоса излучения $\lambda = 4 \dots 6$ мкм (углекислый газ) и более слабая полоса $\lambda < 3$ мкм (водяной пар и углекислый газ). Соответственно, эффект поглощения из-за селективности вносит небольшой вклад (10...15 %) в суммарный эффект экранирования распыленной водой. По этой причине при практическом использовании экранирования капельным ансамблем можно игнорировать конкретное селективное поглощение, так как спектр пожара наперед неизвестен. Использование мелких капель с $d_{32} < 100$ мкм сопряжено с некоторыми особенностями течения такого потока. Это относится также к выходному соплу распылителя, диаметр которого сильно влияет на размер образующихся капель: чем меньше диаметр сопла, тем меньше средний заутеровский диаметр капель в факеле распыла [13]. Кроме того, прослеживается сильная зависимость диаметра капель от выходной скорости жидкости из сопла распылителя, которая при взаимодействии с окружающим воздухом преобразуется в капельный поток; при этом чем больше выходная скорость жидкости, тем меньше размер капель. Преобразование в капли конечного диаметра может происходить в несколько этапов с последовательным уменьшением их диаметра при дроблении. Выходная скорость жидкости по уравнению Бернулли зависит от давления подачи, поэтому при генерировании мелкодисперсной завесы-экрана требуется, как правило, повышенное давление подачи $\Delta P > 1,0$ МПа. Необходимо отметить динамическую особенность тонкораспыленного потока воды, заключающуюся в экспоненциальном падении скорости V капель размером до 100 мкм [14]:

$$V = V_0 e^{-t/\tau}, \quad (4)$$

где τ — постоянная времени для частиц с $R_e \leq 1$;

$$\tau = \frac{1}{18} \frac{\rho_p}{\rho_r \nu_r} d^2;$$

ρ_p, ρ_r — плотность соответственно капель и воздуха;

ν_r — коэффициент кинематической вязкости воздуха;

$$R_e = V_0 d / \nu_r;$$

V_0 — начальная скорость капель.

Например, для капель диаметром $d = 50$ мкм $\tau = 7,34 \cdot 10^{-3}$ с. Стационарная скорость осаждения мелких капель V_s не превосходит нескольких сантиметров в секунду в соответствии с выражением

$$V_s = g\tau, \quad (5)$$

где g — ускорение свободного падения; $g = 9,81$ м/с².

Путь, проходимый каплей от сопла до расстояния, определенного только начальной скоростью V_0

(без учета силы тяжести), составляет до десятка сантиметров и может быть найден по интегральному выражению

$$L = \int_0^{\infty} V_0 e^{-t/\tau} dt = V_0 \tau. \quad (6)$$

Так, для капель, имеющих диаметр $d = 50$ мкм и начальную скорость $V_0 = 100$ м/с, $L = 0,73$ м.

Таким образом, на стабилизированном участке капельного экрана скорость капель близка к скорости осаждения V_s . Это обстоятельство позволяет оценить объемную концентрацию капель c_V , если из характеристик распылителя известна интенсивность орошения q (объемный расход на единицу площади орошения). Объемная концентрация капель при высоте подвеса распылителя $H > L$ определяется по выражению

$$c_V = q/V_s. \quad (7)$$

Результатом такого расчета может быть величина только первого приближения, так как для реального полидисперсного потока с каплями разных размеров значения параметров q_i и V_{si} различны, а интегральные значения, отнесенные к среднему диаметру d_{32} , только приблизительно отражают действительную ситуацию. Характерно в этом отношении определение объемной концентрации частиц c_V оптическими методами по пропусканию I , вычисляемому из формулы (3), при известном из дифракционной картины малоуглового рассеяния Фраунгофера диаметре d_{32} . Однако даже без оптических измерений можно оценить концентрацию c_V в соответствии с выражениями (3) и (7), если d_{32} определять по известным критериальным или иным зависимостям.

Методы исследования

Экспериментальные исследования способности тонкораспыленного потока экранировать тепловое излучение проводились в два этапа:

- на первом этапе определялись средний зауровневый размер d_{32} капельного потока и его концентрация c_V , а также произведение объемной концентрации на длину $c_V x$ (аналог слоя осажденной воды), где x — путь длины измерения в приборе (для Malvern Insittec System равен 12 мм), перпендикулярный оси потока капель (постоянная величина). При этом согласно ISO 1332 использовался измерительный комплекс Malvern Insittec System RTS 5424 (STR 5649), который проводит измерения на одной длине волны $\lambda = 0,67$ мкм;
- на втором этапе измерения проводились на установке с использованием неселективного источника теплового инфракрасного (ИК) излучения со степенью черноты не менее 0,77.

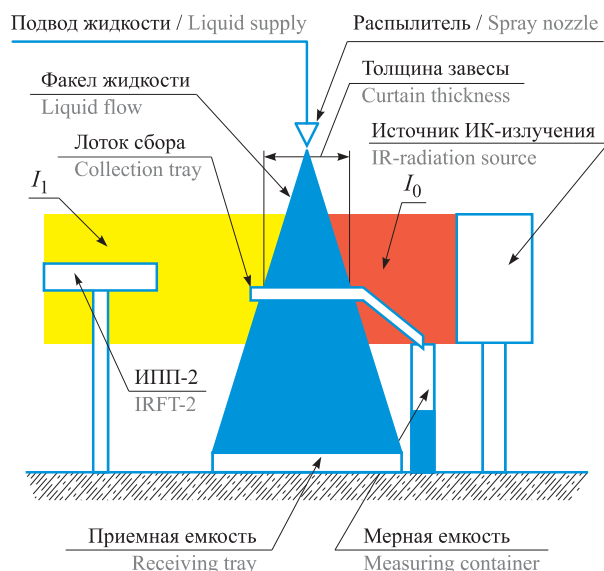


Рис. 1. Установка для определения свойств экранирующих завес

Fig. 1. Screening curtain feature determination set

Для определения способности водяных капельных потоков поглощать ИК-излучение была создана установка с измерителем плотности потока ИК-излучения, представленная на рис. 1.

Установка включает в себя источник излучения — спиральную электропанель с нихромовой проволокой и приемник ИК-излучения — измеритель плотности потока ИПП-2, расположенный на расстоянии 1,5...2,0 м от излучающей поверхности панели. ИПП-2 измеряет интенсивность ИК-излучения через воздушный зазор. В экспериментальном исследовании между приемником и источником излучения устанавливается распылитель — источник водяных капель экранирующей завесы. Факел распыленного потока воды направляется в приемную емкость для отвода в ливневую канализацию. На уровне оптической оси ИПП-2 устанавливается лоток для сбора воды для замера интенсивности капельного потока. Собранная за определенный период времени t вода из лотка направляется в мерную емкость. Интенсивность подачи q в экспериментах определяется по формуле

$$q = Q/(tF) = c_V V, \quad (8)$$

где Q — объем воды, собранной в мерную емкость за время t ;

F — площадь приемного торца лотка; $F = hl$;

h — ширина лотка; в эксперименте $h = 0,03$ м;

l — ширина завесы в месте оптической оси ИПП-2, определяемая с помощью линейки в процессе работы распылителя.

Интенсивность орошения пропорциональна объемной концентрации капель и меняется только

с шириной завесы (длиной пути) x , которая зависит в свою очередь от скорости при постоянном расходе.

Коэффициент ослабления ИК-излучения j при пропускании между источником и приемником излучения водяной завесы с различной интенсивностью и разными размерами капель факела распыла определялся по формуле

$$j = I_1/I_0, \quad (9)$$

где I_1 — интенсивность ИК-излучения, ослабленная водяной завесой.

Для замера размера капель согласно ISO 1332 в процессе экспериментального исследования использовался измерительный комплекс Malvern Insittec System RTS 5424 (STR 5649). Приборные системы Malvern/INSITEC “Концентрация и размер частиц ансамбля” (EPCS) измеряют распределения размеров частиц через рассеянный свет, а также начальную концентрацию капель c_V для монохроматического излучения $\lambda = 0,67$ мкм.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 и в таблице приведены результаты экспериментального исследования по ослаблению лучистых потоков водяными тонкодисперсными завесами, созданными с помощью различных распылителей.

На графике рис. 2 приведено пропускание монохроматического излучения $S = I/I_0$ на длине волны $\lambda = 0,67$ мкм (прямая линия), измеренное оптиче-

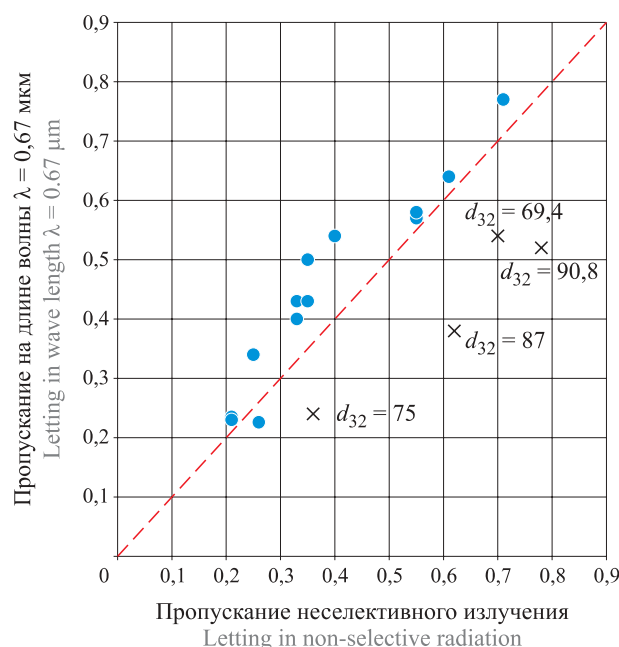


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных по пропусканию на длине волны $\lambda = 0,67$ мкм и неселективному излучению

Fig. 2. Experimental data agreement for letting in by wave length $\lambda = 0.67 \mu\text{m}$ and for non-selective radiation

ским комплексом Malvern Insittec System и соответствующее закону (3) при $k = 2$, а также пропускание $j = I/I_0$ неселективного теплового излучения, определенное на установке (экспериментальные точки) в предположении $c_V x \approx \text{const}$. Во всех измерениях слой осажденной воды $c_V x$ считался постоянным для конкретного капельного потока. Как видно из представленных экспериментальных данных, монохроматическое излучение на длине $\lambda = 0,67$ мкм экранируется хуже, чем излучение нихромовой панели, что объясняется отсутствием поглощения молекулами воды излучения при $\lambda = 0,67$ мкм вплоть до толщин $c_V x = 10^{-3}$ м и поглощением ИК-излучения при длине волны $\lambda > 1,5$ мкм. При этом превышение экранирования ИК-излучения за счет поглощения не превышает в среднем 15 %.

Результаты экспериментального исследования
Experimental investigation results

d_{32} , мкм d_{32} , μm	S	$c_V x \cdot 10^6$, м $c_V x \cdot 10^6$, m	x , м x , m	$d_{1,0}$, мкм $d_{1,0}$, μm	q , q , $\text{м/с} \cdot 10^3$ $\text{m/s} \cdot 10^3$	j
58,6	0,235	27	0,8	17,9	0,125	0,21
62,9	0,23	30	0,4	18,5	0,317	0,21
56,9	0,226	27,6	0,35	15,5	0,178	0,26
54,4	0,64	7,69	0,65	15,3	0,06	0,61
58,6	0,57	10,7	0,65	22,3	0,068	0,55
46,7	0,43	12,3	0,65	12,1	0,096	0,33
45,7	0,4	13,6	0,55	14,3	0,139	0,33
40,9	0,34	14,06	0,5	8,8	0,189	0,25
69,4	0,77	5,62	0,5	33,7	0,033	0,71
55,1	0,58	6,51	0,8	23,3	0,033	0,55
49,6	0,54	9,9	0,65	15,8	0,063	0,4
44,5	0,5	10	0,6	14,1	0,1	0,35
36,2	0,43	9,7	0,5	8	0,13	0,35

Примечание. d_{32} — средний объемно-поверхностный диаметр капель, который является среднеповерхностной величиной (зауэровский средний диаметр); $d_{1,0}$ — средний арифметический диаметр капель; $d_{1,0} = \sum d_i n_i / \sum n_i$ (при нормально логарифмическом законе распределения размеров (Колмогорова) после соответствующих преобразований: $\ln d_{1,0} = 3 \ln d_{32} - 2 \ln d_{43}$); j — пропускание неселективного излучения на расстоянии $L = 0,5$ м от среза форсунки; S — пропускание на длине волны $\lambda = 0,67$ мкм на расстоянии $L = 0,2$ м от среза форсунки.

Note. d_{32} — mean volumetric-surface droplet diameter, which is a mean-surface value (Zaüter mean diameter); $d_{1,0}$ — arithmetic mean droplet diameter; $d_{1,0} = \sum d_i n_i / \sum n_i$ (under normal logarithm size distribution law (Kolmogorov) after corresponding transformations: $\ln d_{1,0} = 3 \ln d_{32} - 2 \ln d_{43}$); j — letting in non-selective radiation at the distance $L = 0.5$ m from nozzle edge; S — letting in at wave length $\lambda = 0.67 \mu\text{m}$ at the distance $L = 0.2$ m from nozzle edge.

Кроме того, на графике нанесены результаты измерения интенсивности ослабления более крупными каплями (кресты) диаметром $d_{32} = 69,4; 75,8; 87,9; 90,8$ мкм. Как видно из него, в случае крупных капель ослабление излучения значительно меньше, что свидетельствует о неприменимости закона (3) при $k = 2$.

Сильное экранирование можно объяснить только многократностью рассеяния, при этом коэффициент экстинкции $k = 2,3$ (средняя величина). Столь эффективное экранирование (значительно более высокое, чем для слоя осажденной воды не более $30 \cdot 10^{-6}$ м) даже для сильно поглощающих длин волн позволяет рекомендовать применение водокапельных экранов с диаметром капель $d_{32} = 69 \dots 36$ мкм ($d_{10} = 23 \dots 8$ мкм).

