

9-2017

ПОЖ Издательство
НАУКА

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

ОБЕСПЕЧЕНИЕ
БЕЗОПАСНОСТИ ЛЮДЕЙ
В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ
ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ



№ 9 ТОМ 26
2017

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 15.09.2017.

Выход в свет 25.09.2017.

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

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

GENERAL QUESTIONS OF COMPLEX SAFETY

КОПЫЛОВ Н. П., ПИВОВАРОВ В. В., ПРОНИН Д. Г.
Обеспечение безопасности людей
в жилых зданиях повышенной этажности

5

KOPYLOV N. P., PIVOVAROV V. V., PRONIN D. G.
Ensuring the safety of people in residential
high-rise buildings

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

ПОЛЕТАЕВ Н. Л.
О взрывоопасности аэрозвеси меламина

15

POLETAEV N. L.
On explosibility of melamine dust/air mixture

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

КАЛАЧ А. В., КРУТОЛАПОВ А. С.,
КОРОЛЕВ Д. С., КАЛАЧ Е. В.
Расчет категории помещения на основе методики
прогнозирования пожароопасных свойств
продуктов нефтепереработки

29

KALACH A. V., KRUTOLAPOV A. S.,
KOROLEV D. S., KALACH E. V.
Calculation of category of premises on the basis
of the method of forecasting fire-proof properties
of oil-refining products

ИВАНОВ А. В., МИФТАХУТДИНОВА А. А.,
НЕФЕДЬЕВ С. А., СИМОНОВА М. А.,
МАСЛАКОВ М. Д.
Условия стабилизации наноструктур
для безопасной транспортировки
легковоспламеняющихся жидкостей

35

IVANOV A. V., MIFTAKHUTDINOVA A. A.,
NEFEDYEV S. A., SIMONOVA M. A.,
MASLAKOV M. D.
Conditions for the stabilization
nanostructures for the fireproof transport
flammable liquids

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

ХОЛЩЕВНИКОВ В. В., СЕРКОВ Б. Б.
Значимость автоматических систем
противопожарной защиты для обеспечения
безопасности людей в высотных зданиях

44

KHOLSHCHEVNIKOV V. V., SERKOV B. B.
Importance of automatic fire protection
systems to ensure the safety of people
in high-rise buildings

СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

STATISTICS AND SYSTEM ANALYSIS

ТАРАНЦЕВ А. А., ХОЛОСТОВ А. Л., ТАРАНЦЕВ А. А.
Анализ и синтез систем массового обслуживания
с разнотипными заявками в задачах обеспечения
безопасности объектов

54

TARANTSEV A. A., KHOLOSTOV A. L., TARANTSEV A. A.
Analysis and synthesis of queuing systems
with diverse applications in problems
the safety of objects

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

ФЕЩЕНКО А. Н., МАКАРОВ С. А.,
МОЛЧАНОВ В. П., ТРЕТЬЯКОВ А. В., ВОЕВОДА С. С.
Определение кратности пленкообразующей пены
для подслоного тушения пожаров
горючих жидкостей

65

FESHCHENKO A. N., MAKAROV S. A.,
MOLCHANOV V. P., TRETYAKOV A. V., VOEVODA S. S.
Determination of frequency rate of film forming
foam for sublayer suppression of the fires
of combustible liquids

ВОПРОС – ОТВЕТ

74

QUESTION – ANSWER



Безопасность людей в жилых зданиях повышенной этажности

Стр. 5



Расчет категории сооружений и помещений нефтегазовой отрасли

Стр. 29



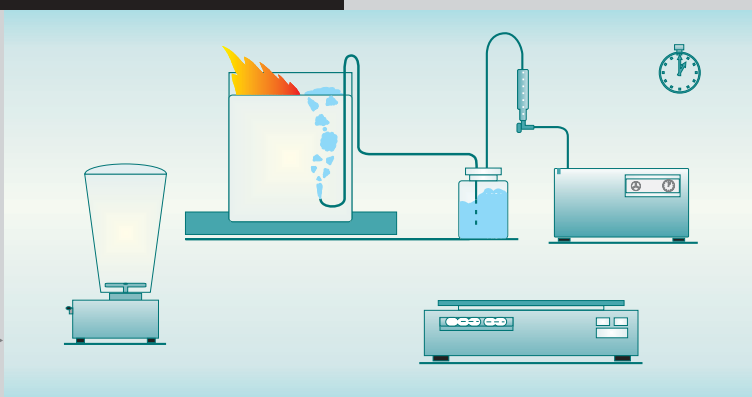
Стабилизация наноструктур для безопасной транспортировки ЛВЖ

Стр. 35



Автоматические системы противопожарной защиты высотных зданий

Стр. 44



Кратность пены для подслоного тушения пожаров ГЖ

Стр. 65

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



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 15.09.2017.

Date of publication 25.09.2017.

Format is 60x84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing.

Printed at "DIALOG", Ltd.

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

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В. В. ПИВОВАРОВ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, руководитель Центра нормирования в области пожарной безопасности, Национальная академия наук пожарной безопасности (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

Д. Г. ПРОНИН, канд. техн. наук, начальник Управления технического регулирования, ЦНИИП Минстроя России (Россия, 119331, г. Москва, просп. Вернадского, 29; e-mail: pronin.dg@mail.ru)

УДК 05.26.03

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЛЮДЕЙ В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ

Дан анализ пожарной опасности высотных жилых зданий. Приведены требования действующих нормативных документов в области обеспечения безопасности людей в жилых зданиях повышенной этажности. Анализируется практика применения указанных нормативных требований в Российской Федерации. Сравниваются действующие отечественные нормы и нормы Национальной ассоциации противопожарной защиты (NFPA) США в части проектирования жилых зданий. Рассматриваются технические характеристики и особенности применения пожарно-спасательной техники, предназначенной для использования при пожарах в высотных жилых зданиях. Предложены мероприятия по повышению противопожарной защиты высотных жилых зданий.

Ключевые слова: пожарная опасность; безопасность людей; жилые здания повышенной этажности; нормативные требования; пожарно-спасательная техника; противопожарная защита; автоматическая установка пожаротушения; средство автоматического обнаружения и предупреждения пожара.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.5-14

Введение

Ежегодно на жилой сектор приходится около 70 % от общего числа пожаров в Российской Федерации. Основное количество пожаров в жилье происходит по так называемым непрофилактируемым причинам, т. е. по вине людей, находящихся в состоянии ограниченной дееспособности [1].

В жилых домах гибнет более 90 % от общего количества погибших в Российской Федерации. Основной причиной гибели людей при пожарах является действие продуктов горения (до 68 % от общего числа погибших) и высокой температуры (до 7 % от общего числа погибших). Основным фактором, обуславливающим гибель людей при пожарах, по-прежнему остается состояние алкогольного (наркотического) опьянения (более 40 % от общего числа погибших).

Для зданий повышенной этажности (далее — ЗПЭ) характерно быстрое развитие пожара по вертикали и большая сложность спасательных работ. Продукты горения распространяются в сторону лестничных клеток и шахт лифтов со скоростью более 10 м/мин. В течение нескольких минут здание полностью задымляется, и находится в помещениях

без средств защиты органов дыхания невозможно. Наиболее интенсивно происходит задымление верхних этажей, особенно с подветренной стороны.

От высокой температуры управление лифтами выходит из строя и кабины блокируются в шахтах. Быстро установить место нахождения лифта при отключенном электропитании не представляется возможным и находящиеся в них люди погибают. При пожаре на верхних этажах большую сложность представляет разведка пожара, спасение людей и подача средств тушения.

Как показывают опыты, видимость при пожаре в межквартирном коридоре близка к нулю, а температура у пола достигает 70–80 °С. При открывании двери между коридором и лестничной клеткой последняя начинает сильно задымляться. Скорость движения дыма в лестничной клетке составляет от 0,5 до 1,0 м/с.

Следует также добавить, что фактором, существенно повышающим пожарную опасность многоэтажных зданий и ЗПЭ, является высокая вероятность позднего обнаружения пожара в случае отсутствия или нахождения в неисправном состоянии соответствующих систем пожарной автоматики.

Это обстоятельство вкупе с высокой плотностью проживающих обуславливает необходимость отнесения многоэтажных жилых зданий к объектам повышенного риска.

Насыщение жилых зданий горючими предметами, синтетическими изделиями и разнообразной бытовой техникой, с одной стороны, увеличивает потенциальную вероятность возникновения пожара, а с другой — делает даже самый незначительный пожар опасным для жизни и здоровья людей из-за выделения ядовитых газов при горении синтетических материалов.

Существенными источниками пожарной опасности являются подвалы, чердаки, санитарно-кухонные узлы.

В связи с изложенным представляется целесообразным провести анализ нормативных документов, устанавливающих требования к обеспечению безопасности людей в жилых зданиях повышенной этажности, особенностей пожарно-спасательной техники и практики ее применения в целях выработки предложений по повышению противопожарной защиты высотных жилых зданий.

Таким образом, задачей настоящей работы является проведение анализа нормативных документов, устанавливающих требования к обеспечению безопасности людей в жилых зданиях повышенной этажности, особенностей пожарно-спасательной техники и практики ее применения. Цель работы — подготовка предложений по повышению противопожарной защиты высотных жилых зданий.

Нормативные требования

В настоящее время проектирование жилых зданий повышенной этажности регламентируется требованиями СП 54.13330.2011 [2]. Действие документа распространяется на проектирование жилых зданий высотой до 75 м. В СП 4.13130.2013 [3] также устанавливается ограничение области применения 75 м.

Для жилых зданий высотой более 75 м, зданий иного функционального назначения высотой более 50 м, а также для особо сложных и уникальных зданий, кроме соблюдения требований действующих нормативных документов, должны разрабатываться специальные технические условия, отражающие специфику их противопожарной защиты, включая комплекс дополнительных инженерно-технических и организационных мероприятий.

Анализ отечественных и зарубежных противопожарных требований в области проектирования жилых зданий показывает, что концептуально отечественные нормы близки к американским (NFPA) [4]. В связи с этим представляет интерес сопоставление действующих противопожарных требований Россий-

ской Федерации и США, тем более что в США наблюдается существенная положительная динамика по обстановке с пожарами в жилом секторе.

Сравнительный анализ отечественных и американских требований показывает, что нормы NFPA по ряду вопросов существенно жестче. Требования NFPA допускают предусматривать один эвакуационный выход из жилого блока для проектируемых и существующих многоквартирных зданий лишь в тех случаях, когда здания защищены автоматическими установками пожаротушения (АУП) либо когда безопасная эвакуация по единственному пути эвакуации является практически гарантированной.

Что касается отечественных норм, то здесь прослеживается расчет на работу спасательной пожарной техники. К сожалению, практика показывает, что такой расчет не всегда оправдан и приводит зачастую к трагическим последствиям. Это в первую очередь относится к ЗПЭ.

В соответствии с нормами NFPA многоквартирные здания высотой более 3 этажей и количеством жилых блоков более 11 следует оборудовать системами обнаружения и оповещения о пожаре за исключением случаев, когда каждый жилой блок отделен от смежных жилых блоков противопожарными преградами с пределом огнестойкости не менее 45 мин, а также каждый жилой блок имеет собственный независимый выход или независимую лестницу (рампу), ведущую к отметке земли.

Независимо от количества этажей и числа квартир в каждом жилом блоке должны быть установлены дымовые пожарные извещатели. В случае их срабатывания должен выдаваться сигнал, слышимый в спальнях комнатах жилого блока. Такие извещатели устанавливаются в дополнение к спринклерным системам и системам оповещения.

Автономные дымовые извещатели (для зданий, не защищенных АУП) следует устанавливать в спальнях комнатах.

Требования по оборудованию жилых зданий системами оповещения о пожаре и управления эвакуацией изложены в СП 3.13130.2009 [5]. В соответствии с указанными документами для *жилых зданий секционного типа высотой менее 10 этажей* предусматривать системы оповещения не требуется. Для *жилых зданий секционного типа высотой 10 этажей и более* необходимо предусматривать оповещение о пожаре звуковым сигналом. Допускается также установка световых указателей направления движения и указателей “ВЫХОД”.

Анализ перечисленных требований показывает, что нормами США предусмотрено оборудование средствами автоматического обнаружения и оповещения о пожаре *практически всех жилых зданий*. Указанный элемент противопожарной защиты ока-

зывает существенное влияние на обеспечение безопасности людей при пожаре. Так, по данным статистики США увеличение числа установок обнаружения и оповещения о пожаре в жилых домах с 5 до 60 % в течение 15 лет привело к снижению гибели людей в результате пожаров с 12000 до 5000 чел. ежегодно.

В соответствии с нормами NFPA все новые многоквартирные здания должны быть защищены АУП. В качестве АУП в жилых зданиях используют водяные спринклерные установки пожаротушения, которые более чем за вековой период применения показали свою эффективность и надежность.

Данные установки конструктивно просты и состоят из трубопроводов, заполненных водой под давлением, и установленных на них спринклерных оросителей. Спринклерные установки (далее — СУ) обеспечивают обнаружение пожара, сигнализацию и тушение или локализацию. Отличительной особенностью СУ, применяемых в жилом секторе, является использование в них специальных спринклерных оросителей, имеющих инерционные характеристики в три раза ниже по сравнению с обычными. Кроме того, в последние годы разработаны оросители для получения тонкораспыленных струй, что позволяет резко снизить расход воды на пожаротушение, быстро и с малыми проливами локализовать и ликвидировать очаг пожара.

В нашей стране разработана и выпускается элементная база СУ, отвечающая требованиям международных норм к жилым помещениям. Накоплен опыт создания систем быстрого срабатывания с подачей тонкораспыленных струй. Такими установками пожаротушения защищены, например, Останкинская телебашня, высотное книгохранилище Российской государственной библиотеки.

Однако широкому внедрению АУП в жилых зданиях мешает отсутствие нормативной базы. Ее создание требует проведения комплекса научно-исследовательских работ по широкому кругу вопросов, связанных со строительством и обеспечением зданий техническими средствами пожарной безопасности.

В отечественных нормах СП 5.13130.2009 [6] требование об обязательном оборудовании автоматической пожарной сигнализацией предъявляется лишь к жилым зданиям высотой более 28 м, а также к общежитиям и специализированным жилым домам для престарелых и инвалидов.

Следует отметить, что в настоящее время сделан серьезный шаг по ужесточению требований, направленных на защиту жилья от пожара. Так, в СП 54.13330.2011 [2] включены требования по защите жилых помещений автономными дымовыми пожарными извещателями. В состав норм включено также требование по оборудованию квартир отдельным

краном в комплектации с пожарным рукавом для целей пожаротушения на начальной стадии пожара до прибытия оперативных подразделений.

В 2016 г. на основании проведенных исследований [7, 8] был разработан СП 267.1325800.2016 [9], который содержит раздел по пожарной безопасности, в основном с требованиями к конструктивным решениям. В настоящее время ведется разработка свода правил, полностью посвященного вопросам пожарной безопасности высотных зданий.

Несмотря на требования нормативных документов в области оснащения высотных зданий средствами пожарной автоматики, жилой сектор практически не обеспечен техническими средствами для своевременного обнаружения загораний и передачи информации о пожаре, что не позволяет оперативно оповещать пожарные части. В результате пожарные подразделения прибывают к месту пожара на неоправданно поздней стадии его развития.