Заключение

Экспериментально выявлена применимость закона Бугера – Ламберта – Бера для полидисперсных потоков капель при экранировании неселективного источника ИК-излучения в условиях многократного рассеяния. При этом средний коэффициент экстинкции равен 2,3, что объясняется поглощением в отдельных областях излучения от нагретого до 1000 К источника.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что увеличение коэффициента затенения инфракрасного излучения тонкораспы-

ленной водой одновременно связано с повышением объемной концентрации капель (расход завесы) $c_{VX} \geq 27 \cdot 10^{-6}$ м (толщина пленки осажденной воды 27 мкм), с уменьшением среднего заутеровского диаметра (дисперсности потока капель) до значения не выше $d_{32} = 50 \dots 60$ мкм. Столь высокое экранирование лучистых потоков тонкораспыленной водой — до 80 % начального излучения позволяет использовать ее в целях:

1) защиты от зажигания лучистыми потоками ценных предметов, например картин, выставочных витрин, ценной мебели, сейфов и т. д., при пожаре в окружающем помещении, причем тонкодисперсный водяной экран не только экранирует излучение, но и понижает температуру в месте защиты, тем самым локально подавляя возгорание;

2) экранирования технологических линий производства легковоспламеняющихся или взрывоопасных веществ, например серы;

3) экранирования электротехнического и компьютерного оборудования при сигнале соответствующих извещателей и датчиков.

Водяное экранирование наиболее мобильно по сравнению с противопожарными перегородками. Экраны не загромождают проходов и путей эвакуации. Для больших по высоте объектов может быть с успехом реализована многоярусная конструкция экранов, когда трубопроводы с распылителями расположены один над другим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаров С., Зархин А., Митрофанова М. Дренчерные завесы: теория и практика // Безопасность. Достоверность. Информация. — 2006. — № 5(68). — С. 24–28. URL: <http://mx1.algoritm.org/arch/?id=22@a=547> (дата обращения: 10.04.2017).
2. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : приказ МЧС РФ от 25.03.2009 № 175; введ. 01.05.2009. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
3. Бородин А. Н., Леончук П. А., Лицкевич В. В., Шамонин В. Г. Проблемы численного моделирования водяных завес, создаваемых оросителями : обзор публикаций // Пожарная безопасность. — 2009. — № 4. — С. 92–105.
4. Виноградов А. Г. Экранирование теплового излучения полидисперсными водяными завесами // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 6. — С. 74–84.
5. Först M., Möller K. Enhanced absorption of fire induced heat radiation in liquid droplets // Fire Safety Journal. — 2013. — Vol. 55. — P. 182–196. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.10.005.
6. Monod B., Collin A., Parent G., Boulet P. Infrared radiative properties of vegetation involved in forest fires // Fire Safety Journal. — 2009. — Vol. 44, Issue 1. — P. 88–95. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.03.009.
7. Zhu Pei, Wang Xishi, Wang Zhigang, Cong Haiyong, Ni Xiaomin. Experimental and numerical study on attenuation of thermal radiation from large-scale pool fires by water mist curtain // Journal of Fire Sciences. — 2015. — Vol. 33, Issue 4. — P. 269–289. DOI: 10.1177/0734904115585796.
8. Dombrovsky L. A., Dembele S., Wen J. X. Shielding of fire radiation with the use of multi-layered water mist curtains: preliminary estimates // Computational Thermal Sciences: An International Journal. — 2016. — Vol. 8, Issue 4. — P. 371–380. DOI: 10.1615/ComputThermalScien.2016017601.
9. Turco M., Lhotsky P., Hadjisophocleous G. Investigation into the use of a water curtain over openings to prevent fire spread // MATEC Web of Conferences. — 2016. — Vol. 46. — Article No. 04001. — 11 p. DOI: 10.1051/matecconf/20164604001.

10. Collin A., Lechene S., Boulet P., Parent G. Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield // Numerical Heat Transfer. Part A: Applications. — 2010. — Vol. 57, Issue 8. — P. 537–553. DOI: 10.1080/10407781003744722.
11. Benbrik A., Cherifi M., Meftah S., Khelifi M. S., Sahnoune K. Contribution to fire protection of the LNG storage tank using water curtain // International Journal of Thermal and Environmental Engineering. — 2010. — Vol. 2, No. 2. — P. 91–98. DOI: 10.5383/ijtee.02.02.005.
12. Хадсон Р. Инфракрасные системы / Пер. с англ. — М. : Мир, 1972. — 534 с.
13. Чохонелидзе А. Н., Галустов В. С., Холманов Л. П., Приходько В. П. Справочник по распыливающим, оросительным и каплеулавливающим устройствам. — М. : Энергоатомиздат, 2002. — 608 с.
14. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. — М. : Наука, 1981. — 174 с.

Материал поступил в редакцию 18 апреля 2017 г.

Для цитирования: Душкин А. Л., Ловчинский С. Е., Рязанцев Н. Н. Экранирование тонкораспыленной водой излучения от пожара // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 6. — С. 52–59. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.52-59.

English

FINELY-DISPERSED WATER FIRE RADIATION SCREENING

DUSHKIN A. L., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Senior Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye Shosse, 4, Moscow, 125993, Russian Federation)

LOVCHINSKIY S. E., Engineer, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye Shosse, 4, Moscow, 125993, Russian Federation; e-mail: Lovchinskiy@inbox.ru)

RYAZANTSEV N. N., Senior Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye Shosse, 4, Moscow, 125993, Russian Federation; e-mail: n-r-60@mail.ru)

ABSTRACT

The theoretical and experimental study results of finely-dispersed water droplet flow features screening fire heat radiation are shown. Water curtains offer cooling and fire with its danger factor spread prevention (OFP) through window, door and technological openings, outside protected equipment, area or rooms, as well as safe people escape provision from rooms on fire. In designing water curtain generation devices, as a rule, there aren't taken into account curtain parameters defining their protection features, such as screening factor, droplet diameter and their concentration. Fire protection curtain efficiency depends to a lesser extent on fire temperature but to a greater extent it depends on water droplet diameter and water flow rate. A relatively efficient and water flow-rate-effective curtain can be designed with sprayer generated droplets of less than 200 μm diameter. With droplet size of more than 500 μm the infra-red fire radiation is screened by less than 25 %. Single-fold dispersion for finely-dispersed water with $r = 20 \mu\text{m}$ droplet radius and $n = 10^{10} \text{ m}^{-3}$ droplet calculated concentration is possible in a few centimetre length. In considering screening curtain features the average Zauter diameter d_{32} plays an essential role, particularly it refers to a multiple dispersion that considerably (by 4...5 fold) decreases radiation falling onto the screen. Fine droplets usage $d_{32} < 100 \mu\text{m}$ in diameter is connected with certain features of that flow. This also relates to an output sprayer nozzle, the diameter of which greatly effects the size of generated droplets: the less the nozzle diameter, the less average Zauter diameter of the droplets in the spray cone. A great droplet diameter dependence follows from output sprayer nozzle liquid velocity value that turns into a droplet flow while interacting with the ambient air, thereby the greater an output liquid velocity, the smaller the droplets. The experimental data analysis shows that infra-red radiation shade coefficient increase is connected with volumetric droplet concentration (curtain flow rate), and average median diameter decrease (droplet flow dispersion).

Keywords: heat radiation; screening; finely-dispersed water; fire; water curtain.

REFERENCES

1. Zharov S., Zarkhin A., Mitrofanova M. Drencher curtains: theory and practice. *Bezopasnost. Dostovernost. Informatsiya / Security. Reliability. Information*, 2006, no. 5(68), pp. 24–28 (in Russian). Available at: <http://mx1.algortm.org/arch/?id=22@a=547> (Assessed 10 April 2017).
2. *Set of rules 5.13130.2009. Systems of fire protection. Automatic fire-extinguishing and alarm systems. Designing and regulations rules*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2009 (in Russian).
3. Borodkin A. N., Leonchuk P. A., Lickevich V. V., Shamonin V. G. Problems of numerical modeling of water spray curtains produced by sprinklers: the publication review. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2009, no. 4, pp. 92–105 (in Russian).
4. Vinogradov A. G. Heat radiation shielding by the polydisperse water curtains. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 74–84 (in Russian).
5. Försth M., Möller K. Enhanced absorption of fire induced heat radiation in liquid droplets. *Fire Safety Journal*, 2013, vol. 55, pp. 182–196. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.10.005.
6. Monod B., Collin A., Parent G., Boulet P. Infrared radiative properties of vegetation involved in forest fires. *Fire Safety Journal*, 2009, vol. 44, issue 1, pp. 88–95. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.03.009.
7. Zhu Pei, Wang Xishi, Wang Zhigang, Cong Haiyong, Ni Xiaomin. Experimental and numerical study on attenuation of thermal radiation from large-scale pool fires by water mist curtain. *Journal of Fire Sciences*, 2015, vol. 33, issue 4, pp. 269–289. DOI: 10.1177/0734904115585796.
8. Dombrovsky L. A., Dembele S., Wen J. X. Shielding of fire radiation with the use of multi-layered water mist curtains: preliminary estimates. *Computational Thermal Sciences: An International Journal*, 2016, vol. 8, issue 4, pp. 371–380. DOI: 10.1615/ComputThermalScien.2016017601.
9. Turco M., Lhotsky P., Hadjisophocleous G. Investigation into the use of a water curtain over openings to prevent fire spread. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 46, article no. 04001. 11 p. DOI: 10.1051/mateconf/20164604001.
10. Collin A., Lechene S., Boulet P., Parent G. Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield. *Numerical Heat Transfer. Part A: Applications*, 2010, vol. 57, issue 8, pp. 537–553. DOI: 10.1080/10407781003744722.
11. Benbrik A., Cherifi M., Meftah S., Khelifi M. S., Sahnoune K. Contribution to fire protection of the LNG storage tank using water curtain. *International Journal of Thermal and Environmental Engineering*, 2010, vol. 2, no. 2, pp. 91–98. DOI: 10.5383/ijtee.02.02.005.
12. Hudson R. D. *Infrared systems engineering*. New York, Wiley–Interscience, 1969 (Russ. ed.: Hudson R. *Infrakrasnyye sistemy*. Moscow, Mir Publ., 1972. 534 p.).
13. Chokhonelidze A. N., Galustov V. S., Kholpanov L. P., Prikhodko V. P. *Spravochnik po raspylivayushchim, orositelnym i kapleulavlivayushchim ustroystvam* [Reference-book on spray, sprinkle and droplet trapping devices]. Moscow, Energoatomizdat, 2002. 608 p. (in Russian).
14. Mednikov E. P. *Turbulentnyy perenos i osazhdeniye aerorozley* [Turbulent aerosol transfer and deposition]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 174 p. (in Russian).

For citation: Dushkin A. L., Iovchinskiy S. E., Ryazantsev N. N. Finely-dispersed water fire radiation screening. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 52–59 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.52-59.

В. Н. ЛОЖКИН, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: vnlojkin@yandex.ru)

УДК 64.841+004.032.26+519.63:517.951

НОВЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В РАЙОНЕ АВТОМАГИСТРАЛИ ПРИ ГОРЕНИИ ТОРФА

Изучены физические условия возникновения крупного торфяного пожара; проанализированы негативные последствия его развития в окрестности автомагистрали по показателям загрязнения токсичными веществами окружающей среды и риска возникновения дорожно-транспортных происшествий. Представлен оригинальный дифференциально-нейросетевой подход к моделированию диффузии выбросов СО в окрестности автомагистрали при горении торфа. Показано, что математическая модель самообучающаяся и может настраиваться по гетерогенным данным натурного и альтернативного численного эксперимента. Получены важнейшие для практики конкретные решения задачи оценки загрязнения воздуха СО аппроксимациями дифференциального уравнения и Гаусса нейросетевым способом. Показано, что загрязнения непосредственно на автомагистрали могут достигать концентрации $3,5 \text{ мг/м}^3$. Метод рекомендуется для прогнозирования качества воздуха в зоне торфяных пожаров.

Ключевые слова: автомагистраль; торфяной пожар; угарный газ; опасное загрязнение воздуха; транспортный коллапс; информационный процесс; нейросетевая модель.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.60-69

Введение

Торфяные месторождения встречаются во многих местах мира, но наиболее крупные болота расположены на Западно-Сибирской низменности, в районе Гудзонова залива и долине реки Маккензи [1]. Торфяные экосистемы наиболее эффективно поглощают углерод на планете, и по этой причине торфяные пожары являются основным источником выбросов парникового (диоксид углерода) и токсичного (оксид углерода) газов в атмосферу планеты. Кроме того, торфяники выделяют ртуть в атмосферу со скоростью в 15 раз больше, чем нагорные леса [1, 2], что представляет серьезную проблему для здоровья людей. Торф может гореть глубоко под землей (до 10 м), даже в условиях повышенной влажности и в зимнее время под слоем снега. Сильные пожары в торфяниках с трудом поддаются тушению и могут длиться в течение нескольких месяцев. Зимой торфяные пожары чаще представляют собой тлеющие очаги (автор впервые условно назвал их “дымовыми гейзерами”) с обильным выбросом оксида углерода, который часто называют также угарным газом (СО), дымового смога (взвешенных частиц) и других поллютантов [3–6].

Если торфяной пожар развивается возле автомагистрали, то дым от горящего торфяника снижает видимость, затрудняет дыхание, отрицательно влияет на цереброваскулярную и сердечно-сосудистую системы человека и может при чрезвычайном развитии событий привести к дорожно-транспортным происшествиям с опасными последствиями. Такая чрезвычайная аварийная ситуация, вызванная подземным горением торфа, продолжалась в Иркутской области (на Западно-Сибирской низменности) на Федеральной автомобильной дороге (ФАД) Р-255 “Сибирь” с 26.10.2015 г. до 15.01.2016 г. Официальная информация визуального и инструментального контроля за данной чрезвычайной ситуацией (ЧС) службами Роскомгидромета использовалась нами в качестве характерных гетерогенных сведений при обосновании и “обучении” модели рассеяния СО в стратифицированной атмосфере в окрестности автомагистрали.

Следует заметить, что транспортные атмосферные химические модели широко используются для разработки стратегии управления качеством воздуха [7–9]. В то же время, несмотря на явные приоритеты в развитии данных исследований Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны и Академии Государственной

противопожарной службы МЧС России, оценки пространственного и временного рассеяния поллютантов при торфяных пожарах при чрезвычайных гидрометеорологических условиях остаются проблематичными из-за неопределенности в размере и местоположении облака смога, обусловленной временной и пространственной изменчивостью реального процесса конвективной диффузии [7].

Мировой опыт решения подобных задач, детально проанализированный в работах [3–10], в практической интерпретации, как правило, сводится к различным версиям гауссовских моделей, включая и оценки распространения загрязняющих веществ при пожарах на объектах промышленности [11]. К таким моделям загрязнения атмосферы, например, от стационарных и передвижных транспортных источников относятся: американские CALINE-4 (California Line Source Model), ISC3 (Industrial Source Complex Model); ROADWAY 2.0; HIWAY-2; финская CAR-FMI (Contaminants in the Air from a Road); датская OSPM (Operational Street Pollution Model); шведский программный комплекс AIRVIRO; румынская TRAF (a micro-scale street model for dispersion of pollutant emissions generated by traffic); словацкая AUTOMOD; венгерские HNS-ROAD, HNS-ISAQA; польская EK 100W; эстонская AEROPOL; голландская CAR II. Однако в гауссовской модели не учитывается зависимость диффузионных коэффициентов от высоты источника, поэтому она позволяет описывать приземное поле концентраций поллютантов от источника только фиксированной высоты. В РФ большинство работ по моделированию загрязнения атмосферы антропогенными и природными источниками основывается преимущественно на решении уравнений атмосферной диффузии [12–15]. Применение столь громоздкого математического аппарата и значительных для его реализации ресурсов в решении физической (ЧС), а следовательно, и математической (поиск экстремума функции) частной задачи (исключительно, для чрезвычайных неблагоприятных климатических и метеоусловий) представлялось с точки зрения практики нерациональным.

Таким образом, цель настоящего актуального исследования состояла в том, чтобы разработать и исследовать возможность применения оригинальной модели нейронной сети для прогнозирования распределения концентрации СО в окрестности крупной автомагистрали “Сибирь”, участки которой расположены на разных расстояниях от торфяного пожара, с учетом разнородной (гетерогенной) инструментальной и адекватной расчетной информации (численного эксперимента) о моделируемом процессе переноса облака дымового смога.

Методология моделирования

Метод, основанный на К-теории

Научной школой автора настоящей статьи накоплен положительный опыт применения методологии Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (г. Санкт-Петербург) для прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха “холодными” выбросами [12, 14] в окрестностях крупных автомагистралей [10, 16] при нормально неблагоприятных метеорологических условиях (далее — ННМУ), получившей широчайшую многолетнюю инструментальную проверку. Это послужило основанием при ее первичном использовании для оценки рассеяния СО при торфяном пожаре.

В основу модели положено численное решение системы уравнений атмосферной диффузии, каждое из которых записывается для концентрации одной из анализируемых опасных примесей. Уравнение (1) приводится только для концентрации одного поллютанта:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 (u_i + w_g k_{ji}) \frac{\partial q}{\partial x_i} = \\ = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} K_i \frac{\partial q}{\partial x_i} - \alpha q + S, \end{aligned} \quad (1)$$

где q — концентрация поллютанта;

u_i, K_i — компоненты средней скорости ветра и коэффициента турбулентной диффузии вдоль декартовых координатных осей x ;

w_g — скорость гравитационного оседания примеси (отлична от нуля в случае переноса частиц);

k_{ji} — символ Кронекера, равный 1 при совпадении индексов и нулю при их несовпадении;

α — коэффициент, учитывающий метаболизм веществ;

S — член, учитывающий влияние источников и стоков примесей, их химическую (в том числе фотохимическую) трансформацию и др. [12].

Уравнение (1) представлено в декартовой системе координат с осью z , направленной по вертикали, и компоненты скорости ветра удовлетворяют уравнению неразрывности, в котором пренебрегается зависимостью плотности от координат. Эти, а также ряд других, не оговариваемых здесь упрощений [15, 17, 18], относятся только к способу представления информации, поскольку для конкретных физических условий диффузии поллютантов при ЧС на автомагистрали “Сибирь” объективно не потребовалась полная реализация возможностей модели.

Использование данного подхода к математическому моделированию турбулентной диффузии, который сегодня называют К-теорией [10], совместно с обоснованными упрощениями [13] стилизации и эмпирическими уточнениями позволяет оценить

наибольшую суммарную концентрацию вредной примеси из состава дымового смога торфяного пожара C_m (мг/м³), которая определяется на расстояниях X_m от него в окрестности автомагистрали:

$$C_m = \frac{AMFmn\eta}{H^2(V_1\Delta T)^{1/3}}, \quad (2)$$

где A — безразмерный коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы;

M — масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени (мощность источника загрязнения), в случае торфяного пожара — масса вещества, выбрасываемого группой “дымовых гейзеров” с поверхности горящего торфяника, г/с;

F — безразмерный коэффициент, учитывающий скорость метаболизма СО или скорость оседания дымового аэрозоля в атмосфере; рекомендуется принимать $F = 1$;

m и n — коэффициенты; выражаются интерполяционными формулами, приведенными в документе ОНД-86 [11];

η — опытный коэффициент, значения которого принимаются из документа ОНД-86 [11];

H — высота формирования устойчивого облака смога, м;

V_1 — поток дыма, выделяемого при торфяном пожаре с поверхности земли, м³/с;

ΔT — разность температур между температурой дымового газа и температурой окружающего воздуха, °С.

Метод, основанный на нейросетевой теории

Вышерассмотренный и освоенный нами подход, сочетающий применение современных геоинфор-

мационных технологий (ГИС) [10], требует значительных ресурсов и дискретной корректировки ошибок (неопределенности) в оценке параметров по данным измерений. Чтобы смягчить остроту этих проблем, мы предлагаем использовать оригинальный нейросетевой подход. Он основан на включении данных измерений и альтернативных (рецепторных [14]) расчетов концентраций СО в окрестности автомагистрали в нейросетевых моделях, известных как RProp и комбинации методов “облака” и RProp, с параметрами (весами), настраиваемыми с помощью методов оптимизации, детально рассмотренных в работах [18–21].

Таким образом, нейронная сетевая модель сложного процесса диффузии в атмосфере загрязняющих веществ может позволить в непрерывной информационной технологии обрабатывать фрагменты гетерогенной информации — дифференциальные уравнения, законы сохранения, уравнения состояния, условия симметрии и т. д. Обмен информацией по параметрам нейронной сети между различными уровнями иерархии позволит осуществлять вычисления более точными и менее ресурсоемкими способами [20, 21].

Результаты и их обсуждение

Ниже приводятся два последовательных примера численного прогнозирования ЧС, связанной с загрязнением атмосферного воздуха в окрестности автомагистрали “Сибирь” при торфяном пожаре при ННМУ, по разработанной методологии.

Пример 1

На рис. 1 представлена карта прогноза загрязнения угарным газом при торфяном пожаре (в долях

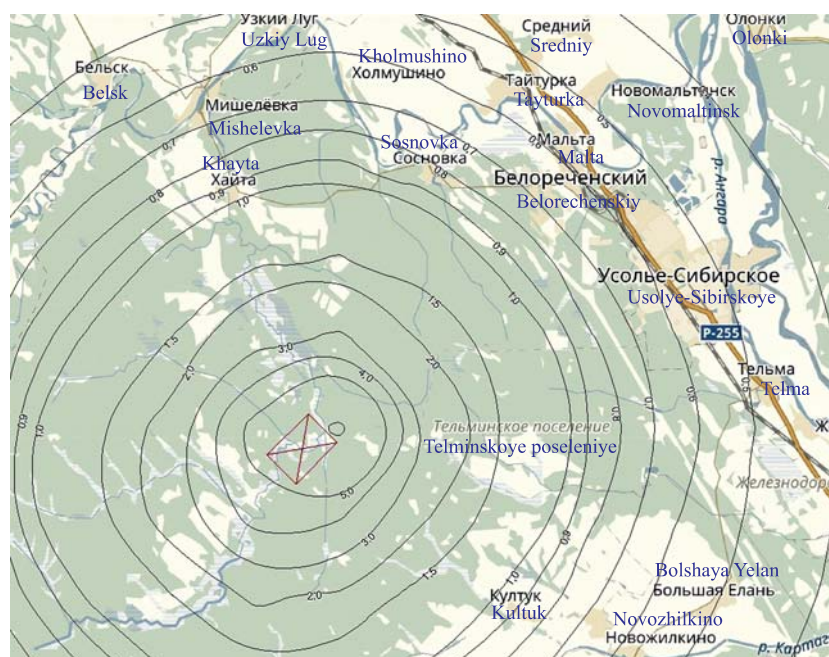


Рис. 1. Расчетный прогноз загрязнения СО (угарным газом) в окрестности автомагистрали Р-255 ФАД “Сибирь” при торфяном пожаре при ННМУ по программе “Эколог 4” (в долях ПДК_{мр})

Fig. 1. Forecast of the pollution of the air by СО emitted from a peat fire in the vicinity of the Federal Highway R-255 FAD “Siberia” for adverse weather conditions estimated by the “Ecolog 4” program (in terms of Limit Value Units)

Таблица 1. Сравнение данных контрольных измерений концентраций СО службами Росгидромета и прогнозного расчета по разработанной методике при ННМУ

Table 1. Comparison of experimental measurements of CO concentrations and simulated measurements received using the elaborated method

Место замера Metering place	Значения концентраций СО, мг/м ³ CO concentration values, mg/m ³	
	средние по данным Росгидромета average according to Roshydromet	полученные расчетом при ННМУ average simulate
Пос. “Тельма” Village Telma	0,50	0,90
Пос. “Железнодорожный” Village Zheleznodorozhnyy	0,60	0,92
ФАД Р-255 “Сибирь” Highway R-255 “Siberia”:		
1820-й км 1820 th km	0,60	1,05
1822-й км 1822 nd km	0,70	1,10
1824-й км 1824 th km	0,70	1,16

ПДК_{МР}) в окрестности федеральной трассы Р-255 ФАД “Сибирь” при ННМУ по программе “Эколог 4” (фирма “Интеграл”, г. Санкт-Петербург, Россия). В табл. 1 сведены результаты инструментального мониторинга загрязнения воздуха СО службами Росгидромета и прогноза по разработанной нейросетевой методике при ННМУ в тех же контрольных точках.

Основными научными и практическими результатами виртуального прогноза, продемонстрированного на первом примере, являются:

- впервые показана и доказана применимость подхода К-теории для решения чрезвычайно актуальной практической задачи прогнозирования загрязнения СО при торфяном пожаре в окрестности автомобильной дороги федерального значения в нормально неблагоприятных метеорологических условиях, сложившихся в конкретном регионе РФ и вызвавших реальный транспортный коллапс;
- впервые данные расчета (рецепторные данные [14]) и данные непосредственных инструментальных измерений концентраций СО, проведенных Росгидрометом в течение транспортного коллапса в конкретном регионе РФ, были использованы в качестве гетерогенной информации для

реализации технологии обучения аппроксимирующей модели нейронной сети в непрерывном технологическом режиме путем минимизации функционала ошибки.

Устойчивое для реальных условий численного прогноза небольшое отклонение расчетных данных концентраций СО в сторону превышения от средних значений концентраций инструментального контроля службами Росгидромета (см. табл. 1) мы объясняем неизбежными погрешностями в задании пожарной нагрузки горящего торфяника и тем, что расчеты (замеры) производились при ННМУ.

Пример 2

Второй пример демонстрирует возможности разработанного метода для сценарного моделирования вероятного неблагоприятного развития ЧС, рассмотренной в примере 1, а именно перехода в режим пламенного горения торфа с выбросом раскаленных газов, устойчивой ветровой нагрузки в направлении автомагистрали (до 10 м/с) и переноса облака смога торфяного пожара на значительные расстояния, когда возрастает значимость мезомасштабных переносов воздушных масс в сравнении с локальной турбулентностью. Для учета этих физических явлений Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого совместно с Санкт-Петербургским университетом ГПС МЧС России в рамках гранта РФФИ № 14-01-00733А разработан оригинальный нейросетевой подход к моделированию переноса СО на основе базисной функции Гаусса [11].

Согласно модели Гаусса изменение концентрации СО в переносимом облаке смога q (г/м³) подчиняется нормальному закону распределения:

$$q(t, x, y, z) = Q e^{-1/2 \left[\frac{(x - x_0 - ut)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y - y_0 - vt)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z - z_0 - wt)^2}{(\sigma_z)^2 t} \right]} \left[(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right]^{-1}, \quad (3)$$

где Q — мощность источника, г/(м·с);

x_0, y_0, z_0 — координаты источника выброса СО, м;

(u, v, w) — компоненты скорости ветра, м/с;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — средние квадратичные отклонения концентрации СО в момент времени t (с) по осям OX, OY, OZ ;

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{2}{h} \int_0^h K_x(z) dz; \\ \sigma_y^2 &= \frac{2}{h} \int_0^h K_y(z) dz; \\ \sigma_z^2 &= \frac{2}{h} \int_0^h K_z(z) dz; \end{aligned} \quad (4)$$

h — высота приземного слоя с активной турбулентностью, м (рис. 2);

K_x, K_y, K_z — функции, характеризующие развитие дымового облака смога в окрестности автомагистрали.