Имеющиеся нормативные документы, затрагивающие вопросы оснащения жилых зданий системами пожарной сигнализации, определяют только общие вопросы по необходимости наличия этих систем и не определяют их состав, порядок выбора и размещения технических средств обнаружения загораний с учетом особенностей развития пожаров в жилом секторе.

Действующая законодательная база не обязывает граждан применять какие-либо меры по противопожарной защите жилых помещений, что является одной из основных причин отсутствия средств обнаружения пожара в квартирах жилого сектора. Пропаганда среди населения необходимости оснащения своего жилья средствами пожарной сигнализации находится на недопустимо низком уровне.

Даже если в квартирах высотных зданий в соответствии с действующей нормативной базой установлены пожарные извещатели, они в большинстве случаев демонтируются квартиросъемщиком в процессе ремонтных работ и, как правило, после их завершения не восстанавливаются. Таким образом, жилые помещения оказываются лишенными средств пожарной сигнализации.

В нормативных документах не решены вопросы, касающиеся организационных мер по обеспечению требуемого уровня технического обслуживания систем пожарной сигнализации в жилом секторе, периодичности проверок их функционирования, по оперативному решению вопросов ремонта данных систем.

Помимо организационных вопросов, остаются нерешенными и экономические аспекты, такие как финансирование приобретения, монтажа, технического обслуживания и ремонта систем пожарной сигнализации, в частности вопросы взаимодействия

квартиросъемщиков и структур жилищно-коммунального хозяйства, ответственных за эксплуатацию систем пожарной сигнализации.

Таким образом, несмотря на требования нормативных документов, подавляющая часть высотных жилых зданий не оснащена системами пожарной сигнализации либо эти системы находятся в неработоспособном состоянии.

В жилом секторе, оснащенном системами пожарной сигнализации, причины неэффективной работы установок и, как результат, гибель людей, развитие крупных пожаров могут быть объяснены несовершенством нормативных документов, устанавливающих нормы и правила проектирования, монтажа и эксплуатации систем автоматической пожарной сигнализации в жилых зданиях.

Для повышения противопожарной защиты высотных жилых зданий представляется целесообразным провести комплекс определенных мероприятий. В первую очередь необходимо разработать и утвердить ряд нормативных документов, определяющих требования к порядку выбора технических средств обнаружения загораний в жилых зданиях и их расположению, с учетом особенностей развития пожаров в жилом секторе. В этих нормативных документах следует отразить вопросы, связанные с размещением приемно-контрольной аппаратуры и средств оповещения, а также с передачей тревожной информации на центральные пульты пожарной сигнализации.

Необходимо обратить особое внимание на принятие организационных мер по обеспечению требуемого уровня технического обслуживания систем пожарной сигнализации в жилом секторе, периодичности проверок их функционирования, а также по оперативному решению вопросов ремонта данных систем.

Не менее важно определить экономические и правовые аспекты, т. е. кто обеспечивает финансирование приобретения технических средств, их монтаж, пусконаладочные работы, эксплуатацию и техническое обслуживание, а также кто и какую ответственность несет за своевременное и полное проведение данных работ.

В нормативных и правовых актах следует определить ответственность граждан за поддержание технических средств пожарной сигнализации, установленных в их квартирах, в работоспособном состоянии. Представляется целесообразным ввести систему штрафов за демонтаж и осознанный вывод из строя средств пожарной сигнализации, установленных в квартирах, холлах, вестибюлях и на лестничных клетках жилых зданий.

Перспективным является использование аналоговых и адресно-аналоговых устройств в качестве

технических средств пожарной сигнализации, таких как извещатели и приемно-контрольные приборы. Применение аналоговой техники дает возможность отследить динамику развития возгораний, что позволяет обнаружить пожар на начальной стадии его развития. Использование адресных приборов обеспечивает возможность однозначного определения места возникновения возгораний.

Пожарно-спасательная техника

Из мобильной техники для тушения пожаров и проведения спасательных работ в ЗПЭ наибольшее распространение получили пожарные автолестницы (АЛ), подъемники и вертолеты. Для подачи огнетушащих веществ на тушение в высотных зданиях и сооружениях используются пожарные автомобили с насосами высокого давления и специальным гидравлическим оборудованием. Для обеспечения дымоудаления с путей эвакуации людей в ряде случаев может применяться мобильная техника дымоудаления.

В черте городской застройки используют спасательные устройства на автомобильных шасси: автолестницы, коленчатые или телескопические автоподъемники (АПК), а в последнее время — комбинацию двух спасательных механизмов — колен автолестницы и телескопического подъемника (ТПЛ).

Автолестницы традиционно применяют в странах Европы. Их основное назначение — спасение пострадавших из зданий. К преимуществам автолестниц относятся: относительно небольшие габариты, маневренность, мобильность; наличие спасательного лифта, позволяющего транспортировать пострадавшего без складывания колен; наличие аутригеров (опор) с регулируемой шириной, позволяющей машине работать в узких переулках (или в условиях, когда подходы к горящему зданию затруднены) при соответствующем ограничении рабочего поля; возможность работать на уклонах с градиентом до 15°.

Наибольшее распространение в Скандинавских странах и США получили автоподъемники, применяемые для тушения пожаров, с дополнительной функцией — спасением пострадавших.

К преимуществам автоподъемников относятся: эффективность при локализации и тушении пожаров в зданиях повышенной этажности, более высокая маневренность и оперативность разворачивания стрелы; высокая грузоподъемность спасательной корзины (400 кг), позволяющая транспортировать до 5 чел. одновременно; безопасность посадки пострадавших в спасательную корзину, которая может поворачиваться вправо-влево для параллельного контакта с объектом; наличие встроенного водопровода в стреле, обеспечивающего оперативность тушения

и проведения спасательных операций; возможность работать в теневых зонах объекта (за коньком крыши, в окнах и т. п.).

Автолестницы с ТПЛ являются относительно новым видом спасательной техники и получают все большее распространение как в Европе, так и в США [10].

Авторам концепции ТПЛ удалось соединить преимущества АЛ и АКП в единой конструкции и создать машину, одинаково эффективную как при проведении спасательных операций, так и при локализации и тушении пожаров в высотных зданиях.

Эти преимущества позволили отказаться от производства в Европе коленчатых подъемников (для нужд пожарной охраны) и полностью перейти на выпуск высотных телескопических подъемников с лестницами, а в последнее время — и супервысотных моделей серии HDT (с высотой подъема до 88 м).

В мировой практике для тушения пожаров и проведения спасательных работ в ЗПЭ (на уровне 10–28-го этажей) реализован модельный ряд высотных спасательных автомобилей от 37 до 112 м. В России осуществляется производство АЛ с высотой подъема от 30 до 62 м и АПК — 30–50 м. Однако потребность гарнизонов пожарной охраны с учетом интенсивного строительства в последние годы жилых ЗПЭ в АЛ и АПК удовлетворяется не в полной мере. Структура парка пожарных автомобилей (ПА) в городах с жилыми ЗПЭ должна быть изменена в сторону увеличения количества АЛ и АПК в сравнении с другими видами ПА.

В последнее время на рынке продаж ПА появилась мобильная пожарно-спасательная техника, обладающая свойствами пожарной автоцистерны и автолестницы. Так, ряд отечественных предприятий освоил производство пожарных автоцистерн, имеющих запас воды 3–4 м³ и лестницу высотой 18–32 м.

В связи с ограничением технических возможностей пожарных автолестниц и автоподъемников в последние годы пожарная охрана многих стран проявляет повышенный интерес к использованию авиационной техники для тушения пожаров и спасения людей в ЗПЭ.

В большинстве развитых стран созданы специальные пожарно-спасательные службы или координационные центры по борьбе с крупными авариями, стихийными бедствиями и пожарами, имеющие в своем распоряжении самолеты и вертолеты со специальным оборудованием или арендующие их у авиационных компаний и частных лиц. Они облегчают разведку пожара и руководство тушением, осуществляют транспортировку пожарных и снаряжения, что особенно важно в городах с интенсивным уличным движением.

При отсутствии водоема вблизи места пожара с помощью вертолета может осуществляться транспортировка и последующее наполнение водой специальных баков или подвесных устройств.

Современные авиатехнологии ликвидации пожаров с помощью вертолетов развиваются в двух направлениях — тушение с использованием водосбрасывающих устройств и так называемый горизонтальный способ тушения.

Использование вертолетов повышает точность доставки средств пожаротушения в очаг пожара, но вертикальный сброс возможен только при открытом очаге горения, что неприменимо для тушения зданий. В связи с этим появились разработки пожарных установок для горизонтального способа тушения пожаров.

Способ тушения с вертолета (с наклоном струи 45° к горизонту) был предложен и реализован в Германии, где на легкий вертолет была установлена импульсная система пожаротушения. Однако она не получила распространения из-за высокой стоимости, значительной отдачи, отсутствия возможности регулировать параметры струи и точность попадания, а также значительного воздействия самого водяного заряда на защищаемый объект. Кроме того, она может работать только импульсами.

Проведенные в СССР и затем в России испытания по использованию вертолетов для спасательных работ и тушения пожаров показали их достаточную эффективность. Для обеспечения эвакуации с помощью вертолетов предприятиями России изготовлены специальные устройства. Так, разработанная специальная спасательная корзина для вертолетов грузоподъемностью 2000 кг и массой 350 кг. При использовании вертолета Ми-8 в ней можно разместить 16 чел., вертолета К-32 — 25 чел.

Некоторые модели вертолетов оснащаются газодинамическими водяными установками либо специальными водяными мониторами.

Ранее отмечалось, что противодымная защита зданий и незадымляемость путей эвакуации обеспечиваются главным образом архитектурно-планировочными решениями и стационарными системами противодымной защиты. Однако существует вероятность отказа систем дымозащиты при пожаре по различным причинам, а в зданиях старой постройки дымозащита может вообще отсутствовать. В этих случаях может быть эффективным применение мобильной техники дымоудаления.

Отечественные производители предлагают автомобили дымоудаления (АД) с расходом вентиляторной установки 90–120 тыс. м³/ч. За рубежом производят АД с расходом вентиляторной установки более 200 тыс. м³/ч.

Техническая оснащенность, высокий уровень профессиональной подготовки личного состава, воз-

возможность в кратчайшее время сосредоточить необходимое количество сил и средств являются теми причинами, по которым передвижная техника в обозримой перспективе несомненно будет применяться при тушении пожаров в высотных зданиях. Вместе с тем обращает на себя внимание то обстоятельство, что если конструктивные, планировочные и технические мероприятия, обеспечивающие пожарную безопасность высотных зданий, постоянно развиваются и совершенствуются, то специальная передвижная пожарная техника тушения для этих же целей развивается менее динамично.

В первую очередь это относится к гидравлическому оборудованию и насосным установкам пожарных автомобилей. Только с середины 90-х годов появился отечественный насос высокого давления с соответствующим гидравлическим оборудованием (напор до 200 м вод. ст.), что обеспечивает подачу воды для работы ручных стволов на высоту около 100 м.

При выходе из строя стационарной системы пожаротушения для тушения пожара на большой высоте могут быть применены пожарные автомобили с пожарным насосом нормального и высокого давления.

При тушении пожара с применением ПА с насосом нормального давления в комплектацию должны быть дополнительно включены: емкость, располагаемая при тушении на промежуточном этаже, в которую подается вода из цистерны; мотопомпа для подачи воды из промежуточной емкости.

Данная схема имеет следующие основные недостатки: потребность в дополнительном оборудовании, агрегатах и обслуживающем персонале; возможность отказов работы мотопомпы в условиях задымления; сложность доставки оборудования на промежуточную высоту высотного здания.

Более перспективным и эффективным техническим средством для тушения пожаров в высотных зданиях и сооружениях является автомобиль с насосом высокого давления и специальным гидравлическим оборудованием.

В зарубежной и отечественной практике пожаротушения все шире стали применять технологии с использованием пены, образованной компрессионным способом (технологии CAFS), которую можно подавать по рукавам к стволам на высоту более 200 м.

Исходя из особенностей отечественного строительного нормирования, представляется важным использование технических средств спасения людей.

Для спасения человека необходимо:

- обеспечить его индивидуальную защиту от опасных факторов пожара за время движения до основных путей эвакуации, например до незадым-

ляемых лестничных пролетов, и при необходимости во время движения по основным путям эвакуации;

- предусмотреть размещение дополнительных средств эвакуации (спасательного оборудования), развешиваемых на внешней стороне здания во время пожара, в случае если невозможно воспользоваться основными путями эвакуации.

Безопасное следование человека до путей эвакуации может быть обеспечено применением изолирующих и фильтрующих самоспасателей для защиты органов дыхания и зрения и огнестойких накидок для защиты кожных покровов от открытого пламени и теплового излучения.

Изолирующие самоспасатели могут применяться вне зависимости от содержания кислорода и токсичных веществ в окружающей среде, а использование фильтрующих самоспасателей допускается при концентрации кислорода не ниже 17 %.

В соответствии с нормативными документами срок защитного действия изолирующих самоспасателей составляет от 20 до 50 мин в зависимости от назначения и условий применения; масса — от 1,5 до 2,5 кг.

Время защитного действия фильтрующих самоспасателей по оксиду углерода составляет не менее 15 мин. Применение их ограничено.

Все самоспасатели, за исключением самоспасателей со сжатым воздухом, являются средством индивидуальной защиты одноразового действия и могут без предварительного обучения использоваться людьми старше 12 лет, в том числе имеющими бороду, усы, длинные волосы, очки.

Сертифицированные самоспасатели серийно выпускаются отечественными и зарубежными фирмами.

Огнестойкая накидка обеспечивает кратковременную (до 5 с) защиту от воздействия открытого пламени и теплового излучения с поверхностной плотностью до 14 кВт/м². Конструктивное исполнение накидки позволяет регулировать ее размеры в широком диапазоне.

Для более эффективного использования самоспасателей и защитных накидок и снижения показателя гибели людей необходимо:

- разработать и ввести в действие нормативные документы, предусматривающие обязательное размещение указанных средств защиты в административных и жилых ЗПЭ;
- комплектовать самоспасателями и накидками пожарные автомобили.

Спасательное оборудование является дополнительным средством эвакуации людей при пожарах в зданиях и сооружениях. Расчет сил и выбор дополнительных средств эвакуации должны осуществ-

ляться исходя из возможностей основных путей эвакуации каждого конкретного объекта с учетом контингента находящихся в нем людей.

Спасательное оборудование должно обеспечивать возможность экстренной эвакуации расчетного количества людей, не воспользовавшихся основными путями эвакуации, за время, в течение которого опасные факторы пожара еще не достигают критических значений в зоне нахождения спасаемых. Для жилых и общественных зданий это время может составлять от 5 до 15 мин.

Необходимо подчеркнуть, что набор технических средств для эвакуации людей из ЗПЭ ограничен.

Наиболее перспективными и эффективными средствами спасения, которые широко внедряются в промышленно развитых странах, являются спасательные устройства на базе эластичных рукавов.