Используя принцип суперпозиции, из уравнения (3) легко получить формулу для расчета концентрации СО от торфяного пожара непрерывного действия:

$$q(t, x, y, z) = \int_0^t \left\{ Q \exp \left(-\frac{1}{2} \left[\frac{(x - x_0 - ut)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y - y_0 - vt)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z - z_0 - wt)^2}{(\sigma_z)^2 t} \right] \right) \times \right. \quad (5)$$

$$\left. \times \left[(\sqrt{2\pi t})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right]^{-1} \right\} dx_0 dy_0 dz_0.$$

Интегрирование в формуле (5) распространено на область Ω , занятую торфяным пожаром. Сложность возникает при вычислении интеграла. Так, применение аналитических методов приведет к громоздким формулам, а численных — потребует больших временных затрат. Для решения проблемы используем кубатурные формулы и заменяем интеграл конечной суммой:

$$q_n(t, x, y, z, u, v, w) = \sum_{i=1}^n K_i \left\{ Q \exp \left(-\frac{1}{2} \left[\frac{(x_i - x_0 - ut)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y_i - y_0 - vt)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z_i - z_0 - wt)^2}{(\sigma_z)^2 t} \right] \right) \times \right. \quad (6)$$

$$\left. \times \left[(\sqrt{2\pi t})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right]^{-1} \right\},$$

где C_i — числовые коэффициенты;

(x_i, y_i, z_i) — узлы интегрирования, $i = 1, 2, \dots, N$.

Легко заметить, что приближение (6) для концентрации СО q можно рассматривать как модель, которая соответствует искусственным нейронным сетям с радиальными базисными функциями в случае использования в качестве базисной функции Гаусса [18]. Настройка весов сети, линейно и нелинейно входящих параметров C_i и (x_i, y_i, z_i) осуществляется на основе минимизации функционала ошибки:

$$J = \sum_{j=1}^P \left| q(t, \bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j; u, v, w; t) - q_j(t; u, v, w) \right|^2, \quad (7)$$

где $\{(\bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j)\}_{j=1}^P$ — множество точек в области Ω , в которых известны измеренные (рассчитанные по альтернативному методу) значения концентрации $\{q_j\}_{j=1}^P$ угарного газа.

Данные расчета с использованием программы “Эколог 4” (см. пример 1) совместно с данными инструментального мониторинга концентраций СО

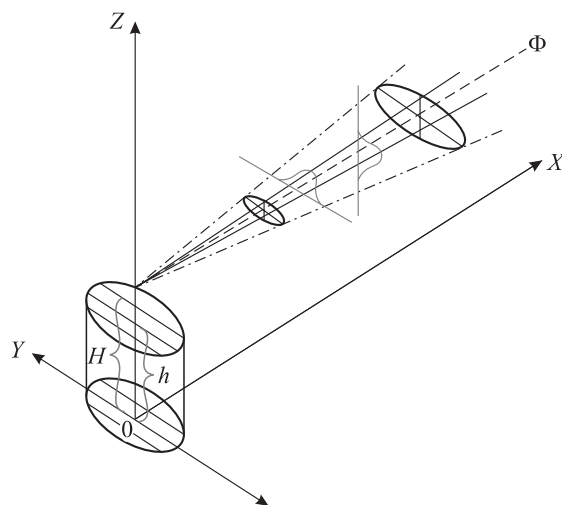


Рис. 2. Схема переноса СО по модели Гаусса для торфяного пожара: h — высота приземного слоя с активной турбулентностью; H — высота формирования облака дымового смога над горящим торфяником

Fig. 2. Diagram of CO dispersion according to Gauss model for peat fire: h is the height of surface layer with active turbulence; H is the height of the formation of a smoke smog cloud over a burning peat bog

службами Росгидромета были использованы нами в качестве массива исходной гетерогенной информации для обработки (аппроксимации) вышеописанным нейросетевым методом. На рис. 3 показана картина динамического развития загрязнения СО исследуемой территории при опасном направлении ветра в сторону автомагистрали Р-255 ФАД “Сибирь”. В табл. 2 сведены результаты инструментального мониторинга загрязнения воздуха СО службами Росгидромета и прогноза по разработанной нейросетевой методике в тех же контрольных точках.

Основными научными и практическими результатами виртуального прогноза, реализованного во втором примере, являются:

- впервые в едином последовательном информационном процессе численного прогнозирования диффузии СО в окрестности автомагистрали федерального значения при торфяном пожаре с использованием базисной функции Гаусса [19] в рамках самообучающейся нейронной сети реализован принцип сценарного моделирования для решения актуальной практической задачи развития ЧС в условиях изменяющихся направления и скорости ветра;
- впервые получен и на практике реализован информационный процесс, сочетающий в рамках модели нейронной сети преимущества отечественного подхода К-теории [12–15] и, по сути, современного зарубежного подхода к моделированию рассеяния поллютантов функцией Гаусса [3–9, 11].

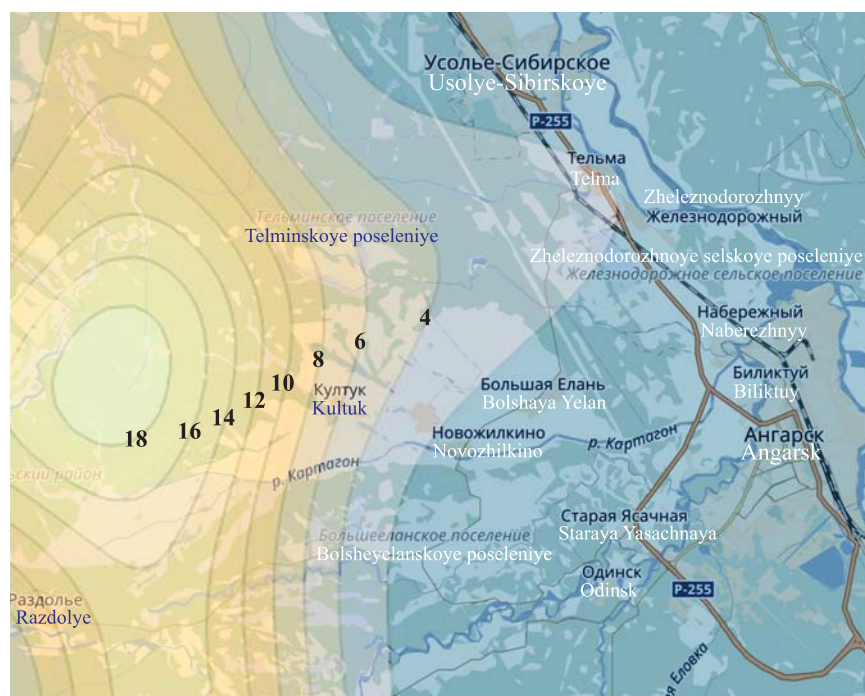


Рис. 3. Изолинии расчетных значений концентрации CO (mg/m^3) при ветре в направлении трассы “Сибирь”, построенные по нейросетевой модели с числом нейронов $N = 4$
Fig. 3. Isolines of the calculated CO concentrations (mg/m^3) at the wind in the direction of the “Siberia” highway, constructed according to the neural network model (number of neurons $N = 4$)

Таблица 2. Сравнение данных контрольных измерений концентраций CO службами Росгидромета и прогнозного расчета для вероятного гипотетического неблагоприятного развития ЧС

Table 2. Comparison of experimental measurements of CO concentrations and simulated measurements for a hypothetical adverse development of an emergency

Показатель Index	Пос. “Тельма” Village Telma	Пос. “Железнодорожный” Village Zheleznodorozhnyy	ФАД Р-255 “Сибирь” Highway R-255 “Siberia”		
			1820-й км 1820 th km	1822-й км 1822 nd km	1824-й км 1824 th km
Средние значения концентраций CO по данным Росгидромета, mg/m^3 Average measured CO concentrations, mg/m^3	0,50	0,60	0,60	0,70	0,70
Значения концентраций CO, полученные расчетом при ННМУ, mg/m^3 Average simulated CO concentrations, mg/m^3	2,32	2,86	2,94	3,12	3,25

Сравнительный анализ данных по примерам 1 и 2 позволяет сделать важный практический вывод о том, что при вероятном гипотетическом неблагоприятном развитии ЧС (переход в режим пламенного горения торфа с выбросом раскаленных газов, устойчивая ветровая нагрузка в направлении автомагистрали (до 10 м/с) и, как следствие, перенос облака смога торфяного пожара на значительные расстояния) концентрации CO в окрестности исследуемой автотрассы ФАД Р-255 “Сибирь” могли бы возрасти в 3–4 раза.

Выводы

Разработаны и протестированы методы построения нейросетевой модели диффузии CO по расчетно-экспериментальным данным на примере транспортного коллапса, наблюдавшегося с 26.10.2015 г. по 07.01.2016 г. в Иркутской области России при го-

рении торфа вблизи автомагистрали федерального значения Р-255 “Сибирь”. Для построения нейросетевых моделей использовались гетерогенные данные: уравнения атмосферной диффузии веществ в виде дифференциальных уравнений в частных производных; данные расчета на основе функции Гаусса распределения концентрации CO в облаке смога торфяного пожара; данные непосредственных измерений концентрации CO государственными метеорологическими службами на автомагистрали и в поселках в зоне действия ЧС.

Выполненные демонстрационные расчеты по разработанной оригинальной методике показали вероятность загрязнения воздушной среды CO на уровне дыхания человека в окрестности автомагистрали при торфяном пожаре при нормально неблагоприятных метеорологических условиях до

0,9–1,16 мг/м³. Небольшие отклонения от данных осредненных замеров (0,5–0,7 г/м³) объясняются объективной погрешностью задания пожарной нагрузки.

В условиях вероятного развития ЧС горения торфа с устойчивой ветровой нагрузкой в направлении автомагистрали до 10 м/с концентрации СО могут увеличиться до 2,32–3,25 мг/м³ (при ПДК_{МР} = 5 мг/м³).

Предлагаемый метод рекомендуется для прогнозирования опасного для населения загрязнения воздушной среды поллютантами в зоне торфяных пожаров с ограничениями нормально неблагоприятных метеорологических условий и переноса “холодных дымовых выбросов” с поверхности горящих под землей торфяников.

Исследование было поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 14-01-00733А). Автор выражает признательность д. т. н. А. Н. Васильеву, д. т. н. Д. А. Тархову, к. х. н. О. В. Ложкиной, инженеру В. Д. Тимофееву, без совместной работы с которыми в рамках проекта не могли бы состояться авторские научные обобщения, сделанные в настоящей статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fraser L. H., Keddy P. A. (eds.). The World's largest wetlands: Ecology and conservation. — Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2005. — 488 p. DOI: 10.1017/cbo9780511542091.
2. Biester H., Bindler R. Modelling past mercury deposition from peat bogs — the influence of peat structure and ²¹⁰Pb mobility // Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. — 2009. — No. 128. — P. 483.
3. De Groot W. J. Peatland fires and carbon emissions/Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. — Great Lakes Forestry Centre, Saul Ste. Marie, Ontario Frontline Express, 2012. — No. 50. — 2 p.
4. Fokeeva E. V., Safronov A. N., Rakitin V. S., Yurganov L. N., Grechko E. I., Shumskii R. A. Investigation of the 2010 July-August fires impact on carbon monoxide atmospheric pollution in Moscow and its outskirts, estimating of emissions // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2011. — Vol. 47, Issue 6. — P. 682–698. DOI: 10.1134/s0001433811060041.
5. Konecny K., Ballhorn U., Navratil P., Jubanski J., Page S. E., Tansey K., Hooijer A., Vernimmen R., Siebert F. Variable carbon losses from recurrent fires in drained tropical peatlands // Global Change Biology. — 2016. — Vol. 22, Issue 4. — P. 1469–1480. DOI: 10.1111/gcb.13186.
6. Gaveau D. L. A., Salim M. A., Hergoualc'h K., Locatelli B., Sloan S., Wooster M., Marlier M. E., Molidena E., Yaen H., DeFries R., Verchot L., Murdiyarso D., Nasi R., Holmgren P., Sheil D. Major atmospheric emissions from peat fires in Southeast Asia during non-drought years: evidence from the 2013 Sumatran fires // Scientific Reports. — 2014. — Vol. 4, Issue 1. — Article No. 6112. DOI: 10.1038/srep06112.
7. Pouliot G., Pierce T., Benjey W., Ferguson S. A. Wildfire Emission Modeling: Integrating BlueSky and SMOKE // Proceedings of 14th International Emission Inventory Conference “Transforming Emission Inventories — Meeting Future Challenges Today”, 11–14 April 2005. — 9 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/228674671_Wildfire_emission_modeling_integrating_BlueSky_and_SMOKE (дата обращения: 20.05.2017).
8. Benson P. E. A review of the development and application of the CALINE3 and 4 models // Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere. — Vol. 26, Issue 3. — P. 379–390. DOI: 10.1016/0957-1272(92)90013-i.
9. Berkowicz R. OSPM — a parameterized street pollution model // Urban Air Quality: Measurement, Modelling and Management, 2000. — P. 323–331. DOI: 10.1007/978-94-010-0932-4_35.
10. Berlyand M. E. Prediction and regulation of air pollution // Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. — 1991. — Vol. 14. — 320 p. DOI: 10.1007/978-94-011-3768-3.
11. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. — М. : Гидрометеиздат, 1987. — 93 с.
12. Genikhovich E. L., Gracheva I. G., Onikul R. I., Filatova E. N. Air pollution modelling at an urban scale — Russian experience and problems // Water, Air & Soil Pollution: Focus. — 2002. — Vol. 2, Issue 5-6. — P. 501–512. DOI: 10.1023/A:1021336829300.
13. Genikhovich E. L. Comparison of United States and Russian complex terrain diffusion models developed for regulatory applications // Atmospheric Environment. — 1995. — Vol. 29, Issue 17. — P. 2375–2385. DOI: 10.1016/1352-2310(95)00053-2.