Спасательный рукав — устройство, принцип работы которого основан на создании достаточной силы трения за счет сжатия рукавом движущегося в нем тела. Скорость спуска в рукаве может регулироваться непосредственно спасаемым за счет изменения положения частей тела, спасателями, находящимися на земле, путем различных тактических действий с рукавом, а также за счет различного конструктивного исполнения самого рукава.

Устройства на базе эластичного спасательного рукава в сравнении с другими спасательными устройствами имеют следующие преимущества:

- обеспечивают спасение людей практически с любой высоты ЗПЭ;
- сохраняют работоспособность при любых погодных условиях, климате, времени года и суток;
- имеют высокое быстродействие и большую пропускную способность (до 15 чел./мин);
- не требуют от спасаемых какой-либо подготовки для их использования;
- не требуют тренировки и обучения спасаемых, а также специального снаряжения для них;
- обеспечивают возможность спасения людей любого возраста и пола независимо от их физического и психологического состояния;
- снижают страх высоты у спасаемых.

Рукавное спасательное устройство может быть размещено как снаружи, так и внутри здания с входом с одного или нескольких уровней одновременно, может доставляться к месту непосредственно пожарными или размещаться на автолестницах или в люльках коленчатых подъемников.

В настоящее время рукавными спасательными устройствами оборудованы: высотное здание гостиницы “Украина”, гостиничный комплекс “Измайлово”, административное здание на Щелковском шоссе в г. Москве, здание ОАО “ГАЗПРОМ”, космодром “Восточный” и др.

Выводы

Учитывая изложенное, в целях обеспечения безопасности людей при пожарах в ЗПЭ целесообразно:

1) рассмотреть возможность включения в состав обязательных противопожарных требований защиты жилых помещений таких зданий не только средствами пожарной сигнализации и оповещения о пожаре, но и АУП; использовать спринклерные установки пожаротушения тонкораспыленной водой;

2) обеспечить жилые здания повышенной этажности эвакуационными спасательными устройствами группового и индивидуального действия, а также изолирующими и фильтрующими самоспасателями в зависимости от условий применения; разработать нормативные документы, предусматривающие обязательное размещение в жилых зданиях повышенной этажности технических средств спасения людей;

3) пересмотреть нормативные документы, определяющие требования по строительству пожарных депо с их техническим оснащением современной мобильной пожарно-спасательной техникой;

4) решить вопрос обеспечения подразделений ГПС современной мобильной пожарной техникой для тушения пожаров и проведения спасательных работ при пожарах в жилых ЗПЭ:

- пожарными автолестницами и автоподъемниками с высотой подъема 50 м и выше;
- пожарными вертолетами, снабженными эффективными средствами пожаротушения и спасания людей;
- пожарными автомобилями с насосами высокого давления и комплектом высоконапорного гидравлического оборудования;
- пожарными автомобилями дымоудаления, обеспечивающими подачу воздуха с расходом более 100 тыс. м³/ч при давлении более 1500 Па, а также переносными дымососами с расходом воздуха более 30 тыс. м³/ч;
- пожарными автоцистернами с подачей пены компрессионным способом;
- пожарными автоцистернами с лестницами;

5) разработать свод правил, учитывающий специфику пожарной опасности жилых ЗПЭ;

6) обеспечить правовую основу деятельности ГПС по предупреждению пожаров в жилом секторе, и в первую очередь в ЗПЭ; решить вопросы, связанные с повышением эффективности процедуры входа в жилые помещения и контроля их противопожарного состояния;

7) в договорах по найму (приобретению) жилой площади в ЗПЭ в обязательном порядке отражать вопросы, касающиеся обязательств нанимателя (приобретателя) в части выполнения требований по по-

жаробезопасной эксплуатации, а также в период внутриквартирного ремонта; права и обязанности арендодателей и организаций, эксплуатирующих жилой фонд;

8) организовать широкую информационно-пропагандистскую работу по внедрению в сознание людей самого существования проблемы пожаров как

бедствия, способного произойти в любой семье, в любом жилище, по формированию у людей психологических установок на нетерпимость к случаям грубого нарушения противопожарного режима и требований пожарной безопасности, по подготовке людей к правильным действиям в случае возникновения пожара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сибирко В. И., Петрова Е. А., Фирсов А. Г., Загуменнова М. В., Чабан Н. Г., Зуева Н. А., Чечетина Т. А., Арсланов А. М., Преображенская Е. С., Копченков В. Н., Амосова Н. В. Основные результаты прогноза на 2016 год и предложения по улучшению обстановки с пожарами в Российской Федерации // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXVIII Международной научно-практической конференции. — В 2 ч. — М. : ВНИИПО, 2016. — Ч. 1. — С. 83–100.
2. СП 54.13330.2011. Здания жилые многоквартирные. Актуал. ред. СНиП 31-01–2003. URL: http://www.norm-load.ru/SNiP/raznoe/aktualizir_sp/2/54.htm (дата обращения: 01.08.2017).
3. СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200101593> (дата обращения: 01.08.2017).
4. NFPA 5000. Building construction and safety code. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2015.
5. СП 3.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071145> (дата обращения: 01.08.2017).
6. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования (с изм. № 1). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071148> (дата обращения: 01.08.2017).
7. Пронин Д. Г. Обоснование размеров пожарных отсеков : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2011. — 34 с.
8. Пронин Д. Г., Корольченко Д. А. Научно-техническое обоснование размеров пожарных отсеков в зданиях и сооружениях : монография. — М. : Изд-во “Пожнаука”, 2014. — 104 с.
9. СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456044284> (дата обращения: 01.08.2017).
10. Пивоваров В. В. Совершенствование парка пожарных автомобилей России. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2006. — 193 с.

Материал поступил в редакцию 7 августа 2017 г.

Для цитирования: Копылов Н. П., Пивоваров В. В., Пронин Д. Г. Обеспечение безопасности людей в жилых зданиях повышенной этажности // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 9. — С. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.5-14.

English

ENSURING THE SAFETY OF PEOPLE IN RESIDENTIAL HIGH-RISE BUILDINGS

KOPYLOV N. P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

PIVOVAROV V. V., Candidate of Technical Sciences, Head of the Center for Regulation in the Field of Fire Safety, National Academy of Sciences of Fire Safety (VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

PRONIN D. G., Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Technical Regulation, TsNIP Minstroy of Russia (Vernadskogo Avenue, 29, Moscow, 119331, Russian Federation; e-mail: pronin.dg@mail.ru)

ABSTRACT

Annually, the residential sector accounts for about 70 % of the total number of fires in the Russian Federation. In the apartment houses killed more than 90 % of the total number of deaths in the Russian Federation.

Factor that significantly increases fire hazard in high-rise buildings is the high probability of late detection of fire in case of absence or being in a failed state of systems of fire automatics.

Currently, the design of residential high-rise buildings in the Russian Federation is regulated by the requirements of Set of rules 54.13330.2011 "Residential Buildings. The updated edition of SNiP 31-01–2003".

By US regulations automatic detection and notification of fire is necessary in almost all residential buildings. In accordance with the NFPA standards, all new apartment buildings should be protected by automatic fire extinguishing systems.

The widespread implementation of the automatic fire extinguishing systems in residential buildings in our country is hindered by the lack of regulatory framework.

In 2016 Set of rules 267.1325800.2016 "Buildings and complexes high-rise. Design rules" was developed, which contains a section on fire safety, mainly devoted to requirements of design solutions. Currently is developing a set of rules devoted to questions of fire safety of high-rise buildings.

For fighting fires and conducting rescue operations in the high-rise buildings fire ladders, mobile aerial towers and helicopters are widely used. To supply fire extinguishing substances in high-rise buildings fire trucks with high pressure pumps and special hydraulic equipment are used. To ensure the removal of smoke from escape routes of people in some cases mobile smoke exhaustion equipment can be used.

To ensure the safety of people at fires in high-rise buildings it is advisable:

- consider the possibility of inclusion in the compulsory fire security demands the requirements of the protection of premises with fire alarms and automatic fire extinguishing systems;
- to provide high-rise residential buildings with emergency rescue devices of group and individual actions, as well as isolating and filtering self-rescuers, depending on the conditions of use; to develop normative documents with demands of mandatory placement in a residential high-rise buildings of the technical means of human salvation;
- to review the regulatory documents that define requirements for the construction of fire stations with their equipment of modern mobile firefighting and rescue equipment;
- to develop a set of rules tailored to the fire hazard of high-rise residential buildings;
- to provide the legal basis for the activities of fire service in the prevention of fires in the residential sector and primarily in the high-rise buildings.

Keywords: fire danger; people's safety; residential high-rise buildings; regulatory requirements; rescue and firefighting equipment; fire protection; automatic fire extinguishing system; automatic detection and notification of fire.

REFERENCES

1. Sibirko V. I., Petrova Ye. A., Firsov A. G., Zagumennova M. V., Chaban N. G., Zuyeva N. A., Chechetina T. A., Arslanov A. M., Preobrazhenckaya Ye. S., Kopchenov V. N., Amosova N. V. The main results of the forecast for 2016 and proposals for improvement of the situation with fires in the Russian Federation. In: *Aktualnyye problemy pozharной bezopasnosti. Materialy XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual Problems of Fire Safety. Proceedings of the XXVIII International Scientific-Practical Conference]. Moscow, VNIPO, 2016, part I, pp. 83–100 (in Russian).
2. Set of rules 54.13330.2011. *Multicompartment residential buildings. The updated edition of Construction Norms and Regulations 31-01–2003* (in Russian). Available at: http://www.norm-load.ru/SNiP/raznoe/aktualizir_sp/2/54.htm (Accessed 1 August 2017).

3. Set of rules 4.13130.2013. *Systems of fire protection. Restriction of fire spread at object of defense. Requirements to special layout and structural decisions* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200101593> (Accessed 1 August 2017).
4. NFPA 5000. *Building construction and safety code*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2015.
5. Set of rules 3.13130.2009. *Systems of fire protection. System of annunciation and management of human evacuation at fire. Requirements of fire safety* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200071145> (Accessed 1 August 2017).
6. Set of rules 5.13130.2009. *Systems of fire protection. Automatic fire-extinguishing and alarm systems. Designing and regulations rules* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200071148> (Accessed 1 August 2017).
7. Pronin D. G. *Justification for the fire compartments size*. Abstr. cand. tech. sci. diss. Balashikha, 2011. 34 p. (in Russian).
8. Pronin D. G., Korolchenko D. A. *Nauchno-tehnicheskoye obosnovaniye razmerov pozharnykh otsekov v zdaniyakh i sooruzheniyakh* [Scientific and technical justification for the fire compartments size in buildings and constructions]. Moscow, Publishing House "Pozhnauka", 2014. 104 p. (in Russian).
9. Set of rules 267.1325800.2016. *High rise buildings and complexes. Design rules* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456044284> (Accessed 1 August 2017).
10. Pivovarov V. V. *Sovershenstvovaniye parka pozharnykh avtomobiley Rossii* [Improvement of park of fire-fighting vehicles in Russia]. Moscow, VNIPO of Emercom of Russia, 2006. 193 p. (in Russian).

For citation: Kopylov N. P., Pivovarov V. V., Pronin D. G. Ensuring the safety of people in residential high-rise buildings. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 9, pp. 5–14 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.5-14.



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

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

УДК 614.841.4

О ВЗРЫВООПАСНОСТИ АЭРОВЗВЕСИ МЕЛАМИНА

Дан анализ особенностей опасности пыли, максимальное давление взрыва аэровзвеси которой $P_{\max}$ сопоставимо с величиной 100 кПа. Предложено такую пыль считать пылью с низкой взрывоопасностью в отличие от пыли с высокой взрывоопасностью, у аэровзвеси которой $P_{\max} \gg 100$ кПа. Показано, что для пыли с низкой взрывоопасностью минимальное взрывоопасное содержание кислорода (ЛОС) близко к содержанию кислорода в атмосфере $C_{OX,0} = (20,7 \pm 0,1) \% \text{ об.}$, и для оценки взрывоопасности такой пыли разумно, наряду с нормативным параметром $P_{\max}$, использовать параметр $\Delta_{OX} = C_{OX,0} - \text{ЛОС}$. Для пыли с низкой взрывоопасностью $0 < \Delta_{OX} < 0,5 \% \text{ об.}$ Иллюстрацию результатов работы проводили с использованием известных данных исследования в 20-л и 1000-л камерах взрывоопасности аэровзвесей трех образцов меламина со средним размером частиц d_m менее 10, 19 и 52 мкм соответственно. Показано, что взвеси всех рассмотренных образцов меламина в атмосферном воздухе являются невзрывоопасными при нормальных условиях (абсолютном давлении $P_0 = 100$ кПа, температуре $T_0 = 25^\circ \text{C}$). Поскольку исследование пыли в 20-л камере фактически производится при повышенных начальных значениях температуры и давления (Полетаев, 2017), удалось определить, что нагрев невзрывоопасной аэровзвеси образца меламина с $d_m = 19$ мкм до 68°C заведомо переводит ее в аэровзвесь с высокой взрывоопасностью. Показано также, что для невзрывоопасной аэровзвеси, у которой $\text{ЛОС} \approx C_{OX,0}$, аналогичный переход возможен при нагреве всего на $10 \dots 20^\circ \text{C}$.

Ключевые слова: взрыв пыли; критерий взрыва; низкая взрывоопасность; высокое ЛОС; меламина.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28

Введение

Мелкодисперсный меламина является сырьем для производства многих полимерных изделий, стойких к механическим, температурным и химическим воздействиям. В то же время сведения об опасности меламина весьма ограничены и противоречивы. В частности, как следует из нижеизложенного, до сих пор нет даже формального ответа на вопрос: является ли пыль меламина взрывоопасной?

Под взрывоопасной горючей пылью (ВГП) принято понимать тонкоизмельченный твердый горючий материал, взвесь которого в воздухе внутри герметичного объема при нормальных начальных параметрах состояния (абсолютном давлении $P_0 = 100$ кПа, температуре $T_0 = 298$ К) и типичном содержании кислорода в атмосферном воздухе $C_{OX,0} = (20,7 \pm 0,1) \% \text{ об.}$ способна в определенном диапазоне концентраций горючего распространять пламя, представляющее опасность разрушения оболочки данного объема давлением продуктов горения [1]. С учетом данного определения термина ВГП результат стандартного испытания аэровзвеси в герметичной камере [2–7] относят к взрыву, если максимальное увеличение давления P_m , возникающее в камере после инициирования пиротехнического

источника зажигания, превышает пороговую величину P_m^* :

$$P_m > P_m^*. \quad (1)$$

Критерий взрыва аэровзвеси (1) позволяет определить границы диапазона взрывоопасных концентраций пыли в аэровзвеси, именуемые нижним (LEL) и верхним (UEL) концентрационными пределами взрыва (распространения пламени).

Из (1) и определения термина ВГП следует критерий взрывоопасности пыли:

$$P_{\max} > P_m^*, \quad (2)$$

где $P_{\max}$ — наибольшее из значений P_m , полученных в опытах с различными концентрациями пыли в аэровзвеси (более подробное описание экспериментального определения P_m и других параметров исследуемой аэровзвеси приводится в разд. 1.3).

Особенностью современной системы оценки взрывоопасности пыли является отсутствие единого мнения о величине P_m^* . В частности, для исследования в 1000-л камере, результаты которого считаются наиболее надежными, европейскими нормами устанавливается $P_m^* = 30$ кПа [2–5], а нормами США

— $P_m^* = 100$ кПа [6, 7]. При испытании меламина со средним размером частиц менее 10 мкм в 1000-л камере получено $P_{\max} = 50$ кПа [8]. Следовательно, данный образец меламина по европейским нормам относится к ВГП, а по нормам США считается невзрывоопасной горючей пылью (НГП).

Прежде чем рассматривать выводы из упомянутого выше противоречия норм, отметим несовершенство терминологии рассматриваемой здесь области оценки взрывоопасности пыли. Действительно, в определении термина “взрывоопасная горючая пыль (ВГП)” перечисляются фактически признаки взрывоопасности аэровзвеси горючей пыли. Во избежание противоречий при дальнейшем изложении будем, не вдаваясь в тонкости отличий критериев (1) и (2), при упоминании термина ВГП подразумевать, что речь идет о взрывоопасности взвеси ВГП в воздухе. С учетом сделанного замечания перейдем к анализу упомянутого противоречия и попыткам его разрешения.

Критерий (2) приводит к естественному разделению ВГП (и, следовательно, аэровзвесей ВГП) на две группы. К первой группе относятся пыли (аэровзвеси) с высокой взрывоопасностью ($P_{\max} \gg P_m^*$), ко второй — пыли (аэровзвеси) с низкой взрывоопасностью, для которых $P_{\max}$ и P_m^* являются величинами одного порядка. Можно заметить, что изложенное выше противоречие норм касается пылей с низкой взрывоопасностью, и корректному определению взрывоопасности таких пылей должно предшествовать уточнение критерия (2).

В работах [9] и [10] высказаны рекомендации по уточнению критерия (2) для случая испытания пыли с низкой взрывоопасностью в 20-л камере US Bureau of Mines и в 20-л камере Р. Сивека (R. Siwek) соответственно. Обе рекомендации сводятся к дополнению критерия (2) условием для нормированного значения максимальной скорости нарастания давления в камере K_{st} :

$$K_{st} \geq K_{st}^*, \quad (3)$$

где K_{st}^* — минимальное из значений K_{st} , отвечающих взрыву аэровзвеси, МПа·м/с.

Несмотря на разумное объяснение физического смысла дополнительного условия взрывоопасности пыли (3) и эффективность применения этого условия к некоторым пылям, оно не вошло в действующие нормы из-за того, что не была выявлена связь между K_{st}^* , особенностями методики исследования и разнovidностью пыли.

Более совершенный подход к уточнению критерия взрывоопасности пыли изложен в [11]. В этой работе предложено основной характеристикой взрывоопасности пыли считать не столько величину $P_{\max}$,

с которой связано толкование термина ВГП, сколько величину Δ_{OX} (% об.), определяемую выражением

$$\Delta_{OX} = C_{OX,0} - LOC, \quad (4)$$

где LOC — минимальное взрывоопасное содержание кислорода в аэровзвеси, % об.

Критерий взрывоопасности пыли в этом случае принимает следующий очевидный вид:

$$\text{Пыль} \begin{cases} \text{взрывоопасна,} \\ \text{если } \Delta_{OX} \geq 0 \text{ \% об.;} \\ \text{взрывобезопасна,} \\ \text{если } \Delta_{OX} < 0 \text{ \% об.} \end{cases}$$

Пыли с низкой взрывоопасностью характеризуются положительным значением Δ_{OX} , близким к 0. Именно такой подход к оценке взрывоопасности пыли и будет применяться в настоящей работе.

В дальнейшем изложении потребуются использовать понятие взрывоопасности для аэровзвеси при давлении $P \neq P_0$ и температуре $T \neq T_0$. В связи с этим обстоятельством, а также во избежание противоречий типа “взрывоопасная аэровзвесь невзрывоопасной пыли” в настоящей работе используется уточненное определение термина ВГП. Уточнение состоит в том, что взрывоопасность пыли считается зависящей от начальных параметров состояния аэровзвеси P и T , которые используются вместо P_0 и T_0 в заимствованном из [1] определении термина ВГП. Таким образом, параметр Δ_{OX} из (4) для пыли заданного химического состава не будет постоянной величиной, поскольку LOC зависит как от физических характеристик пыли (например, распределения частиц по размерам), так и от параметров начального состояния аэровзвеси (например, температуры) [12].

Настоящая работа посвящена:

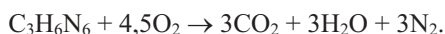
- оценке минимального значения P_m для случая взрыва пыли в камере;
- определению диапазона значений Δ_{OX} для пылей с низкой взрывоопасностью;
- определению взрывоопасности пыли меламина по известным результатам испытаний в 1000-л и 20-л камерах;
- оценке увеличения температуры аэровзвеси меламина, которое приводит к переходу от невзрывоопасной аэровзвеси к аэровзвеси с высокой взрывоопасностью.

1. Известные сведения о меламине

1.1. Справочные данные [13]

Химический состав меламина описывается выражением 1,3,5-триазин-2,4,6-триамин; брутто-формула имеет вид $C_3H_6N_6$. Плотность 1571 кг/м³. Теплоемкость при нормальной температуре $c_D = 1230$ Дж/(кг·К). Температура плавления 364 °С,

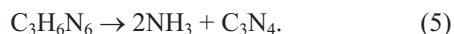
причем плавление сопровождается признаками разложения вещества. Теплота сгорания в чистом кислороде составляет 15,67 МДж/кг и отвечает окислению меламина по следующей реакции:



1.2. Сведения о пожарной опасности

В листах безопасности, выданных на меламина различными производителями, сведения о пожароопасных свойствах весьма ограничены. Меламин, как правило, относят к пожаробезопасным веществам, способным проявлять пожарную опасность лишь при очень высокой температуре. Косвенным подтверждением горючести меламина является весьма высокая теплота сгорания. Значения минимальных температур самовоспламенения аэровзвеси и аэрогеля меламина настолько высоки, что в процессе измерений по стандартным методам [14] они не достигаются и согласно [8] имеют значения соответственно более 850 и более 450 °С.

ДСК-анализ [15] выявляет две эндотермические зоны разложения меламина — 350–400 и 450–500 °С. Итоговый результат разложения молекулы меламина описывается реакцией



Образующийся при разложении меламина термостабильный полимер $(\text{C}_3\text{N}_4)_n$ представляет собой твердое пористое вещество, вспученное выделившимся аммиаком.

1.3. Сведения о взрывоопасности

В данном разделе сообщается об известных автору результатах экспериментальных исследований взрывоопасности меламина в 20-л и 1000-л камерах.

Для лучшего представления о сущности этих результатов на рис. 1 приводятся упрощенная схема экспериментальной установки для исследования взрывоопасности аэровзвеси (см. рис. 1,а) и типичная диаграмма изменения давления в камере P со временем t на протяжении единичного опыта (см. рис. 1,б), сопровождаемые необходимыми пояснениями.

Основная часть эксперимента (см. рис. 1) начинается с открытия электропневмоклапана на трубопроводе, соединяющем заполненный сжатым воздухом ресивер с камерой. Образец пыли массой m_D , предварительно размещенный у выходного отверстия ресивера, потоком воздуха выбрасывается в камеру, где образует турбулентную аэровзвесь. За время t_r давление в системе ресивер – камера приходит к равновесному значению P_i , превышающему начальное давление в камере P_{c0} . Концентрация пыли в аэровзвеси принимается равной ее среднеемному значению $C_D = m_D/V$ (где V — объем камеры). С задерж-

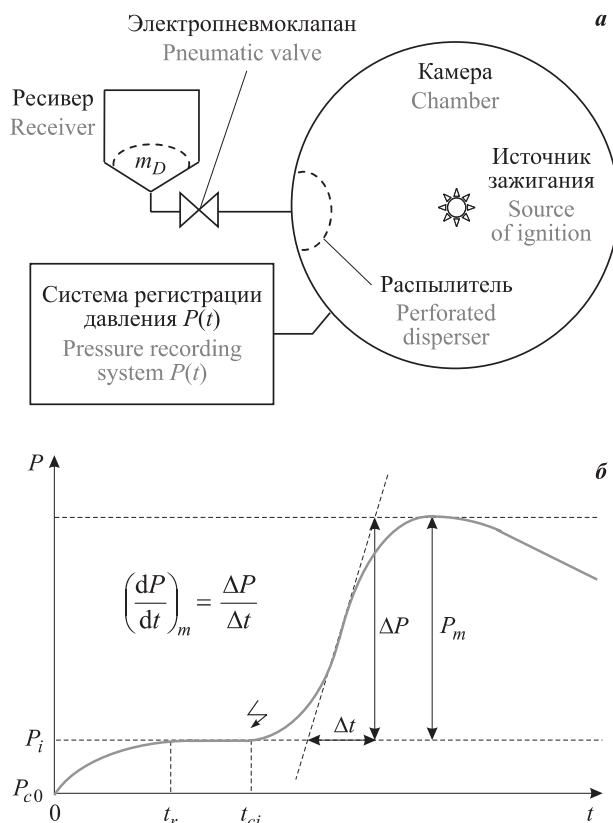


Рис. 1. Схема установки для исследования взрывоопасности аэровзвеси (а) и пример диаграммы изменения давления в камере P со временем t в единичном опыте (б)

Fig. 1. Schematic image of equipment for dust explosion investigation (a) and an example of a diagram of the pressure change in chamber P with time t in a single experiment (b)

кой $t_{ci} > t_r$ происходит срабатывание пиротехнического источника зажигания (ИЗ), после чего фиксируется рост давления в камере, вызванный выгоранием ИЗ и взвешенной пыли. Начиная с момента t_{ci} , график $P(t)$ принято характеризовать параметрами P_m и $(dP/dt)_m$, представляющими собой максимальное увеличение давления и максимальный наклон касательной к кривой $P(t)$ соответственно (см. рис. 1,б). Последний параметр выражают в нормированном виде $K_m = (dP/dt)_m V^{1/3}$, предполагающем независимость от объема камеры.

В экспериментах в 20-л камере ее объем предварительно откачивается до уровня (обычно до 40 кПа абсолютных), при котором давление в камере к моменту инициирования срабатывания источника зажигания P_i совпадает с атмосферным давлением P_0 . В экспериментах в 1000-л камере стандартами [2–5] допускается отсутствие предварительной откачки объема камеры. В этом случае $P_{c0} = P_0$ и P_i составят около 10 кПа избыточных.

Значение P_m в 20-л камере подвергают корректировке, приближающей значение данного параметра к ожидаемому значению по результатам испытания аэровзвеси в 1000-л камере [16]:

$$P_{m,cal} = \begin{cases} \frac{550(P_{m,20l} - P_{ci})}{550 - P_{ci}}, & \text{если } P_{m,20l} < 550 \text{ кПа;} \\ 0,388(P_{m,20l})^{1,15}, & \text{если } P_{m,20l} > 550 \text{ кПа,} \end{cases} \quad (6)$$

где $P_{m,20l}$, $P_{m,cal}$ — исходное и расчетное (скорректированное) значения давления соответственно, кПа;

P_{ci} — расчетное значение изменения давления в 20-л камере, вызванное горением пиротехнического ИЗ, кПа;

$$P_{ci} = 1,6 \cdot 10^{-2} E_{ci}; \quad (7)$$

E_{ci} — запас энергии ИЗ, Дж.

По результатам определения P_m (или, как в случае 20-л камеры, $P_{m,cal}$) и K_m в широком диапазоне концентраций пыли C_D находят их максимально возможные значения, которые обозначают соответственно P_{max} (максимальное давление взрыва) и K_{st} [2, 3].

Перейдем к известным сведениям о взрывоопасности меламина. Сведения, которые будут использованы в дальнейшем изложении, представлены в табл. 1. Здесь d_m — средний размер частиц, который делит полидисперсный материал на равные по массе фракции “менее d_m ” и “более d_m ” (мкм); C_{OX} — начальное содержание кислорода в газовой фазе взрывовеси (% об.). Влажосодержание исследованных образцов меламина не более 0,4 % масс. Определение LEL, P_{max} и K_{st} проводилось по стандартам [2–4].

В базе данных IFA [17] можно обнаружить информацию о взрывоопасности еще четырех образцов меламина. К сожалению, этой информацией нельзя здесь воспользоваться из-за отсутствия необходимых сведений об энергии ИЗ и объеме реакционной камеры, в которой данные образцы меламина исследовались. Некоторые сведения о взрывоопасности меламина, исследованного в 20-л камере, можно найти в монографии [12], автор которой позаимст-

вовал их из диссертации [18]. Однако автор [12] результаты, полученные по ряду признаков для одного и того же вещества, относит то к меламину, то к полимеру меламина. Поскольку показатели взрывоопасности меламина и полимера меламина различаются [8], сведения о меламине из [12] в настоящей работе также не принимаются во внимание.

2. Условие появления малых P_{max}

Как сообщалось во введении, пыли с низкой взрывоопасностью характеризуются малым значением P_{max} — порядка 30...100 кПа. В настоящем разделе будет сформулировано условие появления таких значений параметра. Из-за отсутствия теории турбулентного горения [19] для выявления и объяснения условий появления малых P_{max} будем использовать эмпирические закономерности турбулентного горения взрывовесей, распространенные допущения и разумные предположения.

В [20] установлено эмпирическое правило, согласно которому температура горения взрывовеси при нормальных начальных условиях составляет не менее $T_{min} \approx 1300$ К. Приблизительную оценку такого значения T_{min} можно получить на основе данных о LOC и предположения о полном выгорании окислителя на этом пределе.

Из упомянутого правила и уравнения состояния газовой фазы, рассматриваемой в приближении идеального газа с постоянным числом молей, для случая однородного распределения пыли по объему 1000-л камеры следуют два неравенства:

$$P_m \geq P_{min}, \quad (8)$$

и, поскольку $P_{max} \geq P_m$,

$$P_{max} \geq P_{min}, \quad (9)$$

где $P_{min} \approx P_0(T_{min} - T_0)/T_0 \approx 330$ кПа.

Таблица 1. Сведения о показателях взрывоопасности меламина

Table 1. Information on the indicators of explosion hazard of melamine

Номер образца No. dust	V, л V, l	E_{ci} , кДж E_{ci} , kJ	Содержание, % масс., фракций, мкм Content, % by weight, of fractions, μm					d_m , мкм d_m , μm	C_{OX} , % об. C_{OX} , % by vol.	Показатели взрывоопасности Indicators of explosion hazard			Источник сведений Source of information
			<140	<100	<63	<32	<20			LEL, г/м ³ LEL, g/m ³	P_{max} , кПа P_{max} , kPa	K_{st} , МПа·м/с K_{st} , MPa·m/s	
1	1000	10	...	...	...	95	88	<10	$C_{OX,0}$	1000	50	0,1	[8]
2	1000	10	90	78	58	33	23	52	$C_{OX,0}$	...	10	0,0	*
3	20	2	...	100	96	69	51	19	$C_{OX,0}$	...	690	3,0	**
									18	...	20	0,6	
									17	...	10	0,0	

* INBUREX, Germany, Möhnese, 2017 г.