14. Lozhkin V., Lozhkina O., Ushakov A. Using K-theory in geographic information investigations of critical-level pollution of atmosphere in the vicinity of motor roads // World Applied Sciences Journal. — Vol. 23, Issue 13. — P. 96–100. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90020.
15. Lozhkina O., Nevmerzhitsky N., Lozhkin V. Evaluation of air pollution by PM10 and PM2.5 on Saint Petersburg ring road: mobile measurements and source apportionment modelling // Proceedings of 10th International Conference on Air Quality: Science and Application, Milano, 14–18 March 2016. — Hertfordshire : University of Hertfordshire, 2016. — P. 176.
16. Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models // Transportation Research. Part D: Transport and Environment. — 2015. — Vol. 36. — P. 178–189. DOI: 10.1016/j.trd.2015.02.013.
17. Tarkhov D. A., Vasilyev A. N. New neural network technique to the numerical solution of mathematical physics problems. II: Complicated and nonstandard problems // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2005. — Vol. 14. — P. 97–122.
18. Васильев А. Н., Тархов Д. А. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения. — СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2009. — 527 с.
19. Vasilyev A. N., Tarkhov D. A. Mathematical models of complex systems on the basis of artificial neural networks // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. — 2014. — Vol. 17, No. 3. — P. 327–335.
20. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. 3rd ed. — New York : Prentice Hall, 2009. — 936 p.
21. Сухоицанов А. Ю. Моделирование процессов переноса в атмосфере и воздействия на окружающую среду вредных продуктов горения, образующихся при пожаре : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2001. — 202 с.

Материал поступил в редакцию 5 июня 2017 г.

Для цитирования: Ложкин В. Н. Новый метод прогнозирования загрязнения воздуха в районе автомагистрали при горении торфа // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 6. — С. 60–69. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.60-69.

English

NEW APPROACH FOR PREDICTING OF AIR POLLUTION NEAR HIGHWAY CAUSED BY BURNING PEAT BOG

LOZHKIN V. N., Doctor of Technical Sciences,
Professor of Rescue Equipment and Fire Vehicles
Department, Saint Petersburg University of State
Fire Service of Emercom of Russia (Moscovskiy
Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation;
e-mail: vnlojkin@yandex.ru)

ABSTRACT

Introduction. Peat deposits are found in many places around the world, but the world's largest peatlands are the West Siberian Lowland, the Hudson Bay Lowland, and the Mackenzie River Valley. Peat fires are significant sources of carbon dioxide (a greenhouse gas) and carbon oxide (a toxic gas). In addition, peat fires release mercury into the atmosphere at a rate 15 times greater than upland forests, which may be a serious human health concern. If a peat fire develops near a highway, the smoke from the burning peat-bog reduces the visibility, makes the breathing difficult, affect the human nervous and cardiovascular systems and may finally result in traffic accidents or in an emergency.

Modelling methodology. K-theory approach. According to Berlyand, such parameters as instant concentrations of CO pulsed deviations from these values and the velocity of the CO diffusion should be taken into consideration while developing an emission model of the peat deposits burning near the highway. The problem is simplified by the application of the turbulent diffusion model. Using this approach, also known as K-theory, together with reasonable approximations and assumptions, there was established that the concentration of the pollutant emitted from the unregulated square source, such as a burning peat bog, is as follow in the Russian normative document OND-86.

At the same time, this approach is time-consuming and doesn't specify inaccurate problem parameters derived from the measurements. To solve these problems, we offer to apply a neural network approach. On the base of the measurements, there was developed a neural network model with parameters (weights) tuned via optimization methods. The RProp method and the combination of "cloud" and RProp methods were in use. The neural network model of the complex system can gather pieces of heterogeneous information — differential equations, conservation laws, equations of state, symmetry conditions, etc. The information exchange via neural network parameters between different levels of hierarchy makes computing less resource consuming.

Results and discussion. *Case study 1.* Visualizes the joint results of experimental and simulated measurements of the peat fire-related CO concentrations near the Federal Highway R-255 "Siberia". The concentrations of CO are expressed in terms of Limit Value Units: 20 minutes CO limit value is 5 mg/m³. The calculations were realized using the software program Ecolog 4 (Integral Co. Ltd., St. Petersburg, Russia). The results of the measured and simulated CO concentrations reaching values of 0,8–1,2 mg/m³ were later used as input heterogeneous data for the calculations by the neural network technique described above.

Case study 2. Turbulent diffusion loses importance when modeling the transfer of the smog clouds from the peat fire over long distances. In addition, there is possible not only a smouldering peat fire but a burning peat fire followed by the emission of hot gases. We have developed an original neural network model, based on the Gaussian dispersion, to estimate these physical phenomena. Assume that the average cross-section of a peat fire smog cloud, migrating in the vicinity of a highway, is similar to the Gaussian distribution having a plume profile. Shows the dynamic development of the pollution in this area at the wind in the direction of the highway (4 neurons).

Parametric model allows predicting the level of peat fire-related air pollution at different wind directions (Project No. 14-01-00733-A supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research).

Keywords: motorway; peat fire; carbon monoxide; dangerous air pollution; traffic collapse; information process; neural network model.

REFERENCES

1. Fraser L. H., Keddy P. A. (eds.). *The World's largest wetlands: Ecology and conservation*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2005. 488 p. DOI: 10.1017/cbo9780511542091.
2. Biester H., Bindler R. Modelling past mercury deposition from peat bogs — the influence of peat structure and ²¹⁰Pb mobility. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*, 2009, no. 128, p. 483.
3. De Groot W. J. Peatland fires and carbon emissions. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. *Great Lakes Forestry Centre, Saul Ste. Marie, Ontario Frontline Express*, 2012, no. 50. 2 p.
4. Fokeeva E. V., Safronov A. N., Rakitin V. S., Yurganov L. N., Grechko E. I., Shumskii R. A. Investigation of the 2010 July-August fires impact on carbon monoxide atmospheric pollution in Moscow and its outskirts, estimating of emissions. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, vol. 47, issue 6, pp. 682–698. DOI: 10.1134/s0001433811060041.
5. Konecny K., Ballhorn U., Navratil P., Jubanski J., Page S. E., Tansey K., Hooijer A., Vernimmen R., Siegert F. Variable carbon losses from recurrent fires in drained tropical peatlands. *Global Change Biology*, 2016, vol. 22, issue 4, pp. 1469–1480. DOI: 10.1111/gcb.13186.
6. Gaveau D. L. A., Salim M. A., Hergoualc'h K., Locatelli B., Sloan S., Wooster M., Marlier M. E., Molidena E., Yaen H., DeFries R., Verchot L., Murdiyarso D., Nasi R., Holmgren P., Sheil D. Major atmospheric emissions from peat fires in Southeast Asia during non-drought years: evidence from the 2013 Sumatran fires. *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, issue 1, article no. 6112. DOI: 10.1038/srep06112.
7. Pouliot G., Pierce T., Benjey W., Ferguson S. A. Wildfire Emission Modeling: Integrating BlueSky and SMOKE. In: *Proceedings of 14th International Emission Inventory Conference "Transforming Emission Inventories — Meeting Future Challenges Today"*, 11–14 April 2005. 9 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228674671_Wildfire_emission_modeling_integrating_BlueSky_and_SMOKE (Accessed 20 May 2017).
8. Benson P. E. A review of the development and application of the CALINE3 and 4 models. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, vol. 26, issue 3, pp. 379–390. DOI: 10.1016/0957-1272(92)90013-i.
9. Berkowicz R. OSPM — a parameterized street pollution model. In: *Urban Air Quality: Measurement, Modelling and Management*, 2000, pp. 323–331. DOI: 10.1007/978-94-010-0932-4_35.

10. Berlyand M. E. Prediction and regulation of air pollution. In: *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*, 1991, vol. 14. 320 p. DOI: 10.1007/978-94-011-3768-3.
11. All-Union normative document-86. *Methodology for the calculation of the concentrations in the air of harmful substances contained in industrial emissions*. Moscow, Gidrometeoizdat, 1987. 93 p. (in Russian).
12. Genikhovich E. L., Gracheva I. G., Onikul R. I., Filatova E. N. Air pollution modelling at an urban scale — Russian experience and problems. *Water, Air & Soil Pollution: Focus*, vol. 2, issue 5–6, pp. 501–512. DOI: 10.1023/A:1021336829300.
13. Genikhovich E. L. Comparison of United States and Russian complex terrain diffusion models developed for regulatory applications. *Atmospheric Environment*, 1995, vol. 29, issue 17, pp. 2375–2385. DOI: 10.1016/1352-2310(95)00053-2.
14. Lozhkin V., Lozhkina O., Ušakov A. Using K-theory in geographic information investigations of critical-level pollution of atmosphere in the vicinity of motor roads. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 23, issue 13, pp. 96–100. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90020.
15. Lozhkina O., Nevmerzhitsky N., Lozhkin V. Evaluation of air pollution by PM10 and PM2.5 on St. Petersburg ring road: mobile measurements and source apportionment modelling. In: *Proceedings of 10th International Conference on Air Quality: Science and Application*, Milano, 14–18 March 2016. Hertfordshire, University of Hertfordshire, 2016, p. 176.
16. Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, 2015, vol. 36, pp. 178–189. DOI: 10.1016/j.trd.2015.02.013.
17. Tarkhov D. A., Vasilyev A. N. New neural network technique to the numerical solution of mathematical physics problems. II: Complicated and nonstandard problems. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2005, vol. 14, pp. 97–122.
18. Vasilyev A. N., Tarkhov D. A. *Neyrosetevoye modelirovaniye. Printsipy. Algoritmy. Prilozheniya* [Neural network modeling. Principles. Algorithms. Applications]. Saint Petersburg, Polytechnic University Publishing House, 2009. 527 p. (in Russian).
19. Vasilyev A. N., Tarkhov D. A. Mathematical models of complex systems on the basis of artificial neural networks. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2014, vol. 17, no. 3, pp. 327–335.
20. Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines*. 3rd ed. New York, Prentice Hall, 2009. 936 p.
21. Sukhoivanov A. Yu. *Modeling of diffusion in the atmosphere and environmental impact of harmful combustion products generated during a fire*. Cand. tech. sci. diss. Saint Petersburg, 2001. 202 p. (in Russian).

For citation: Lozhkin V. N. New approach for predicting of air pollution near highway caused by burning peat bog. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 60–69 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.60-69.

П. Ю. КНЯЗЕВ, советник председателя правления Региональной общественной организации “Группа специалистов по пожарной безопасности” (Россия, 115230, г. Москва, Хлебозаводский пр-д, 7, стр. 9; e-mail: info@ptm01.ru)

Л. Н. САВЕЛЬЕВ, председатель правления Региональной общественной организации “Группа специалистов по пожарной безопасности” (Россия, 115230, г. Москва, Хлебозаводский пр-д, 7, стр. 9)

ПРЕЗУМПЦИЯ ВИНОВНОСТИ ИЛИ “ГОРЯЩАЯ РОССИЯ–2”*

В 2017 г. исполнилось бы 90 лет Государственному пожарному надзору (ГПН) и 40 лет со дня “усиления” ГПН. Именно “исполнилось бы”, потому что де-факто сейчас его практически нет. А те немногочисленные инспекторы, которые остались, продолжают уничтожаться официальной политикой МЧС под названием “риск-ориентированный подход”. В этой статье авторы приводят свои рассуждения о том, почему новый подход приведет к увеличению количества пожаров, жертв и материального ущерба.

*“Так и хочется спросить тех, кто создал такую ситуацию:
Вы хоть понимаете теперь, чего вы натворили?”*

Из выступления Владимира Владимировича Путина
на 70-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН

Причина такого неблагоприятного прогноза, о котором говорится в преамбуле этой статьи, основана на анализе результатов 16-летнего руководства пожарной охраной лицами, не имеющими специального образования в такой специфической сфере, как пожарная безопасность. Итог этой деятельности вполне закономерен — беспрецедентные крупные пожары 2016 года, пожары с невероятной площадью — 10–15 тыс. м², пожары, на которых впервые со времен Великой Отечественной войны погибли 8 пожарных. Все это заставляет задуматься, а не сгорит ли в этом году еще больше? И чтобы понять, что происходит сейчас, необходимо проанализировать, в чем историческая и современная суть так называемого “гибкого нормирования”, объектно-ориентированного или риск-ориентированного подхода, нужно понять, откуда все это взялось, почему стало так популярно, почему считается заменой государственного пожарного надзора и к чему это может нас привести.

Начало и конец Госпожнадзора

В 2001 году пожарная охрана была передана из МВД под управление МЧС. И если у Министерства внутренних дел и без пожарных было обширное поле для деятельности (общественный порядок, следствие, оперативная работа и т. д.), то МЧС до момента присоединения пожарной охраны руково-

дило только работниками гражданской обороны, спасателями, кинологами и некоторыми другими специалистами, общее количество которых составляло примерно 30 тыс. чел. С приходом в состав ведомства 300 тысяч пожарных появилось обширное поле для руководящей работы, которая в лучших чиновничьих традициях заключалась в реформировании вполне успешно работающих систем и которая лучше всего описана Николаем Васильевичем Гоголем: “оно чем больше ломки, тем больше означает деятельность градоправителя”.

При выборе объекта для реформ новые руководители пожарной охраны опирались, скорее всего, на свой прежний комсомольско-строительный опыт. В “прошлой жизни” и министр МЧС, и его первый зам имели одну задачу, которая заключалась в том, чтобы побыстрее сдать построенный объект и отчитаться перед партийным руководством. Но этой работе конечно же мешали “занудливые, мелочные, придирчивые пожарные”, т. е. пожарный надзор.

История пожарной охраны знает случаи, когда принципиальная позиция представителей пожарного надзора “мешала” сдаче очень важных объектов. Достаточно вспомнить легендарный поступок генерала Евгения Ефимовича Кирюханцева, который, будучи еще только подполковником, “мешал и препятствовал” сдаче в эксплуатацию Дома правительства РСФСР, добиваясь обеспечения его пожарной безопасности [1], чтобы понять, насколько пожарный надзор был непопулярен в среде строителей, из ко-

* Опубликовано в РУБЕЖ (информационно-аналитический журнал) 31 мая 2017 г. (<http://ru-bezh.ru/lev-savelev,-pavel-knyazev/16398-prezumpciya-vinovnosti-ili-goryashhaya-rossiya-2>).

торой новые руководители противопожарной службы и вышли.

Именно по этой причине первыми пострадали нормативно-технические отделы Государственного пожарного надзора, подразделения, которые контролировали строящиеся объекты. Уже в 2006 году возводимые здания были выведены из-под контроля ГПН.

Это стало серьезным ударом по сложившейся системе, так как до реформ МЧС сама суть пожарной профилактики на уровне контроля заключалась в том, чтобы объект был правильно запроектирован, правильно построен и правильно эксплуатировался (рис. 1). *Правильно*, т. е. в соответствии с правилами, за соблюдением которых на всех этапах жизненного цикла объекта наблюдал пожарный надзор МВД, а затем — МЧС.

Единая система контроля была разрушена именно в центре. Если раньше одни и те же люди, знающие и фундаментальные принципы обеспечения пожарной безопасности, и друг друга, проверяли соблюдение правил на каждом этапе, могли обмениваться информацией, работать над безопасностью совместно, то теперь каждый этап перешел под контроль самых разных организаций, во многих случаях частных (рис. 2).



Рис. 1. Система пожарного надзора за объектами в России до 2006 года



Рис. 2. Система пожарного надзора за объектами в России после 2006 года

Последствия этих решений начали проявляться только сейчас. Застройщики стали зачастую сдавать объекты в эксплуатацию без визы специалистов Стройнадзора, да и в составе Госэкспертизы уже нет специализированных пожарных подразделений. Мечта-концепция комсомольцев-строителей, которых поставили руководить пожарной охраной, реализовалась: теперь можно сдавать объект в срок без помех со стороны пожарных. Осталось добиться надзор на стадии эксплуатации, и тогда, цитируя одного уже украинского политика, можно будет забыть “о такой неприятности в нашей жизни, как пожарная инспекция” [2].

Печальнее всего то, что вся эта ситуация стала возможной во многом благодаря теоретикам в сфере пожарной безопасности, которые преждевременно предложили результаты своих теоретических работ для внедрения в практику. Так и появилось “гибкое нормирование” или “риск-ориентированный подход”, который еще называют объектно-ориентированным.

Его суть можно передать в следующих трех постулатах, в которых “объект защиты” — это здание, где может произойти пожар, а “собственник” или “бизнес” — человек или организация, принимающие решения, влияющие на безопасность третьих лиц.

1. Пожарную безопасность людей на “объекте защиты” можно посчитать по специальным методам. Суть заключается в получении величины так называемого “пожарного риска”. Если этот показатель находится на приемлемом уровне, то он позволяет принимать решения о том, что какие-то правила пожарной безопасности можно не выполнять в целях “устранения излишних ограничений, вызывающих неоправданное удорожание строительства” [3].

2. Реализация на практике первого посыла делает необходимыми инновационные методы контроля — страхование, пожарный аудит, т. е. негосударственный контроль, который собственник объекта защиты сможет выбирать по своему усмотрению. Таким образом, появляется возможность еще больше сократить Госпожнадзор ввиду того, что он становится ненужным, тем более что он крайне коррумпирован.

3. Если безопасность человека подтверждена расчетом риска, то Госпожнадзор тем более не нужен, так как “бизнес” имеет право рисковать имуществом. Отсюда же следует, что собственник заинтересован в защите своих ценностей от пожара и будет самостоятельно заботиться об их сохранности. Собственник объекта защиты, как считают наши теоретики, в первую очередь сам заинтересован соблюдать требования пожарной безопасности. Поэтому в силу второго постулата именно ему можно

доверить выбор того, кто будет контролировать пожарную безопасность на объекте (при условии соблюдения первого постулата).

Так выглядит идеалистическая картина мира, где надзор не “кошмарит” бизнес, а предприниматели сами о себе заботятся и обеспечивают свою безопасность. Однако есть одно “но”. “Страшно далеки от народа” (А. И. Герцен) те, кто сформулировал эту теорию и внедряет ее сейчас в практику пожарного дела. Мы не зря назвали этот раздел “Начало и конец...”. Конец пожарного надзора в полном соответствии с этими постулатами был сформулирован в Основах государственной политики в области пожарной безопасности до 2030 года, где напрямую было задекларировано, что целью деятельности МЧС является не обеспечение пожарной безопасности, не пожарная профилактика, а *“снижение административной нагрузки на предпринимателей и граждан, осуществляющих предпринимательскую деятельность”* [4]. При этом мы очень сомневаемся в том, что при таком подходе до 2030 года Россия не сгорит полностью, и объясним, почему, разобрав детально каждый вышеописанный постулат.

Почему гибкое нормирование и риск-ориентированный подход не пройдут испытание временем?

Постулат № 1. Пожарная безопасность “считается” обеспеченной.

Пожарную безопасность нельзя “посчитать” достоверно ни по одной из существующих методик. Профессор И. М. Абдурагимов очень убедительно доказал это в работе [5]. Примечательно, что до сих пор никто не смог ответить на выводы профессора по существу: ни статьей, ни заметкой, ни конструктивной критикой.

Однако даже если эти методики были бы достоверны (а рано или поздно с развитием науки о динамике пожара и научной школы по “теории людских потоков” они приблизятся к приемлемой достоверности), наша практика показывает, что этот подход может быть применим только на этапах проектирования и строительства. В связи с этим мы никак не можем согласиться с утверждением профессора В. В. Холщевникова о том, что привязка безопасности к разнице между временем эвакуации и временем блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара позволяет провести оценку риска *“на всех этапах жизненного цикла здания и в чрезвычайных ситуациях”* [3]. Эти методы вообще не учитывают множества факторов, влияющих на пожарную безопасность при эксплуатации объекта.

Таким образом, методики будут верны только в идеальной ситуации, в отрыве от реалий и совре-

менной психологии владельца объекта защиты, т. е. ученые полностью оставили “за бортом” поведенческие особенности человека, влияющие на результаты расчетов пожарного риска на уровне пожарной профилактики. Рассмотрим подробнее, почему.

Оценка пожарного риска заключается в сравнении времени, за которое люди успеют выйти из здания (t_3), со временем, за которое пожар распространится и лишит их этой возможности ($t_{6л}$). Таким образом, t_3 должно быть меньше $t_{6л}$:

$$t_3 < t_{6л}.$$

Разные методики вычислений учитывают множество факторов: размеры путей эвакуации, психологию людей во время пожара, развитие самого горения (с той степенью достоверности, которая возможна на текущий момент). Единственное, что эта зависимость и эти величины не учитывают, так это нарушений правил эксплуатации, как, например, показано на фото на рис. 3.

На фото представлены разные способы эксплуатации эвакуационных выходов. Влияют ли эти нарушения на время эвакуации t_3 ? Конечно, напрямую. Делают ли они недостоверными расчетные методы оценки на этапе эксплуатации здания? Да. Получается, что в реальности время t_3 увеличивается, причем на неопределенную величину.

А что же со вторым параметром $t_{6л}$? Может, он в меньшей степени зависит от действий собственника? Рассмотрим примеры.

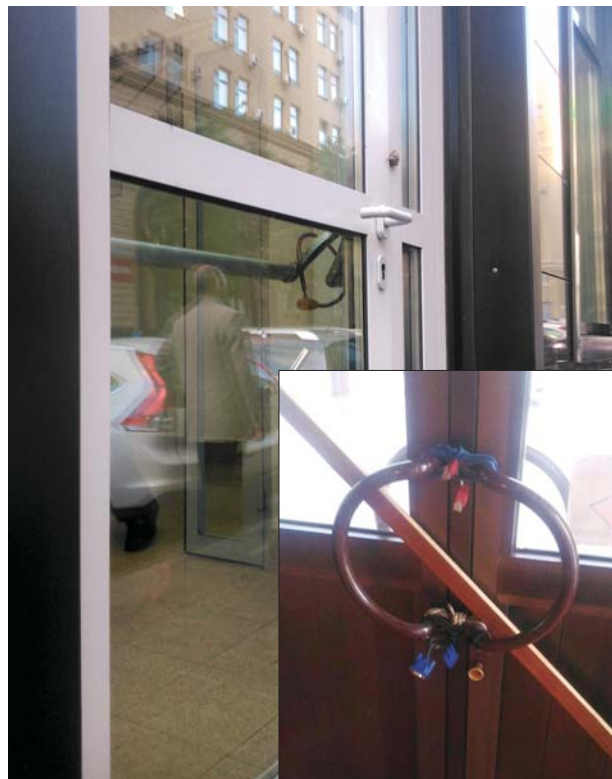


Рис. 3. Примеры эксплуатации эвакуационного выхода

Основными путями распространения опасных факторов пожара по зданию являются коммуникационные помещения, соединяющие этажи здания между собой. Это могут быть помещения для лестниц, лестничные клетки, лифтовые шахты, атриумы. Именно поэтому дверные проемы лестничных клеток должны быть защищены. Именно поэтому в различных нормативных документах есть требование о том, что двери лестничных клеток должны быть оборудованы устройствами для самозакрывания, которые ни в коем случае нельзя разбирать. И именно поэтому нас, как специалистов в области пожарной безопасности, смущают ситуации, когда мы видим, например, что доводчик для закрывания дверей сломан или вообще отсутствует (рис. 4 и 5).

В этих ситуациях возникают все те же вопросы. Влияет ли это на величину того самого риска, которым оценивается пожарная безопасность объекта? Ответ однозначный: конечно, влияет, ведь время распространения пожара сокращается и тоже на неопределенную величину.

В связи с вышесказанным стройная зависимость $t_3 < t_{\text{бл}}$ приобретает такую неактуальность, что становится страшно, когда на ее основе принимаются серьезные решения о мерах пожарной безопасности на различных объектах.

В дискуссиях по данной теме наши оппоненты обычно говорят: *“Да, и что? В расчетах рисков все эти факторы учитываются на уровне рекомендаций. А сами расчеты нужны, чтобы уходить от избыточных требований при проектировании и строительстве. Методика не имеет отношения к тем нарушениям, на которые вы указываете”*.



Рис. 4. Разобранное устройство для самозакрывания двери лестничной клетки

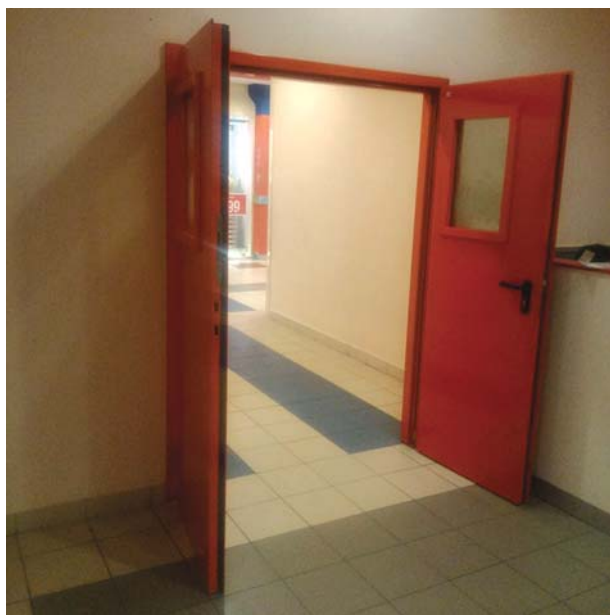


Рис. 5. Устройство для самозакрывания дверей отсутствует

Согласны, расчеты никак не относятся к обозначенным нарушениям правил пожарной безопасности. На этапах проектирования и строительства с определенным допущением можно принять результаты расчетов в качестве довода при выборе средств защиты. Но на этапе эксплуатации риск-ориентированный подход неприменим в принципе, так как он не учитывает непреодолимое желание собственника нарушать в угоду своему пониманию приоритетов те или иные правила в процессе эксплуатации, а ведь и люди, и имущество будут гореть именно на этой стадии жизненного цикла здания. И остановить собственника сейчас практически некому, ведь в условиях, когда в качестве главной задачи МЧС при осуществлении надзора официально задекларировано вовсе не обеспечение пожарной безопасности, становится некому следить за тем, чтобы двери не были заблокированы, а доводчики находились на своих местах и были исправны.

По мнению апологетов риск-ориентированного подхода, это не проблема. На нее вроде как отвечает их постулат № 2, против которого мы тоже приведем возражения, опираясь на собственную практику взаимодействия с бизнесом по вопросам пожарной безопасности.

Постулат № 2. Бизнес имеет право рисковать имуществом, поэтому нужны негосударственные методы контроля и надзора, позволяющие бизнесу решать самостоятельно, что ему делать со своей собственностью, а коррумпированные пожарные только мешают.

Раньше задачи по контролю за выполнением требований пожарной безопасности на стадии эксплуатации находились в зоне ответственности ГПН (см. рис. 1). Однако Госпожнадзор следует по пути

реформирования и внедрения системы оценки пожарных рисков в повседневную практику.

Многие предприниматели выражали недовольство работой сотрудников Госпожнадзора, которые “кошмарили” бизнес, привлекали собственные фирмы по монтажу пожарной сигнализации или продаже огнетушителей. Это, конечно, в корне неправильный подход, незаконный, отвратительный, порочащий честь пожарной охраны. Но давайте посмотрим, изменилось ли что-либо в результате реформ и внедрения риск-ориентированного подхода?

По сообщениям СМИ *“в конце октября 2016 года правоохранители задержали двух сотрудников отдела надзорной деятельности и профилактической работы г. Архангельска. Летом прошлого года те проверяли Северный государственный медицинский университет на соответствие требованиям пожарной безопасности. По версии следствия, желая заработать на служебном положении, работники подразделения МЧС обратились к сотруднику учреждения, отвечающему за пожарную безопасность, и предложили взамен назначения штрафных санкций устранить нарушения путем выполнения расчетов пожарного риска. Позже в деле руководителя подразделения появились еще два коррупционных эпизода. Следствие установило, что в 2015 и 2016 годах работники пожарнадзора выявили нарушения требований пожарной безопасности в торговом центре “Солембала” и в частном детском саду”* (фрагмент новостей с портала News29.ru [6]).