** TÜV SÜD Schweiz AG, Swiss, Basel, 2017 г.

На практике, однако, неравенство (8) может нарушаться. Это происходит вблизи концентрационного предела распространения пламени (для определенности LEL), где можно получить значения P_m , которые намного меньше P_{min} . Данный эффект малых P_m иллюстрируется на рис. 2 зависимостями $P_m(C_D)$ для бурого угля, полученными в [21] для различных C_{OX} в 1000-л камере при начальной температуре аэровзвеси около 420 К (150 °С). Отметим, что относительная (к величине LEL) протяженность диапазона концентраций горючего η_c , в пределах которого не соблюдается (8), может достигать 0,5.

Разумно предположить, что эффект малых P_m вблизи LEL объясняется неоднородностью распределения частиц по объему камеры. Исследования пространственного распределения концентрации частиц в камере к моменту зажигания указывают на существование в аэровзвеси заметных объемов, в которых средняя концентрация пыли отличается от C_D (средней концентрации пыли по объему всей камеры) на десятки процентов [22]. В связи с этим естественно полагать, что для C_D вблизи LEL распространение пламени охватывает не всю аэровзвесь, а только ту ее непрерывную часть, в пределах которой содержится источник зажигания и локальная концентрация пыли превышает LEL. Отметим, что в пользу правоты предположения о ведущей роли неоднородности распределения частиц свидетельствует резкое (на порядок) уменьшение η_c при замене дисперсного горючего на однородно распределенный горючий газ [23].

Приблизительную оценку минимального значения P_m при частичном выгорании аэровзвеси вблизи LEL, но с сохранением возможности неограниченного распространения пламени можно выполнить на основе теории протекания (percolation theory) [16]. Эффект теории протекания демонстрируется следующим опытом. Кубический контейнер с двумя противоположными гранями из проводящего электрический ток материала случайным образом заполняют одинаковыми шарами двух видов (из проводящего электрический ток материала и из диэлектрика) с диаметром, намного меньшим длины ребра куба. Шары образуют структуру с симметрией кубической решетки. К упомянутым граням куба прилагается электрическое напряжение. Ток между этими гранями возникает, когда отношение числа проводящих шаров к общему числу шаров превышает 0,3. Дальнейшее увеличение числа проводящих шаров быстро приближает долю таких шаров, находящихся под электрическим напряжением, к единице.

В рамках аналогии с описанным опытом разумно полагать, что в качестве “проводящей структуры” в неоднородной аэровзвеси выступают участки объема с горючей (т. е. способной распространять пла-

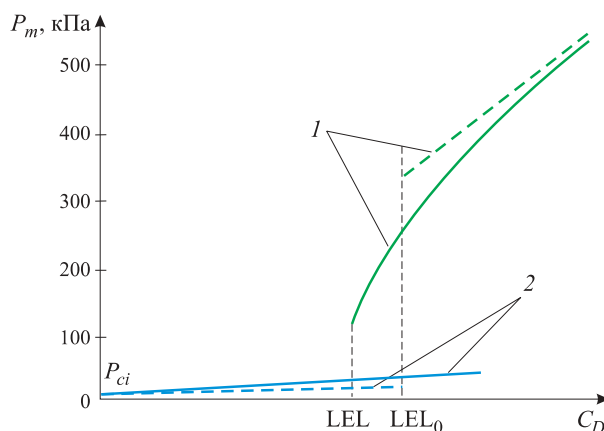


Рис. 2. Качественное представление зависимостей максимального давления в камере P_m от концентрации пыли C_D в аэровзвеси с равномерным (---) и реальным (—) распределением частиц: 1 — взрыв; 2 — локальное горение источника зажигания и аэровзвеси (в окрестности пламени источника зажигания)

Fig. 2. A qualitative representation of the dependences of the maximum pressure in the chamber P_m on the dust concentration C_D in the dust/air mixture with a uniform (---) and real (—) particle distribution: 1 — explosion; 2 — local burning of the ignition source and dust/air mixture (in the vicinity of the ignition source flame)

мя) аэровзвесью. Критический (для сколь угодно далекого распространения пламени) относительный объем таких участков должен превышать 0,3. Прирост давления в камере должен превышать такую же относительную (к случаю выгорания всей аэровзвеси) величину, т. е.

$$P_m^* > 0,3P_{min} \approx 100 \text{ кПа},$$

откуда следует, что величина P_m^* в нормах США (см. введение) имеет более реалистичное значение, чем в европейских нормах, поэтому в последующем изложении полагаем $P_m^* = 100$ кПа.

Качественное представление о характере зависимости $P_m(C_D)$ вблизи теоретического значения предела (LEL_0) в аэровзвеси с равномерным и реальным распределением частиц по объему камеры дают графики на рис. 2. Для случая реального распределения частиц график характеризует усредненную по диапазону возможных значений величину P_m .

Перейдем к условиям нарушения неравенства (9). Зависимости на рис. 3 демонстрируют выполнение этого неравенства. По мнению автора, для обнаружения условий нарушения неравенства (9) требуется более тщательное исследование, чем то, которое выполнено в [21]. Для обоснования такого мнения приводятся следующие доводы.

Зависимости на рис. 3 позволяют в координатах (C_{OX} , C_D) построить границу, разделяющую взрывоопасные аэровзвеси бурого угля от невзрывоопасных аэровзвесей. Такая граница, построенная на основе критерия (1) с $P_m^* = 100$ кПа, представлена

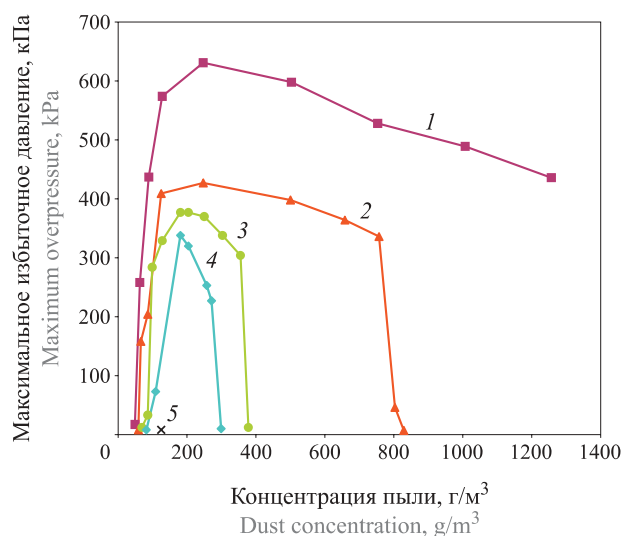


Рис. 3. Зависимость максимального увеличения давления P_m в 1000-л камере от концентрации пыли бурого угля C_D при различном начальном содержании кислорода в воздухе, разбавленном азотом, % об.: 1 — C_{OX0} ; 2 — 14; 3 — 12; 4 — 11,5; 5 — 11 [21]

Fig. 3. Dependence of the maximum increase in pressure P_m in a 1000-l chamber on the concentration of dust of brown coal C_D at a different initial oxygen content in air diluted with nitrogen, % by vol.: 1 — C_{OX0} ; 2 — 14; 3 — 12; 4 — 11,5; 5 — 11 [21]

кривой 1 на рис. 4. Нижняя и верхняя ветви кривой отвечают зависимостям соответственно LEL и UEL от C_{OX} . Пунктирная часть кривой 1 представляет собой попытку аппроксимации границы для диапазона 11 % об. $< C_{OX} < 11,5$ % об., в котором исследования [21] не проводились. Разумно предположить, что именно в этом диапазоне нарушается неравенство (9), когда с уменьшением C_{OX} с 11,5 % об. до LOC_1 величина P_{max} резко уменьшается с 340 до 10 кПа. Объяснение этого предположения проводится по аналогии с объяснением эффекта малых P_m в опытах при $C_D \approx LEL$ и состоит в следующем.

В соответствии с формой кривой 1 на рис. 4 распространение пламени по аэровзвеси бурого угля при конкретном значении C_{OX} возможно лишь в определенном диапазоне концентраций пыли: $LEL(C_{OX}) < C_D < UEL(C_{OX})$. Полагают, что при неравномерном распределении пыли по объему камеры распространение пламени затронет только те участки аэровзвеси, локальная концентрация пыли в которых соответствует этому диапазону. По мере приближения C_{OX} к LOC_1 распространение пламени по аэровзвеси становится возможным во все более узком диапазоне C_D , а объем аэровзвеси, охваченной пламенем, и, следовательно, P_{max} стремятся к нулевому значению.

Протяженность диапазона C_{OX} , в пределах которого ожидается резкое снижение P_{max} аэровзвеси, для бурого угля удовлетворяет неравенству

$$\Delta C_{OX} < 0,5 \text{ \% об.} \quad (10)$$

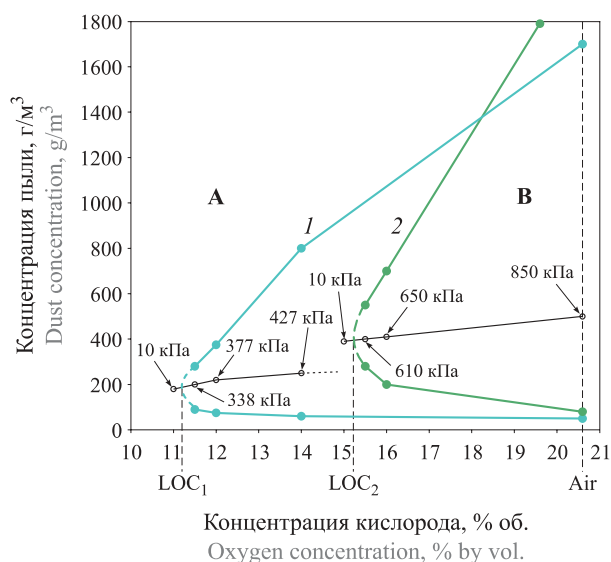


Рис. 4. Граница между областями невзрывоопасных (А) и взрывоопасных (В) аэровзвесей бурого угля (1) [21] и испанского лигнита (2) [24]. Стрелки указывают координаты (C_D , C_{OX}), отвечающие концентрации пыли C_D , при которой для заданного в опытах содержания кислорода C_{OX} в воздухе получено приведенное значение максимального давления P_{max}

Fig. 4. The boundary between the areas of non-explosive (A) and explosive (B) brown coal (1) [21] and Spanish lignite (2) [24] dust/air mixture. The arrows indicate the coordinates (C_D , C_{OX}) corresponding to the C_D dust concentration, at which the maximum pressure P_{max} is given for the C_{OX} oxygen content specified in the experiments

Выполнение неравенства (10) подтверждают также исследования зависимости взрывоопасности испанского лигнита от начального содержания кислорода в 1000-л камере при начальной температуре 293 К (20 °С) [24]. Граница, разделяющая взрывоопасные аэровзвеси этой пыли от невзрывоопасных, представлена на рис. 4 кривой 2. Пунктирная часть этой кривой является естественной аппроксимацией для диапазона 15 % об. $< C_{OX} < 15,5$ % об., с которым в [24] не работали. На границах этого диапазона C_{OX} для P_{max} получены значения около 10 и 610 кПа соответственно.

Справедливость (10) для бурого угля и испанского лигнита, у которых значения LOC существенно различаются (11 и 15 % об. соответственно), порождает уверенность в возможности распространения действия (10) на меламин, у которого $LOC \approx C_{OX0}$. В дальнейшем будем предполагать, что ΔC_{OX} для меламин также удовлетворяет правилу (10), хотя малочисленность опубликованных исследований зависимости P_{max} от C_{OX} в 1000-л камере не позволяет назвать такое обобщение статистически обоснованным.

Очевидно, что протяженность диапазона C_{OX} , в пределах которого наблюдаются малые значения P_{max} , меньше ΔC_{OX} и, следовательно, не превышает

0,5 % об. Отсюда с учетом (4) вытекают следующие ограничения на величину LOC для пылей с низким уровнем взрывоопасности:

$$C_{OX,0} > LOC > C_{OX,0} - 0,5. \quad (11)$$

3. Анализ сведений о взрывоопасности меламина

3.1. Результаты, полученные в 1000-л камере

Обратимся к надежным результатам исследования меламина в 1000-л камере, представленным двумя первыми строками табл. 1. Расчет по методам, изложенным в [11], показывает, что отличием реальных условий обращения аэровзвеси исследуемой пыли в 1000-л камере от нормальных условий можно пренебречь: повышение начальной температуры (менее 5 °C) и начального давления (менее 3 кПа) укладывается в диапазон возможных изменений комнатной температуры и атмосферного давления.

Рассмотрим данные табл. 1 для образца меламина № 2 с $d_m = 52$ мкм. Для этого образца меламина $P_{\max}$ имеет величину, которая в пределах допустимой точности измерений (± 10 кПа [2]) совпадает с оценкой (7) для скачка давления, вызванного срабатыванием ИЗ: $\Delta P_{ci} \approx 3,2$ кПа. Таким образом, разумно, не прибегая к критерию (2), полагать, что образец № 2 относится к НГП.

Рассмотрим данные табл. 1 для образца № 1 с $d_m < 10$ мкм. Для этого образца $P_{\max} = 50$ кПа. Поскольку $P_{\max} < P_m^* = 100$ кПа, данный образец меламина также относится к НГП.

3.2. Сравнение результатов, полученных в 1000-л и 20-л камерах

Рассмотрим три образца меламина, исследовавшихся при одинаковом начальном содержании кислорода в воздухе $C_{OX,0}$. Сведения о взрывоопасности данных образцов приводятся в первых трех строках табл. 1. Применим к данным образцам известное эмпирическое правило [8, 12], согласно которому взрывоопасность аэровзвеси любого конкретного дисперсного материала монотонно снижается (по направлению стрелок) с увеличением размера частиц:

образец № 1 $\rightarrow$ образец № 3 $\rightarrow$ образец № 2.

Данное правило распространяется не только на значения параметра $P_{\max}$ (убывают), но и на значения таких параметров, как LOC (растет) или LEL (растет).

Поскольку в рассматриваемой группе образцов меламина дисперсность образца № 3 занимает промежуточное значение, из упомянутого правила следует, что параметр $P_{\max}$ для аэровзвеси этого образца должен удовлетворять соотношению

$$50 \text{ кПа} \geq P_{\max} \geq 10 \text{ кПа}. \quad (12)$$

Это означает, что аэровзвесь образца меламина № 3 должна относиться к невзрывоопасным аэровзвесям. С учетом (11) для аэровзвеси образца № 3 должно выполняться неравенство

$$LOC > C_{OX,0} = (20,7 \pm 0,1) \% \text{ об.} \quad (13)$$

3.3. Результаты исследования образца № 3 в 20-л камере

3.3.1. Случай $C_{OX} = C_{OX,0}$

Результат исследования образца № 3 в 20-л камере противоречит выводам предыдущего подраздела, демонстрируя высокую взрывоопасность данного образца: $P_{\max} = 690$ кПа. Полученное расхождение оценок взрывоопасности образца № 3 обусловлено особенностями методики испытаний пыли в 20-л камере. В отличие от испытаний в 1000-л камере, которым подвергались образцы № 1 и 2, испытание в 20-л камере проводится фактически при повышенных (по отношению к P_0 и T_0) значениях начальных параметров состояния аэровзвеси [11]. Увеличение начальных значений температуры и давления исследуемой аэровзвеси в 20-л камере приводит к росту взрывоопасности аэровзвеси, что и продемонстрировано данными табл. 1.