Примечателен и тот факт, о каких объектах идет речь в сообщении из Архангельска. В 2009 году в интервью газете “Московский комсомолец” заместитель директора Департамента надзорной деятельности МЧС России утверждал, что расчет *“может быть использован для высотных зданий, торговых центров, объектов оборонного комплекса, атомной промышленности, других уникальных объектов. Доля таких объектов — 0,001 %. В остальных 99,999 % расчеты производить не нужно”* [7]. Что в свете сказанного было уникального в университете или детском саду, чтобы вместо реальных мероприятий предписывать проведение расчетов рисков, непонятно. И самое важное: первоначально этот инструмент — независимую оценку рисков, расчет индивидуального пожарного риска планировалось, по утверждению одного из высших должностных лиц МЧС, применять в исключительных случаях. Спустя восемь лет декларируемая политика поменялась настолько, что только во Владимирской области оформлено 301 заключение по независимой оценке пожарного риска, из них 73 для офисных помещений и 45 для торговых объектов. Что в них может быть уникального? В связи с этим возникает вопрос, когда МЧС говорило и поступало правильно?

В 2009 году, утверждая, что пожарный риск нужен только для уникальных объектов, или в 2017, навязывая его детским садам?

Коррупция в Государственном пожарном надзоре — постыдное и реальное явление, но внедрение риск-ориентированного подхода не привело к решению этой проблемы, а только усугубило ее. Если раньше коррупция (что никак ее не оправдывает) приводила к выполнению на объектах реальных мероприятий, пусть и усилиями аффилированных фирм, то в результате внедрения риск-ориентированного подхода коррупция не исчезла, а перешла на новый уровень. Проще говоря, раньше принимали меры по повышению пожарной безопасности, закупали огнетушители, монтировали сигнализацию, выполняли огнезащитные работы. В настоящее время все чаще вместо реальных действий надзорные органы предлагают “оформить” нужный отчет.

Например, в Покрове Петушинского района Владимирской области в результате проведения аудита была выявлена необходимость выполнения работ по оборудованию здания системой пожаротушения и противодымной вентиляции стоимостью около 2 млн. руб. По результатам проведения независимой оценки стоимостью 100 тыс. руб. была обоснована возможность невыполнения данных мероприятий. Это информация из официального доклада МЧС. И тут же проходит сообщение в СМИ о том, что в Москве (6-й Загородный пр., вл. 5) загорелся ангар со складированным картоном. Площадь пожара внутри металлического ангара составила около 1,2 тыс. м². Такой ангар должен был защищаться системой автоматического пожаротушения, но раз он выгорел, очевидно, такая система отсутствовала. По-видимому, кто-то также обосновал возможность ее не устраивать. И что в результате? Сгорело имущество, нанесен урон экологии. Причем если кто-то считает, что это проблема собственника имущества, то он ошибается, хотя бы потому, что в результате уменьшился ВВП нашей страны. Что-то подсказывает нам, что владелец ангара после пожара был бы непротив, если бы его “покошмарили” до того, как у него сгорело несколько миллионов. Вместо этого ему предлагают “инновационные” и современные методы контроля — страхование, пожарный аудит и т. п., причем исключительно в целях его защиты.

При этом никто не принимает во внимание тот факт, что страховщик или эксперт аудиторской компании — это тот же инспектор, только без погон. Как следствие, этот проверяющий будет зависим от своего нанимателя — от того, кого он должен проверять, что сводит на нет весь смысл проверки.

Схема страхования в своей основе, на первый взгляд, кажется логичной:

- 1) закон предписывает страховать риски, т. е. вносить в страховой фонд определенную сумму;
- 2) бизнес сам выбирает страховщика;
- 3) страховщик оценивает объект, в том числе смотрит на выполнение правил при эксплуатации;
- 4) при нарушении правил бизнес платит столько, чтобы страховать ему было невыгодно.

Схема могла бы работать, если бы не одно “но”: бизнес сам выбирает страховщика.

Предположим, придет компания № 1 и скажет: “Заплатите 1 млн. рублей, у вас много нарушений, иначе мы вас не застрахуем”. Тогда предприниматель подумает о том, чтобы найти другого страховщика, погибче, полаяльнее. Компания № 2, в свою очередь, предлагает оформить страховой полис за 100 тыс. руб. Понятно, что бизнес выберет вторую фирму. Понятно также, что эта фирма может обанкротиться и вообще ничего не выплатит. Те, кто пытался что-то получить от страховых компаний, понимают это очень хорошо.

В результате ничего не изменилось: нарушения требований безопасности как были, так и остались, а пожаров меньше не стало.

Утверждение о том, что собственники бизнеса заинтересованы в сохранности своего имущества, в большинстве случаев не работает. Главный интерес бизнеса — прибыль, поэтому ко всем требованиям пожарной безопасности он относится, как к излишним и неэффективным расходам, потому что пожар может быть, а может и не быть.

Павел Казимирович Яворовский, один из основоположников пожарного дела в России, высказывал по этому поводу следующее мнение: *“При попытке дать объяснение такого явления приходится предположить, что в былые времена боязнь потерять свое имущество от пожара была больше, чем теперь... Отчасти под влиянием улучшения мер огнетушения, ...вследствие расширения и удешевления страхования от огня: в настоящее время можно встретить немало количество владельцев имущества, которые на все указания о необходимости противопожарных улучшений в их владениях равнодушно и безапелляционно отвечают: “У меня все застраховано!” ...Вот главный мотив”* [8].

Таким образом, удешевление страховых услуг в области пожарной безопасности приведет только к ослаблению значимости средств пожарной безопасности и к пренебрежению правилами со стороны бизнеса.

К таким же результатам уже приводит пожарный аудит со стороны частных компаний, поскольку “неудобного” эксперта независимой оценки пожарного риска можно подвинуть, убрать, расторгнуть

с ним договор. Это позволяет нам опровергнуть третий постулат, который столь же далек от реальности, сколь и наивен.

Постулат № 3. Бизнес добросовестен, и его нужно защищать от пожарных, так как защита имущества и людей в его же интересах, и он понимает это сам.

Как следует из подборки фотографий (рис. 6), интересы предпринимателя вовсе не в соблюдении требований и обеспечении пожарной безопасности.

На одной чаше весов интересы бизнеса, причем он расценивает их как возможность делать все, что ему вздумается, при полной поддержке МЧС, которое внедряет риск-ориентированный подход и главная задача которого вовсе не обеспечение пожарной безопасности. На другой чаше — безопасность людей, тех самых третьих лиц, которые пользуются услугами предпринимателей. И что им делать?

Если обратиться с жалобой в МЧС, то министерство начнет согласовывать проверку с прокуратурой, что займет очень много времени. А незамедлительные проверки могут быть разрешены только при наличии угрозы для жизни, но само понятие “угроза жизни” не определено на законодательном уровне.

Конечно, всегда можно сказать, что “если что-то произойдет, бизнес за все ответит”. Однако при таком подходе теряется смысл деятельности пожарной охраны, одной из задач которой является *предотвращение* беды.

Резонансный пожар в типографии, происшедший в августе 2016 года, директор предприятия, несущий ту самую ответственность, назвал “несчастливым случаем”. Но какой же это несчастный случай, если руководство типографии само дало разрешение на проживание 17 чел. на территории объекта? Данный пример показывает, что бизнес далеко не добросовестен и может сознательно допускать гибель людей. И самое главное, то, что кого-то потом привлекут к ответственности, не вернет этих 17 чел.

Проблемы в результате внедрения риск-ориентированного подхода можно сформулировать следующим образом:

1. Недостовверные методы оценки риска не учитывают нарушений требований пожарной безопасности людьми на этапе эксплуатации объектов защиты.
2. Обеспечение соблюдения эксплуатационных требований негосударственными мерами (страхование и независимая оценка пожарного риска) неэффективно, так как в существующих реалиях всегда найдется специалист, который будет действовать в интересах не пожарной безопасности, а собственника.



Рис. 6. Интересы малого бизнеса как они есть. Люди? Выход при пожаре? А товар куда ставить? Снимать дополнительные площади? Караул, “кошмарят”!!!

3. *Собственники не знают требований пожарной безопасности, ставят их ниже интересов получения прибыли.*

Все сказанное можно подтвердить небольшим анализом статистических данных.

Что говорит об этом статистика?

Официальная статистика МЧС легко регулируется изменением правил статистического учета. Все достаточно просто. Достаточно считать жертвой пожара человека, умершего непосредственно в горящем здании, а не в больнице в течение месяца, и число погибших пойдет вниз. Достаточно считать некоторые пожары “возгораниями”, и количество их в течение отчетного периода также пойдет на убыль. Поэтому реальное положение дел в этом направлении характеризуется именно крупными пожарами, их частотой и количеством жертв. Резонансные ЧС нельзя назвать “возгоранием” и исключить из учета, поэтому их количество, масштаб и частота сейчас наиболее объективный показатель уровня противопожарной защиты.

В период с 1977 по 2001 гг. было зарегистрировано несколько крупных пожаров площадью несколько тысяч квадратных метров с многочисленными жертвами. Перечислим их:

1977 г. В гостинице “Россия”. Погибли 42 чел., пострадали 52 чел.;

1991 г. В гостинице “Ленинград”. Погибли 16 чел., из них 9 сотрудников пожарной охраны;

1993 г. На заводе “КамАЗ”. Площадь пожара — более 8000 м²;

1999 г. В здании Самарского главного управления внутренних дел. Погибли 57 чел.;

2001 г. На телебашне “Останкино”. Погибли сотрудник пожарной охраны и два работника телебашни.

В период с декабря 2001 по 2017 гг. произошло 18 крупных пожаров:

- 1) **2003 г.** В школе поселка Сыдыбыл (Якутия). Погибли 22 ученика, 39 детей получили ожоги;
- 2) **2003 г.** В республиканской школе-интернате для глухих детей (Махачкала). Погибли 28 мальчиков от 8 до 14 лет;
- 3) **2004 г.** В московском Манеже площадью около 6500 м². При тушении пожара погибло двое пожарных. Манеж сгорел полностью;
- 4) **2004 г.** В общежитии Российского университета дружбы народов. Погибли 43 чел.;
- 5) **2006 г.** В отделении “Сбербанка России” во Владивостоке. Погибли 9 чел., из них 8 женщин в возрасте 24–35 лет; 17 чел. получили травмы и ожоги;

- 6) **2007 г.** В доме-интернате для престарелых и инвалидов в одной из станций Краснодарского края. Погибли 63 чел., пострадали 29 чел.;
- 7) **2007 г.** В старом здании Московского института государственного и корпоративного управления. Из-за позднего сообщения о возгорании и заблокированного эвакуационного выхода погибли 11 чел.;
- 8) **2009 г.** В клубе “Хромая лошадь” в Перми — крупнейший по числу жертв пожар в постсоветской России. Погибли 156 чел.;
- 9) **2015 г.** В библиотеке Института научной информации по общественным наукам РАН. Площадь возгорания — более 2000 м²; уничтожен большой объем научной информации;
- 10) **2015 г.** В торговом центре “Адмирал” в Казани. Площадь возгорания — около 4000 м². Погибли 17 чел., в том числе один пожарный. Трое сотрудников ТЦ получили травмы и ожоги;
- 11) **2015 г.** На территории Тушинского машиностроительного завода: склад с бытовой химией и три пятиэтажных административных здания. Общая площадь пожара — 15 000 м²;
- 12) **2016 г.** На Тымлатском рыбокомбинате на Камчатке, одном из крупнейших рыбопромышленных заводов региона. Комплекс был уничтожен огнем на 70 %, площадь пожара — 10 000 м²;
- 13) **2016 г.** В складском помещении в здании бывшей типографии (Москва). Погибли 17 чел.;
- 14) **2016 г.** На складе искусственных цветов на Амурской ул. в Москве. Погибли восемь пожарных. Площадь пожара — 4000 м²;
- 15) **2016 г.** На крупном складе мебели в Истринском районе Московской области. Площадь пожара — 13 000 м²;
- 16) **2017 г.** На рынке в Мытищах. Площадь пожара — 4000 м²;
- 17) **2017 г.** В жилом доме в Краснодаре. Площадь пожара — 1500 м²;
- 18) **2017 г.** В ангарах в Щелково. Площадь пожара — 2300 м².

Примечательно, что именно в период глобального сокращения ГПН (последние два года) количество пожаров, их масштаб и последствия увеличились в десятки раз.

Почему таких масштабных пожаров не возникало с такой пугающей частотой до 2001 года? Возможно, потому, что у пожарной охраны были иные задачи, в большей степени отвечающие ее предназначению; потому, что пожарный надзор не считался “черной дырой” и в первой редакции федерального закона о пожарной безопасности для инспектора были предусмотрены такие права, как: “*утверждать*

самостоятельно... обязательные для исполнения... нормативные документы”, “*проводить обследования..., в том числе и в нерабочее время*”, “*входить беспрепятственно*”, “*участвовать с правом решающего голоса*”, “*приостанавливать полностью или частично*” и т. п. (ст. 6 [9]). Может быть, потому, что такой подход был ориентирован именно на главную и единственную причину пожаров — Человека, и его, человека, отношение к правилам, которые нужно соблюдать, что подводит нас к самому важному вопросу.

Что делать?

Именно из-за того, что причина всех пожаров на объектах, построенных и эксплуатируемых человеком, он сам, пожарная безопасность давно перестала быть проблемой только инженерно-технической. Все, что нужно, для того чтобы человек поборол пожар, уже придумано.

Теперь пожарная безопасность — это почти исключительно вопрос борьбы с незнанием и нежеланием жить и работать по правилам.

А с этим бороться можно двумя способами. Первый путь, отрицаемый всей современной политикой МЧС, — надзор, контроль, принуждение. Второй — обучение, воспитание, пропаганда. И первый путь МЧС отрицает, и второй не развивает. С этой стороны тоже все неладно.

Единственный документ МЧС, который регулирует обучение мерам пожарной безопасности, — приказ МЧС об обучении № 645. Однако этот документ не актуализировался с 2008 года. В нем все еще указаны Правила пожарной безопасности, отмененные пять лет назад. В нем множество противоречий. Во многих его положениях просто отсутствует логика. Какого результата, кроме пожаров площадью 15 тыс. м², можно ожидать, при таком внимании к обучению?

Необходимо с детства проводить обучение основам пожарной безопасности и формировать соответствующую культуру; вводить в школах уроки пожарного дела; формировать культуру не столько безопасности, сколько соблюдения правил как таковых, опираясь на теорию “разбитых окон”; проводить такое обучение с 1-го по 11-й классы; ввести учебную дисциплину “Пожарная безопасность” в вузы, уже применительно к специальности студента, не допускать регистрации юридических лиц без прохождения обучения мерам пожарной безопасности. Подождать, пока сменится пара поколений, и только тогда можно будет применять риск-ориентированный подход.

А пока мы постоянно сталкиваемся с тем, что автоматика на объектах выключается собственниками, чтобы “не дай бог не сработала”; эвакуацион-

ные выходы блокируются, чтобы никто не заходил; двери, препятствующие распространению пожара, фиксируются, чтобы не мешать проходу людей; с пожарных извещателей годами не снимают защитные колпачки, которые устанавливались на них при монтаже. Так о какой добросовестности бизнеса, собственника, человека все говорят? Какое ослабление надзора? Вам мало 18 крупных пожаров? Так будут еще.

Пока не поздно, государству нужно не только вернуть пожарному инспектору все права, но и наделить его новыми. Дать ему право при обнаружении нарушений правил пожарной безопасности на месте требовать их устранения вне зависимости от того, его это объект или нет, и на месте привлекать

нарушителей к ответственности. Нужно вывести пожарный надзор из-под действия Федерального закона о защите прав юридических лиц и параллельно заниматься обучением, улучшать нормы, совершенствовать деятельность ГПН, а не уничтожать его.

Пока не поздно, представителям “ОПОРА России” нужно защищать бизнес не от пожарного надзора, а от ошибок, которые совершают сами предприниматели. Для бизнеса, как основного виновника пожаров, необходимо ввести “презумпцию виновности”. В противном случае количество жертв и объемы ущерба будут расти в геометрической прогрессии. И снова придется готовить доклад Президенту под названием “Горящая Россия–2”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Н. За минуту до взрыва : очерк. — В сб. : Вызываем огонь на себя. — М. : Изд-во “Робин”, 1998. — С. 307.
2. Электронное периодическое издание “Лента.ру”. URL: https://lenta.ru/news/2016/09/05/fire_fighting/ (дата обращения: 20.05.2017).
3. Холицевников В. В. Памяти Всеволода Михайловича Предтеченского // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 10. — С. 10, 11.
4. Борисов Т. Придут по форме // Российская газета. — Федер. вып. № 7258(92). URL: <https://rg.ru/2017/04/27/mchs-podgotovilo-proekt-osnov-gospolitiki-v-oblasti-pozharnoj-bezopasnosti.html> (дата обращения: 20.05.2017).
5. Абдурагимов И. М. Еще раз о принципиальной невозможности выполнения расчетов пожарных рисков детерминированными методами // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 6. — С. 13–23.
6. Сотрудники МЧС опасаются реформ в пожарном надзоре из-за ареста коллег в Архангельске // Сетевое издание “News29.ru”. — 13.04.2017. URL: http://www.news29.ru/m/obschestvo/Sotrudniki_MChS_opasajutsja_reform_v_pozhnadzore_iz_za_aresta_kolleg_v_Arhangelske/63002/ (дата обращения: 20.05.2017).
7. Грекова О. Расчет пожарного риска применяется в редких случаях : интервью с А. Гилетичем // Московский комсомолец. — 19.10.2009. — С. 7.
8. Яворовский П. К. Об условиях безопасного в пожарном отношении возведения строений. — Тверь : Изд-во журнала “Страховое дело”, 1914. — С. 16, 17.
9. О пожарной безопасности : Федер. закон РФ № 69-ФЗ от 21.12.1995. — М. : Кодекс, 1996. — С. 7.

Материал поступил в редакцию 31 мая 2017 г.

Для цитирования: Князев П. Ю., Савельев Л. Н. Презумпция виновности или “Горящая Россия–2” // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 6. — С. 70–78.

For citation: Knyazev P. Yu., Savelyev L. N. Presumption of innocence or “Russia in fire–2”. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 70–78 (in Russian).

**ВОПРОС:**

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

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

ОТВЕТ:

Для большинства электромонтажников не секрет, что, помимо низкой прочности и хрупкости, наиболее значимыми минусами использования алюминия является его окисление на воздухе, свойство текучести (ползучести) под нагрузкой и формирование гальванической пары при попадании на него влаги. Возникают проблемы и при замене части алюминиевой проводки на медную.

Контактные соединения медных и алюминиевых проводников, подвергающиеся значительным перегревам, из-за больших переходных сопротивлений представляют повышенную пожарную опасность. Алюминий имеет отличающийся от меди температурный коэффициент расширения, что приводит к постепенному ухудшению контактного соединения между проводниками. Кроме того, такие соединения обязательно следует защищать от воздействия влаги с помощью покрытия двух металлов третьим, что зачастую занимает очень много времени. Серьезную проблему представляет образование на поверхности алюминия оксидной пленки, в результате чего алюминий плохо поддается пайке, так как температура плавления пленки составляет 2050 °С, а самого металла — 660 °С. Пленка с трудом поддается удалению, поэтому для этой цели следует пользоваться специальными кварце- или цинковазелиновыми пастами [1] и защитной электросетевой смазкой (ЗЭС). Саму пайку следует выполнять оловянно-свинцовыми припоями, содержащими не менее 50 % олова (ПОС50, ПОС61, ПОС90), а в качестве флюса (для удаления оксидов с поверхности) применять минеральное масло.

К пожароопасным ситуациям приводит и присущее алюминию свойство текучести в местах контактных зажимов (клеммные коробки, сжим под болт и т. п.). Алюминий, так же как медь и железо, имеет кубическую кристаллическую структуру. В узлах его атомных решеток вместо атомов находится определенное количество пустых мест (вакансий). Например, у распространенной марки алюминия АД0Е (международное обозначение 1350, содержание алюминия 99 %) таких вакансий в 20 раз больше, чем у стали и меди, поэтому при постоянной нагрузке в местах зажима структура алюминия ослабевает и металл начинает перемещаться из зоны с большим давлением в зону с меньшим. В конечном счете такой процесс приводит к ослаблению контакта и необходимости его периодической протяжки (обычно 1 раз в 6 мес.), что создает дополнительные сложности для электромонтажников.

При взаимодействии влаги с поверхностью алюминия происходит химическая реакция с образованием гальванических пар. В результате этого алюминий начинает выступать в роли отрицательного электрода с отделением от него частиц металла, что в итоге ведет к постепенному разрушению проводника и уменьшению площади его поперечного сечения, а значит, к дополнительному перегреву.

Еще одним известным недостатком алюминия является высокое удельное электрическое сопротивление ($\rho_{\text{Al}} = 0,0271 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) по сравнению с медью ($\rho_{\text{Cu}} = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$). Этот факт в значительной степени влияет на величину допустимых длительных токов и сечения проводников, а значит, и на удобство их прокладки и монтажа. По этой причине применение проводов с меньшим сечением (т. е. медных) получило большее распространение в монтажной практике, а такие распространенные марки проводов с алюминиевыми жилами, как АПВ, АПРТО, АПР и др., почти не используются для устройства электропроводки в жилых и общественных зданиях.

С учетом этого согласно пп. 7.1.34 и 7.2.51 ПУЭ [2] допускается прокладка проводов с алюминиевыми жилами сечением не менее 16 мм². Для питания отдельных электроприемников, относящихся к инженерному оборудованию зданий (насосы, вентиляторы, калориферы, установки кондиционирования воздуха и т. п.), могут использоваться провода или кабели с алюминиевыми жилами сечением не менее 2,5 мм² [2]. Указанные требования пред-

ставлены также в ч. 15 актуализированной версии СП 31-110– 2003 (СП 256.1325800.2016) [3].

Все вышеперечисленные особенности алюминия и ограничения в его применении создают негативное отношение к нему и его использованию в качестве электропроводки.

В то же время у данного металла есть определенные преимущества. В первую очередь к ним можно отнести малый вес и низкую стоимость алюминия по сравнению с медью. Хотя вынужденное применение алюминиевых жил с большим сечением сводит на нет его преимущество в весе, низкая стоимость алюминия остается его важным достоинством. Именно поэтому на сегодняшний день при прокладке ЛЭП лучшим решением считается прокладка проводов известной марки СИП (самонесущий изолированный провод) с алюминиевыми жилами.

Если сравнить ресурс алюминиевой проводки с медной, то окажется, что он практически одинаков и не превышает 25–30 лет.

Окисление алюминия является не только его минусом, но и плюсом с позиции долговечности и неподверженности коррозии. При качественном выполнении изоляции жил можно добиться безопасной эксплуатации алюминиевой проводки и исключения ее окисления. Для отдельных видов производств даже предпочтительнее использовать алюминиевые проводники, так как медь подвергается воздействию химически агрессивной среды и быстро разрушается.

Для соединения алюминиевых проводов малых сечений выпускаются специальные зажимы, имеющие смазку, препятствующую окислению проводников, что позволяет добиться низких переходных сопротивлений в местах контакта. Такое соедине-

ние можно выполнить с использованием медно-алюминиевых гильз (ГМА), винтообразного соединения с установкой шайб Гровера (гровер, пружинные шайбы) и клемм с защитной пастой. Следует отметить, что такие клеммы следует применять только в осветительной сети с малой нагрузкой, так как протекание больших токов приводит к нагреву внутренних пружин клемм и ухудшению качества контакта.

С учетом современных разработок в области улучшения свойств и характеристик алюминия можно говорить о возможности его применения в качестве кабельного изделия для жилых и общественных зданий без действующих в настоящее время ограничений.

*Продолжение темы (часть 2)
см. в рубрике “Вопрос – Ответ” в № 7' 2017
журнала “Пожаровзрывобезопасность”.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 10434–82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования (в ред. 25.05.1991). — Введ. 01.01.1983. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 1982.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). — 6-е изд. — М. : Энергоатомиздат, 1986.
3. СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа. — Введ. 02.03.2017. — М. : Минстрой России, 2016.

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

Георгий Михайлович МАХВИЛАДЗЕ

01.05.1945 – 31.05.2017



С прискорбием сообщаем, что после тяжелой продолжительной болезни скончался выдающийся российский ученый, доктор физико-математических наук, профессор **Георгий Михайлович Махвиладзе**.

Г. М. Махвиладзе окончил Московский физико-технический институт в 1969 г. Много лет он работал в Институте проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, где прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией термогазодинамики. С 1993 по 2010 гг. он возглавлял научный центр по изучению пожаров и взрывов в университете центрального Ланкашира, став первым в Великобритании профессором по пожарной инженерии, а впоследствии был избран почетным профессором этого университета.

Георгия Михайловича отличала широта и многогранность научных интересов, искренняя любовь и преданность науке. Он является одним из авторов классической отечественной книги “Математическая теория горения и взрыва”, ставшей настольной книгой специалистов в области горения как в нашей стране, так и за рубежом. Основным направлением научной деятельности Г. М. Махвиладзе было применение вычислительных методов для решения задач ламинарного и турбулентного горения, газовой динамики, горения дисперсных систем, пожаровзрывобезопасности, исследования аварийных ситуаций и катастроф.

Георгий Михайлович обладал уникальной способностью объединять вокруг себя коллег и единомышленников, щедро делился своими знаниями и опытом с учениками. Его отличали доброта, отзывчивость, неиссякаемый оптимизм, простота и сердечность.

Светлая память о Георгии Михайловиче Махвиладзе навсегда останется в сердцах его коллег.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал “ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ” статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т. п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

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

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

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены в редакцию в электронном виде по адресу info@fire-smi.ru.

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

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

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

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

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

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

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

2.3. Информация об авторах.

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

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

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома, а также контактные телефоны и электронный адрес всех или хотя бы одного из авторов. При этом не следует приводить составные части названий организаций, обозначающие принадлежность ве-

домству, форму собственности, статус организации (например, “Учреждение Российской академии наук...”, “Федеральное государственное унитарное предприятие...”, “ФГОУ ВПО...” и т. п.), так как это затрудняет идентификацию организации. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

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

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

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

- информативным (не содержать общих слов);
- оригинальным (не быть калькой с русскоязычной аннотации с дословным переводом);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т. е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 250–300 слов.

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

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

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

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

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

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

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.6. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т. п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов “and” (и), “of” (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей “a”, “the” и т. п.

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

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

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

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ.

Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

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

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

2.8. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

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

Не менее половины источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

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

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей науч-

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

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

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

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

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

При составлении References необходимо следовать схеме:

- авторы (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа вверх флажок “Американская (для визы США)”; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т. п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

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

3. К статьям следует прилагать рецензию стороннего специалиста (т. е. он не должен быть связан с местом работы (учебы) авторов статьи), которая должна быть подписана рецензентом (с указанием его Ф. И. О., ученого звания, ученой степени, должности, места работы), заверена отделом кадров (ученым секретарем) и печатью. Все рецензенты должны являться признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и иметь в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Обращаем Ваше внимание, что рецензент не должен входить в Редакционный совет нашего журнала.

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

5. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента. Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

6. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати.

Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, предоставившие рукопись для публикации в журнале “Пожаровзрывобезопасность”, согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!

ISSN 0869-7493

Продолжается
подписка
на журнал

2017

ПОЖАРОВЗРЫВО- БЕЗОПАСНОСТЬ



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

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

ВНИМАНИЕ! АКЦИЯ!

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

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

* Доставка осуществляется за счет покупателя согласно тарифам почты РФ.

Выставка оборудования и систем
для обеспечения безопасности
и противопожарной защиты



securika
Siberia



Новосибирск

27–29
сентября
2017

МВК «Новосибирск Экспоцентр»

Получите электронный билет
securika-siberia.ru



Системы
видеонаблюдения



Системы
оповещения
и сигнализации



Системы
контроля доступа



Противопожарное
оборудование



Организатор
ITE Сибирь
+7 (383) 363 00 63
security@sibfair.ru

Генеральный
информационный
партнер

 **Индустрия
Безопасности**
SecurityMedia Rus

Стратегический
информационный
партнер