Таким образом, реальная взрывоопасность образца меламина № 3, отвечающая нормальным начальным условиям испытания его аэровзвеси, находится в соответствии с оценками (12) и (13). Результаты исследования аэровзвеси образца меламина № 3 в 20-л камере интересны тем, что позволяют оценить начальные параметры состояния аэровзвеси этого образца, при которых наблюдается отмеченный выше переход от невзрывоопасной аэровзвеси к аэровзвеси с высокой взрывоопасностью. Ниже с этой целью используются расчетно-экспериментальные методы определения увеличения начальных значений температуры и давления исследуемой аэровзвеси в 20-л камере, предложенные в [11].

Для 20-л камеры, рекомендованной стандартами [2–5], первичное увеличение начальной температуры аэровзвеси меламина на ΔT_1 происходит с момента начала распыления порошка в камере до момента срабатывания ИЗ. Данное увеличение температуры обязано в основном работе по вытеснению воздуха из ресивера в объем камеры. Эту работу совершает та часть сжатого воздуха, которая не покидает ресивер. Оценка ΔT_1 имеет вид:

$$\Delta T_1 \approx \frac{1,3T_0}{1 + \Theta} \left[\left(\frac{P_{R,0}}{P_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \frac{V_R}{V} \approx 10 \text{ K},$$

где Θ — отношение теплосодержаний фаз аэровзвеси; $\Theta = c_D C_D / c_V C_a$;

c_D , c_V — средняя теплоемкость соответственно пыли и воздуха для рассматриваемого диапазона

Таблица 2. Результаты испытаний образца меламина № 3 в 20-л камере с учетом (6) (по данным TÜV SÜD Schweiz AG)
Table 2. Test results of melamine sample No. 3 in a 20-liter chamber, taking into account (6) (according to TÜV SÜD Schweiz AG)

Параметр Parameter	Значение C_{OX} , % об. / Value C_{OX} , % by vol.												
	$C_{OX,0}$							18			17		
	при C_D , г/м ³ / at C_D , g/m ³												
	30	60	125	250	500	750	1000	125	250	500	125	250	500
$P_{m,20l}$, кПа $P_{m,20l}$, kPa	...	...	...	50	670	50	...	...	50	50	...	...	...
$P_{m,cal}$, кПа $P_{m,cal}$, kPa	0	0	0	10	690	10	0	0	20	10	10	10	0

Примечание. Взрывоопасность образца № 3 может проявиться при энергоемком (10 кДж) ИЗ.

Note. Explosibility of sample No. 3 can occur with 10 kJ ignition source.

температур аэровзвеси от 298 до 353 К (от 25 до 80 °С); $c_D = 1230$ Дж/(кг·К); $c_V = 720$ Дж/(кг·К); $P_{R,0}$ — начальное абсолютное давление в ресивере; $P_{R,0} = 2100$ кПа; V_R — объем ресивера; $V_R = 0,6$ л; C_a , C_D — начальная концентрация соответственно воздуха и меламина в аэровзвеси, для которой получено $P_{max} = 50$ кПа; $C_a = 1,2$ кг/м³; значение C_D неизвестно, но с учетом высокого LEL = 1 кг/м³ для рассматриваемого образца № 3 предполагаем, что $C_D \sim 1,5$ кг/м³.

Дополнительное повышение температуры свежей аэровзвеси на ΔT_2 возникает при ее адиабатическом сжатии во время горения ИЗ и локального выгорания взвешенной пыли в некоторой окрестности пламени ИЗ. Оценка ΔT_2 имеет вид:

$$\Delta T_2 \approx (T_0 + \Delta T_1) \left[\left(1 + \frac{P^*}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma+\Theta}} - 1 \right], \quad (14)$$

где γ — показатель адиабаты для воздуха; $\gamma = 1,4$; P^* — максимальное регистрируемое в опытах давление в камере, при котором взрыв аэровзвеси не состоялся.

Из представленных в табл. 2 данных следует, что увеличение температуры аэровзвеси при адиабатическом сжатии до избыточного давления $P_{m,20l} \approx 50$ кПа оказывается недостаточным для перехода аэровзвеси во взрывоопасное состояние. Подставляя в (14) $P^* = 50$ кПа и $\Theta = 0,72$ (для $C_D = 500$ г/м³), получим $\Delta T_2 = 15$ К. Таким образом, аэровзвесь образца меламина № 3 для рассматриваемых концентраций горючего не взрывается при давлении $P = 50$ кПа и температуре $T = T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2 = 323$ К (или 50 °С).

Опыт, отвечающий кривой 2 на рис. 5, приводит к значению $P_{m,cal} > P_{max}$ и относится к случаю взрыва аэровзвеси. Имея единственный опыт со взрывом аэровзвеси, целесообразно верхней оценкой P^* считать уровень давления 60 кПа (пунктир на рис. 5), которому соответствует первый перегиб графика $P(t)$.

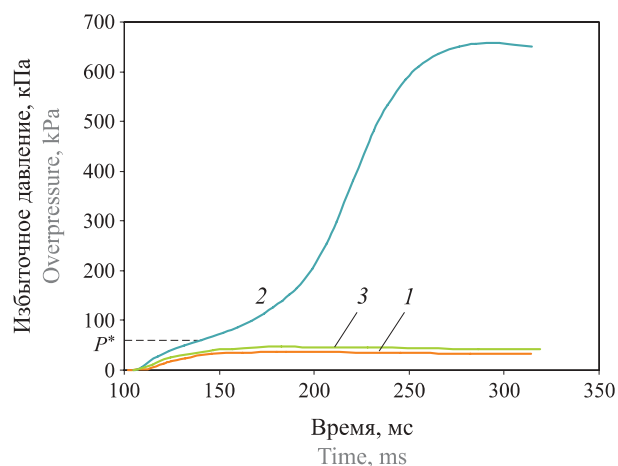


Рис. 5. Зависимость избыточного давления P в 20-л камере от времени t при начальном содержании кислорода в воздухе $C_{OX} = 20,8$ % об. для трех концентраций меламина C_D в аэровзвеси: 1 — 250 г/м³; 2 — 500 г/м³; 3 — 750 г/м³ (по данным TÜV SÜD Schweiz AG)

Fig. 5. Dependence of overpressure P in the 20-l chamber on the time t with the initial oxygen content in the air $C_{OX} = 20.8$ % by vol. for three concentrations of melamine C_D in dust/air mixture: 1 — 250 g/m³; 2 — 500 g/m³; 3 — 750 g/m³ (Data provided by TÜV SÜD Schweiz AG)

До этого уровня вторая производная зависимости $P(t)$ отрицательна, что характерно для опытов, в которых взрыв аэровзвеси отсутствовал (кривые 1 и 3 на рис. 5). С превышением уровня 60 кПа возникает ускоренный рост $P(t)$, характерный для случая взрыва. Подставляя в (14) $P^* = 60$ кПа и $\Theta = 0,72$, получим $\Delta T_2 = 26$ К. Таким образом, аэровзвесь образца меламина № 3 при концентрации горючего 500 г/м³, давлении 50 кПа и температуре $T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2 = 334$ К (или 61 °С) относится к аэровзвесьям с высокой взрывоопасностью.

Согласно [11] влияние на LOC увеличения начального давления может иметь различные знаки, но не превышает влияния, которое будет оказывать (при неизменном давлении) дополнительное увеличение начальной температуры на $\Delta T_3 = 0,25\Delta T_2 = 7$ К.

Следовательно, в рамках консервативного приближения следует ожидать, что при абсолютном давлении 100 кПа и обычном содержании кислорода в воздухе $C_{OX,0}$ аэровзвесь образца меламина № 3 будет заведомо взрывоопасной, если ее температура превысит $T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = 341$ К (или 68 °С).

Пренебрегая слабым влиянием давления на взрывоопасность аэровзвеси, отметим в завершение следующее важное обстоятельство. Повышение температуры до 50 °С (в результате совместного влияния распыления и адиабатического сжатия) оказалось недостаточным для перехода невзрывоопасной аэровзвеси меламина в состояние взрывоопасной аэровзвеси. В то же время повышение температуры до 61...68 °С переводит невзрывоопасную аэровзвесь меламина в аэровзвесь с высокой взрывоопасностью.

3.3.2. Случай $C_{OX} < C_{OX,0}$

С учетом выводов п. 3.3.1 и правила (10) для аэровзвеси образца меламина № 3 справедливо соотношение (11). В связи с этим результаты исследований, подтверждающие взрывоопасность данного образца при начальном содержании кислорода в аэровзвеси ниже 20,2 % об., являются ошибочными. В частности, заключение специалистов фирмы TÜV SÜD Schweiz AG о том, что для образца меламина № 3 в соответствии с данными табл. 1 $LOC = 17$ % об., является ошибочным. Имеются следующие две причины такой ошибки.

1. Для пыли с низкой взрывоопасностью нельзя использовать формальный критерий взрыва аэровзвеси в 20-л камере вида (1) с $P_m^* = 30$ кПа. Соответственно, нельзя для этой пыли пользоваться правилом (6) при корректировке результата исследования.

2. Исследование в 20-л камере происходит при повышенных значениях начальной температуры аэровзвеси и давления воздуха, которые приводят к росту взрывоопасности пыли. При этом возможно возникновение качественной ошибки, когда невзрывоопасная при нормальных начальных условиях взвешенная пыль будет по результатам исследований в 20-л камере классифицирована как пыль с высокой взрывоопасностью.

4. Обсуждение результатов

Некоторые результаты данной работы, изложенные в предыдущих разделах, по мнению автора, нетривиальны и нуждаются в пояснениях либо в попытке объяснения, которые приводятся в настоящем разделе.

4.1. Согласно справочным данным (см. подразд. 1.1) меламин имеет значительную теплоту сгорания и в соответствии с эмпирическими правилами [20] аэровзвесь мелкодисперсного образца ($d_m < 10$ мкм) должна обладать высокой взрыво-

опасностью (P_{max}) и низким расчетным значением LEL (около 0,1 кг/м³). Однако в действительности этого не наблюдается (см. табл. 1).

По мнению автора, исключение меламина из общих правил можно объяснить спецификой его термического разложения, которое описывается реакцией (5). Из двух продуктов разложения меламина реальное участие в реакции горения принимает только аммиак, на который приходится около 25 % от всего запаса химической энергии исходного меламина. Второй продукт разложения меламина, представляющий собой термостабильный полимер $(C_3N_4)_n$, либо не участвует в реакции горения, либо участвует, но с таким опозданием, при котором это участие не дает существенного вклада в механизм самоподдерживающегося движения пламени по аэровзвеси меламина. Подобный механизм частичного участия горючей массы дисперсного материала во взрыве не уникален и отмечается, например, для угольной пыли, горение которой в условиях пылевого взрыва ограничивается в основном летучей составляющей [12].

Гипотеза об участии в горении аэровзвеси только аммиачной составляющей продуктов разложения меламина в соответствии с эмпирическими правилами [20] приводит к значению LEL порядка 0,4 кг/м³. Поскольку такое значение LEL подтверждается результатами исследования меламина в 1000-л и 20-л камерах (см. табл. 1 и 2), высказанная гипотеза получает экспериментальное подтверждение. Дополнительная термодинамическая оценка давления взрыва аэровзвеси меламина с концентрацией 500 кг/м³ в 20-л камере показывает, что участие второго компонента разложения меламина $(C_3N_4)_n$ в увеличении давления взрыва составляет не более 20 % масс.

4.2. Использованный в настоящей работе подход [11] к оценке низкой взрывоопасности пыли с использованием параметра Δ_{OX} (4) назван более совершенным по сравнению с подходом [9, 10], использующим критерий (3). Это объясняется тем, что неопределенная в критерии (3) величина K_{st}^* может быть рассчитана в явном виде на основе результатов, полученных в [11].

Схема расчета иллюстрируется геометрическими построениями на рис. 6. График $K_{st}(C_{OX})$ имеет вид луча, берущего начало в точке на оси C_{OX} , отвечающей значению LOC [12]. При нормальных начальных условиях испытаний график $K_{st}(C_{OX})$ для невзрывоопасной аэровзвеси (1) полностью расположен в области $C_{OX} > C_{OX,0}$. Увеличение начальных значений температуры и давления приводит к параллельному оси C_{OX} смещению данного графика в сторону, указанную стрелками (с учетом малых изменений давления и температуры угол α предполагается постоянным, а влияние на изменение

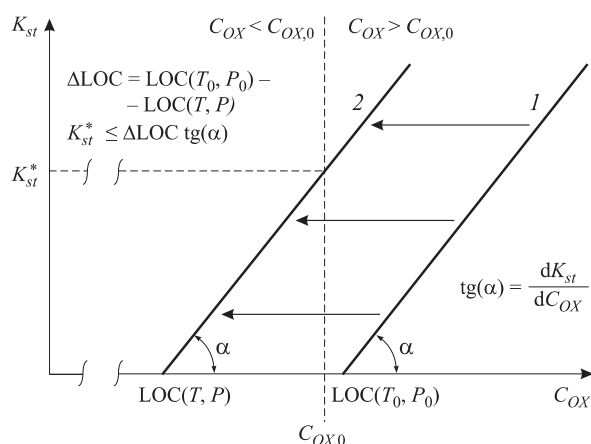


Рис. 6. Зависимости индекса взрывоопасности K_{st} от содержания кислорода в воздухе C_{OX} вблизи типичного для атмосферного воздуха значения параметра ($C_{OX,0}$) для аэровзвеси, невзрывоопасной при нормальных условиях (1), и для той же аэровзвеси при повышенных значениях температуры T и давления P (2)

Fig. 6. Dependences of the explosion index K_{st} on the oxygen content in air C_{OX} near the typical value for atmospheric air of the parameter value ($C_{OX,0}$) for dust/air mixture, non-explosive under normal conditions (1), and for the same dust/air mixture with elevated temperatures T and pressure P (2)

LOC — линейным). Смещение приводит к тому, что $LOC(T, P)$ опускается ниже $C_{OX,0}$, и аэровзесь становится взрывоопасной. Для такой аэровзвеси значение индекса взрывоопасности, отвечающего $C_{OX,0}$, сопоставимо с величиной K_{st}^* .

В рамках принятых допущений и с учетом соотношения между влиянием ΔT и ΔP на LOC [11] получим:

$$K_{st}^* \leq \left[\Delta T \left(-\frac{\partial LOC}{\partial T} \right)_P + \Delta P \left(-\frac{\partial LOC}{\partial P} \right)_T \right] \frac{dK_{st}}{dC_{OX}} \approx (1 \pm 0,25) \Delta T \left(-\frac{\partial LOC}{\partial T} \right)_P \frac{dK_{st}}{dC_{OX}},$$

где ΔT , ΔP — изменение начальных значений температуры и давления исследуемой аэровзвеси в процессе испытаний по конкретной методике (например, в 20-л камере Bureau of Mines [9] или в 20-л камере R. Siwek [10]); $\Delta T = T - T_0$, $\Delta P = P - P_0$;

$$\left(-\frac{\partial LOC}{\partial T} \right)_P \approx 2 \cdot 10^{-2} \% \text{ об.}/\text{K};$$

$\frac{dK_{st}}{dC_{OX}}$ — наклон зависимости $K_{st}(C_{OX})$ в области $C_{OX} > LOC$.

ти $C_{OX} > LOC$.

4.3. Малая протяженность диапазона C_{OX} , отвечающего аэровзвесям с низкой взрывоопасностью (следует допускать, что эта протяженность бывает заметно меньше 0,5 % об.), свидетельствует о принципиальной роли равномерного распределения кислорода по объему камеры. Разумно предположить,

что такая роль обусловлена существованием предела (по C_{OX}) для горения одиночной частицы.

В пользу предположения о микроскопической природе величины LOC свидетельствует близость значений этого параметра, полученных для аэровзвеси одного и того же образца пыли в камерах различного объема и конструкции [12].

Малая протяженность диапазона C_{OX} должна учитываться при обеспечении взрывобезопасности предприятий, на которых обращается невзрывоопасная аэровзесь, имеющая $LOC \approx C_{OX,0}$. При весьма незначительном нагреве такой аэровзвеси (на 10...20 °C) происходит ее переход в аэровзесь с высокой взрывоопасностью (с $P_{max} \gg 100$ кПа).

Заключение

Следует ожидать, что взрыв аэровзвеси при стандартных испытаниях в камерах объемом 20 и 1000 л сопровождается скачком давления, превышающим 100 кПа.

Для аэровзвеси с низкой взрывоопасностью, т. е. имеющей максимальное давление взрыва P_{max} порядка 100 кПа, минимальное взрывоопасное содержание кислорода (LOC) превышает 20,2 % об. Для такой аэровзвеси нельзя использовать правило европейских и американских стандартов по корректировке результата определения P_{max} в 20-л камере с целью привести этот результат в соответствие с ожидаемым результатом исследования в 1000-л камере. Нельзя также использовать предлагаемый европейскими стандартами формальный критерий взрыва аэровзвеси на основе требования о преодолении порогового значения давления, равного 30 кПа.

Анализ известных результатов исследования аэровзвесей трех образцов меламина со средним размером частиц d_m соответственно менее 10, 19 и 52 мкм показал, что при нормальных условиях (абсолютном давлении $P_0 = 100$ кПа, температуре $T_0 = 25$ °C) и содержании кислорода в воздухе $C_{OX,0} = (20,7 \pm 0,1) \% \text{ об.}$ данные аэровзвеси являются невзрывоопасными. В связи с этим результаты исследования аэровзвеси образца меламина с $d_m = 19$ мкм специалистами TÜV SÜD Schweiz AG, Swiss, Basel в 20-л камере Р. Сивека, согласно которым получено значение $LOC = 17 \% \text{ об.}$, следует признать ошибочными. Ошибочным также является утверждение этих специалистов о том, что аэровзесь образца меламина с $d_m = 19$ мкм может проявить себя как аэровзесь с высокой взрывоопасностью при условии ее воспламенения источником зажигания с большим запасом энергии (10 кДж).

Аэровзесь образца меламина с $d_m = 19$ мкм переходит в состояние аэровзвеси с высокой взрывоопасностью ($P_{max} \gg 100$ кПа) при нагреве. Следует ожидать, что такой переход заведомо произойдет

при увеличении температуры аэровзвеси до 68 °С. Важность данного результата обусловлена тем, что в производстве дисперсного меламина допускается транспортировка готового продукта воздухом с температурой свыше 100 °С.

Температура, при которой аэровзвесь меламина с $d_m = 52$ мкм переходит в состояние аэровзвеси с высокой взрывоопасностью, выше, чем для образца меламина с $d_m = 19$ мкм. Для уточнения температуры такого перехода требуется проведение дополнительных исследований.

Следует ожидать, что невзрывоопасная аэровзвесь, у которой $LOC \approx C_{OX,0}$, при нагреве на 10...20 °С переходит в аэровзвесь с высокой взрывоопасностью.

Перечень использованных сокращений и основных обозначений

ВГП (НГП) — взрывоопасная (невзрывоопасная) горячая пыль;

ИЗ — источник зажигания;

C_D — концентрация пыли в аэровзвеси;

$C_{OX} (\Delta C_{OX})$ — концентрация (диапазон концентраций) кислорода в воздухе;

$C_{OX,0}$ — концентрация кислорода в атмосферном воздухе;

Δ_{OX} — $C_{OX,0} - LOC$;

d_m — средний размер частиц пыли;

E_{ci} — энергия источника зажигания;

K_m — $(dP/dt)_m V^{1/3}$;

K_{st} — наибольшее значение K_m в опытах с различными C_D ;

K_{st}^* — минимальное значение K_{st} в опытах со взрывом аэровзвеси;

LOC — минимальное взрывоопасное содержание кислорода в воздухе;

$LEL (UEL)$ — нижний (верхний) концентрационный предел взрыва;

P — избыточное давление в камере;

P^* — максимальное значение P в опытах без взрыва аэровзвеси;

$P_m, (dP/dt)_m$ — максимум зависимостей $P(t)$ и (dP/dt) в единичном опыте;

P_m^* — минимальное значение P_m при взрыве аэровзвеси;

P_i — значение P к моменту инициирования ИЗ;

P_{max} — наибольшее из значений P_m в опытах с различными C_D ;

P_{c0} — начальное значение P ;

P_{ci} — изменение P при срабатывании ИЗ в отсутствие пыли;

P_0, T_0 — нормальные значения абсолютного давления и температуры;

t — время с момента начала создания аэровзвеси в камере;

t_{ci} — момент инициирования ИЗ;

t_r — момент выравнивания давления в системе *камера – ресивер*;

T — температура в камере;

T_{min} — ожидаемая минимальная температура горения аэровзвеси;

ΔT_1 — приrost температуры в камере во время распыления порошка;

ΔT_2 — приrost температуры в камере, вызванный горением в окрестности ИЗ;

V — объем взрывной камеры;

Θ — отношение теплосодержаний фаз аэровзвеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. NFPA 654. Standard for the prevention of fire and dust explosions from the manufacturing, processing, and handling of combustible particulate solids. — 2017 Edition. — Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association, 2012. — 72 p.
2. EN 14034-1:2004+A1:2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds — Part 1: Determination of the maximum explosion pressure p_{max} of dust clouds. — European Committee for Standardisation (CEN), 2011. — 30 p.
3. EN 14034-2:2006+A1:2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds — Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dp/dt)_{max}$ of dust clouds. — European Committee for Standardisation (CEN), 2011. — 30 p.
4. 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.
5. EN 14034-4:2004+A1:2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds — Part 4: Determination of the limiting oxygen concentration LOC of dust clouds. — European Committee for Standardisation (CEN), 2011. — 30 p.
6. 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.
7. ASTM E1226–12a. Standard test method for explosibility of dust clouds. — West Conshohocken, PA : ASTM International, 2012. — 13 p. DOI: 10.1520/E1226-12A.

8. Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben / Scholl E. W., Reeh D., Wiemann W. u. a. // SFT-Report. — 1979. — No. 2.2. — 100 s. (in German).
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. 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.
11. Полетаев 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.
12. Eckhoff R. K. Dust explosions in the process industries. — 3rd edition. — Boston : Elsevier Science, Gulf Professional Publishing, 2003. — 720 p.
13. Haynes W. M. (ed.). CRC Handbook of Chemistry and Physics. — 95 edition. — CRC Press, 2014. — P. 3–516.
14. 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.
15. Morton J. S. The synthesis, reduction, and decomposition of novel high-nitrogen bis s-triazinyl hydrazines and diazines : Dr. chem. sci. diss. — University of Rhode Island, 2008.
16. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы : учебное пособие. — М. : Едиториал УРСС, 2002. — 113 с.
17. Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance. GESTIS-DUST-EX. URL: <http://staubex.ifa.dguv.de/explosuche.aspx>.
18. Glarner T. Temperatureinfluss auf das Explosions- und Zündverhalten brennbarer Stäube / Dissertation ETH Zürich, Nr. 7350, 1983; Glarner T. Mindestzündenergie — Einfluss der Temperatur / VDI-Berichte Nr. 494, Seite 109–118, 1984.
19. Lipatnikov A. Fundamentals of premixed turbulent combustion. — Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. — 548 p. DOI: 10.1201/b12973.
20. Selle H., Zehr J. Beurteilung der Experimentalwerte für die untere Zündgrenze von Staub / Luft-Gemischen mit Hilfe Thermochemischer Berechnungen. — Staub und Reinhalt Luft, 1954. — Bd. 38. — S. 583 (in German).
21. Wiemann W. Influence of temperature and pressure on the explosion characteristics of dust/air and dust/air/inert gas mixtures // Industrial Dust Explosions / Kenneth L. Cashdollar, Martin Hertzberg (eds.). — Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1987. — P. 33–44. DOI: 10.1520/stp28164s.
22. 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.
23. Bartknecht W. Explosionen, ablauf und schutzmaßnahmen. — Berlin : Springer-Verlag, 1980. — 259 s. DOI: 10.1002/cite.330530411.
24. Wilén C., Moilanen A., Rautalin A., Torrent J., Conde E., Lödel R., Carson D., Timmers P., Brehm K. Safe handling of renewable fuels and fuel mixtures / VTT Publications 394. Espoo : Technical Research Centre of Finland, 1999. — 125 p. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P394.pdf> (дата обращения: 01.08.2017).

Материал поступил в редакцию 10 августа 2017 г.

Для цитирования: Полетаев Н. Л. О взрывоопасности аэрозвеси меламина // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 9. — С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28.

English

ON EXPLOSIBILITY OF MELAMINE DUST/AIR MIXTURE

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

The work is mainly devoted to the analysis of dust hazard features, whose test in a standard blasting chamber with a volume of 20 liters to 1 m³ leads to a maximum pressure $P_{\max}$ comparable to a value of 100 kPa. Such dust is suggested to be considered dust with a low explosion hazard, in contrast to dust with high explosion hazard ($P_{\max} \gg 100$ kPa). The choice of the critical pressure level (≈ 100 kPa), indicating the flame propagation over a considerable distance from the ignition source, is based on the analogy between the models of percolation theory and the simplified combustion scheme for a macroscopically inhomogeneous dust/air mixture.

For dust with low explosion hazard (Poletaev, 2017), the limiting oxygen concentration (LOC) is close to the normal oxygen content in the atmosphere $C_{OX,0} = (20.7 \pm 0.1) \%$ by vol. It was proposed to use the parameter $\Delta_{OX} = C_{OX,0} - \text{LOC}$ to evaluate the dust explosion hazard along with the standard parameter $P_{\max}$. It is shown that for dust with a low explosion hazard $0 < \Delta_{OX} < 0.5 \%$ by vol.

An illustration of the conclusions of the work was carried out using the known results of a study in 20-l and 1000-l blasting chambers of three melamine samples with an average particle size d_m of less than 10, 19 and 52 μm , respectively. It is shown that the mixtures of all the examined melamine samples with atmospheric air are non-explosive under normal conditions (absolute pressure 100 kPa, temperature 25 °C). To explain the non-explosive of melamine dust having a high calorific value (15.67 MJ/kg), it has been suggested that the volatile component of its thermal decomposition products (ammonia) is burned, which allows an analogy between the combustion of melamine and coal particles. On the basis of the fact that a study of dust in a 20-liter chamber is actually performed at elevated initial values of temperature and pressure (Cashdollar and Chatrathi, 1993, Poletaev, 2017), the temperature at which a melamine sample ($d_m = 19 \mu\text{m}$) forms dust/air mixture with a high explosive hazard was determined (68 °C). The importance of this result is due to the fact that in the production of dispersed melamine, the finished product can be transported by air with a temperature of over 100 °C.

In European standards EN 14034, the correction of the value of $P_{\max}$ obtained in a 20-liter chamber is proposed with the aim of predicting the value of this parameter, expected from the results of tests in a 1000-liter chamber. The above test feature in a 20-liter chamber makes such an adjustment erroneous in the case of dust with low explosion hazard. Taking into account this peculiarity and a number of empirical regularities of turbulent combustion of an dust/air mixture, an estimate of the minimum value of the index K_{st} , corresponding to the case of an explosion in a 20-liter chamber, is performed.

It is shown that for a subcritical non-explosive dust/air mixture ($\text{LOC} \approx C_{OX,0}$) the transition to a state of high explosion hazard is possible with heating by only 10...20 °C.

Keywords: dust explosion; explosion criterion; low explosibility; high LOC; melamine.

REFERENCES

1. NFPA 654. *Standard for the prevention of fire and dust explosions from the manufacturing, processing, and handling of combustible particulate solids*. 2017 Edition. Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2012. 72 p.
2. EN 14034-1:2004+A1:2011. *Determination of explosion characteristics of dust clouds — Part 1: Determination of the maximum explosion pressure $p_{\max}$ of dust clouds*. European Committee for Standardisation (CEN), 2011. 30 p.
3. EN 14034-2:2006+A1:2011. *Determination of explosion characteristics of dust clouds — Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dp/dt)_{\max}$ of dust clouds*. European Committee for Standardisation (CEN), 2011. 30 p.
4. 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.
5. EN 14034-4:2004+A1:2011. *Determination of explosion characteristics of dust clouds — Part 4: Determination of the limiting oxygen concentration LOC of dust clouds*. European Committee for Standardisation (CEN), 2011. 30 p.
6. 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.

7. ASTM E1226–12a. *Standard test method for explosibility of dust clouds*. — West Conshohocken, PA, ASTM International, 2012. 13 p. DOI: 10.1520/E1226-12A.
8. 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).
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. 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.
11. Poletaev N. L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 5–20 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20.
12. Eckhoff R. K. *Dust explosions in the process industries*. — 3rd edition. Boston, Elsevier Science, Gulf Professional Publishing, 2003. 720 p.
13. Haynes W. M. (ed.). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 95th edition. CRC Press, 2014, pp. 3–516.
14. 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.
15. Morton J. S. *The synthesis, reduction, and decomposition of novel high-nitrogen bis s-triazinyl hydrazines and diazines*. Dr. chem. sci. diss. University of Rhode Island, 2008.
16. Tarasevich Yu. Yu. *Perkolyatsiya: teoriya, prilozheniya, algoritmy* [Percolation: theory, applications, algorithms]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2002. — 113 p. (in Russian).
17. *Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance*. GESTIS-DUST-EX. URL: <http://staubex.ifa.dguv.de/explosuche.aspx>.
18. Glarner T. Temperatureinfluss auf das Explosions- und Zündverhalten brennbarer Stäube. In: *Dissertation ETH Zürich, Nr. 7350, 1983*; Glarner T. Mindestzündenergie — Einfluss der Temperatur. In: *VDI-Berichte Nr. 494*, Seite 109–118, 1984.
19. *Lipatnikov A.* Fundamentals of premixed turbulent combustion. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. 548 p. DOI: 10.1201/b12973.
20. Selle H., Zehr J. Beurteilung der Experimentalwerte für die untere Zündgrenze von Staub. In: *Luft-Gemischen mit Hilfe Thermochemischer Berechnungen*. Staub und Reinhalt Luft, 1954, Bd. 38, S. 583. (in German).
21. *Wiemann W.* Influence of temperature and pressure on the explosion characteristics of dust/air and dust/air/inert gas mixtures. In: Kenneth L. Cashdollar, Martin Hertzberg (eds.). *Industrial Dust Explosions*. Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1987, pp. 33–44. DOI: 10.1520/stp28164s.
22. 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.
23. Bartknecht W. *Explosionen, ablauf und schutzmaßnahmen*. Berlin, Springer-Verlag, 1980. 259 s. DOI: 10.1002/cite.330530411.
24. Wilén C., Moilanen A., Rautalin A., Torrent J., Conde E., Lödel R., Carson D., Timmers P., Brehm K. Safe handling of renewable fuels and fuel mixtures. In: *VTT Publications 394*. Espoo, Technical Research Centre of Finland, 1999. 125 p. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P394.pdf> (Accessed 1 August 2017).

For citation: Poletaev N. L. On explosibility of melamine dust/air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 9, pp. 15–28 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28.

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; e-mail: a_kalach@mail.ru)

А. С. КРУТОЛАПОВ, д-р техн. наук, доцент, заместитель начальника Института развития по учебно-методической работе, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

Д. С. КОРОЛЕВ, преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231)

Е. В. КАЛАЧ, канд. техн. наук, доцент кафедры физики, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231; e-mail: EVKalach@gmail.com)

УДК 614.849

РАСЧЕТ КАТЕГОРИИ ПОМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

Проанализирована базовая методика расчета категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности. Установлено, что она является ограниченной ввиду отсутствия в ней достоверных справочных данных, в частности по максимальному давлению взрыва вещества, что влияет на конечный результат избыточного давления. Принято решение усовершенствовать ее путем внедрения методики прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки на основе молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей. В качестве верификации спрогнозировано максимальное давление взрыва для ряда кислородсодержащих производных углеводородов и проведен расчет категории с учетом полученных значений. Установлено, что вновь полученные значения избыточного давления ниже заявленных, а следовательно, финансовые затраты на разработку системы обеспечения пожарной безопасности также будут снижены.

Ключевые слова: прогнозирование; пожароопасные свойства; нефтепереработка; пожарная безопасность; легковоспламеняющиеся жидкости; нейронные сети.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.29-34

Введение

При проектировании новых промышленных предприятий, складских и лабораторных помещений объектов нефтегазовой отрасли, в которых применяются или хранятся легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ), должен проводиться расчет избыточного давления возможного взрыва. Значение данного показателя позволит определить категорию помещения по взрывопожарной и пожарной опасности.

Основной целью такой классификации является выбор системы обеспечения пожарной безопасности, т. е. определение требований, обеспечивающих предотвращение вероятности возникновения пожара, а также обеспечение противопожарной защиты людей и имущества в случае возникновения пожара в зданиях, сооружениях и помещениях нефтегазового сектора [1].

Для расчета избыточного давления ΔP (кПа) газо- и паровоздушных смесей в сводах правил [2] предлагается следующее выражение:

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \frac{mZ}{V_{\text{св}} \rho_{\text{п}}} \frac{100}{C_{\text{ст}}} \frac{1}{K_{\text{н}}},$$

где $P_{\max}$ — максимальное давление, развиваемое при сгорании стехиометрической газо- или паровоздушной смеси в замкнутом объеме, определяемое экспериментально или по справочным данным в соответствии с требованиями; при отсутствии данных допускается принимать $P_{\max} = 900$ кПа; P_0 — начальное давление, кПа; допускается принимать $P_0 = 101$ кПа [2]; m — масса горючих паров ЛВЖ или горючих жидкостей (ГЖ), кг;

Z — коэффициент участия горючих газов и паров в горении; для ЛВЖ $Z = 0,3$ [2];

$V_{\text{св}}$ — свободный объем помещения, м^3 ;

$\rho_{\text{п}}$ — плотность пара ЛВЖ при расчетной рабочей температуре $t_{\text{р}}$ ($^{\circ}\text{C}$), $\text{кг}/\text{м}^3$;

$$\rho_{\text{п}} = \frac{M}{V_0 (1 + 0,00367 t_{\text{р}})};$$

V_0 — мольный объем, $\text{м}^3/\text{кмоль}$;

$V_0 = 22,413 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ [2];

$C_{\text{ст}}$ — стехиометрическая концентрация паров ЛВЖ/ГЖ, % (об.);

$K_{\text{н}}$ — безразмерный коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения; $K_{\text{н}} = 3$ [2].

Отметим, что проведение расчетов по каждому случаю достаточно трудоемкая задача, которая была решена нами в работе [3]. К тому же данная методика может быть ограниченной в связи с отсутствием достоверных справочных данных по физико-химическим свойствам веществ, используемых при расчете категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности.

На сегодняшний день известно свыше 100 млн. индивидуальных органических веществ. Однако их пожароопасные свойства изучены частично и лишь для нескольких тысяч кислородсодержащих органических соединений. Это связано в первую очередь с тем, что затраты на экспериментальное определение полного перечня пожароопасных характеристик для каждого вещества существенны [2].

В настоящее время для решения задачи, связанной с достоверным определением категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности, применяются различные расчетные методы, позволяющие прогнозировать пожароопасные свойства веществ, и в первую очередь нефтепродуктов и продуктов нефтепереработки, что не противоречит требованиям законодательства Российской Федерации [1]. Расчетные методы могут рассматриваться как альтернатива экспериментальному подходу к накоплению данных по показателям пожарной опасности веществ и материалов. Федеральный закон № 123-ФЗ и ГОСТ 12.1.044, входящий в перечень национальных стандартов на подтверждение положений “Технического регламента о требованиях пожарной безопасности”, допускают такой путь решения этой проблемы.

Рассматривая современные расчетные методики прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки [4], установили, что все они связаны с техническими трудностями, сложностью решения аппроксимационных уравнений и работают только в пределах одного класса рассматриваемых органических соединений [5, 6]. В связи с этим необходимость создания нового конкуренто-

способного подхода для расчета пожаровзрывоопасных свойств кислородсодержащих органических соединений является актуальной.

В качестве альтернативы существующим методам было решено использовать методику прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки на основе молекулярных дескрипторов [7, 8] и искусственных нейронных сетей [9, 10].

Основной целью исследования является прогнозирование максимального давления взрыва продуктов нефтепереработки, а основной задачей — определение категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности с учетом спрогнозированных значений.

В качестве объектов исследования выбраны кислородсодержащие производные предельных углеводородов, обращающиеся в нефтегазовой отрасли. Так, кетоны применяются для депарафинизации нефтепродуктов и характеризуются особой пожарной опасностью.

Методология

Одним из перспективных направлений является методика прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки, основанная на использовании молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей.

Предлагаемая методика лишена таких проблем, как большие временные и ресурсные затраты, сложности при расчетах. Кроме того, она позволяет в режиме реального времени без прерывания процесса прогнозировать пожароопасные свойства продуктов нефтепереработки. Схематически данная методика представлена на рис. 1.

Условный сценарий реализации предлагаемой методики включает в себя четыре основных этапа:

- *этап 1:* анализ технической документации на объект защиты и технологический процесс, осуществляемый в помещении;
- *этап 2:* определение наиболее пожаровзрывоопасного вещества, используемого на объекте защиты, и установление его пожароопасных характеристик;
- *этап 3:* расчет избыточного давления и определение категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности;
- *этап 4:* формирование полученных результатов.

С помощью программного комплекса CODESSA PRO для обучающей выборки рассчитано 38 типологических дескрипторов. На основе критического анализа полученных корреляционных зависимостей этих дескрипторов были рассчитаны значения максимального давления взрыва, представленные в табл. 1.

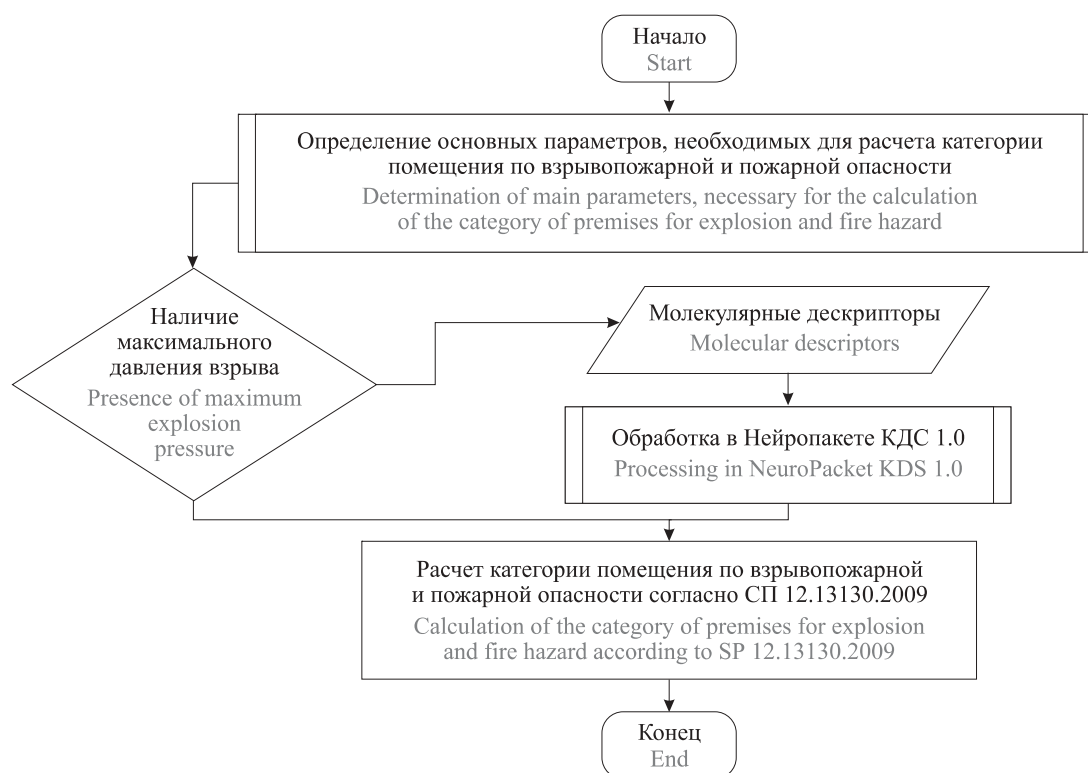


Рис. 1. Методика расчета категории помещения на основе данных о дескрипторах

Fig. 1. The procedure for calculating the category of the room on the basis of data on descriptors

Таблица 1. Результаты прогнозирования максимального давления взрыва предельных кетонов

Table 1. Results of forecasting the maximum burst pressure of limiting ketones

Номер вещества Substance number	Кислородсодержащие производные предельных углеводородов Oxygen-containing derivatives of saturated hydrocarbons	Прогнозируемые значения P_{max} , кПа Projected values P_{max} , kPa
1	2-Пентанон / 2-Pentanone	748
2	2-Октанон / 2-Octanone	879
3	2-Деканон / 2-Decanone	689
4	4-Гептанон / 4-Heptanone	870
5	2-Додеканон / 2-Dodecanone	753

* Справочные данные для этих производных отсутствуют [11, 12].
Reference data for these derivatives are absent [11, 12].

В табл. 2 приведены результаты расчета категории помещения при всех равных условиях.

Результаты сравнительного анализа избыточного давления, определенного по СП 12.13130.2009 и предлагаемой методике, приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что предлагаемая и действующая методики позволяют получать сопоставимые значения избыточного давления для кислородсодержащих производных предельных углеводородов.

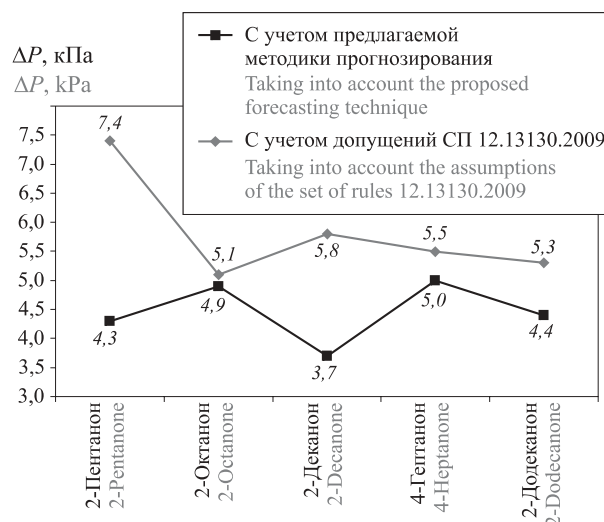


Рис. 2. Результаты сравнительного анализа расчетного избыточного давления

Fig. 2. Results of the comparative analysis of the calculated excess pressure

Выводы

Анализируя значения, полученные в результате расчета избыточного давления взрыва, из представленного на рис. 2 графика видим, что методика прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки на основе молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей не исключает существующей методики по определению ка-

Таблица 2. Результаты расчета категории помещения

Table 2. Results of calculating the category of premises

Кислородсодержащие производные предельных углеводородов Oxygen-containing derivatives of saturated hydrocarbons	M , кг/кмоль M , kg/kmol	$P_{\text{нас}}$, кПа (38 °C) $P_{\text{нас}}$, kPa (38 °C)	$C_{\text{ст}}$, % $C_{\text{ст}}$, %	$P_{\text{max1}}/P_{\text{max2}}$, кПа $P_{\text{max1}}/P_{\text{max2}}$, kPa	$\rho_{\text{п}}$, кг/м ³ $\rho_{\text{п}}$, kg/m ³	m , кг m , kg	ΔP_1 , кПа ΔP_1 , kPa	ΔP_2 , кПа ΔP_2 , kPa
2-Пентанон / 2-Pentanone	88,15	1,58	1,93	768/900	4,157	10	4,3	7,4
2-Октанон / 2-Octanone	128,2	0,5	6,44	879/900	1,804	10	4,9	5,1
2-Деканон / 2-Decanone	88,104	9,351	3,97	689/900	3,450	10	3,7	5,8
4-Гептанон / 4-Heptanone	114,3	1,442	3,33	870/900	2,902	10	5,0	5,5
2-Додеканон / 2-Dodecanone	98,3	1,78	3,47	753/900	3,305	10	4,4	5,3

тегории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности, представленной в СП 12.13130.2009 [2], а дополняет ее. Отметим, что совместное применение двух методик позволит дополнить и проверить существующие базы данных по показателям

пожаровзрывоопасности органических соединений, а также разработать более обоснованный перечень мероприятий, направленных на обеспечение пожарной безопасности предприятий нефтегазового сектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон Рос. Федерации от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 03.07.2016). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 15.06.2017).
2. СП 12.13130.2009. Определение категории помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с изм. № 1 от 01.02.2011). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071156> (дата обращения: 15.06.2017).
3. Королев Д. С. Определение безопасных объемов помещений с пылевоздушными смесями // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 4. — С. 111–113.
4. Королев Д. С. Современные методы определения пожароопасных свойств веществ (обзор) // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 6. — С. 202–210.
5. 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.
6. 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.
7. Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Гурьев Е. С. Методы оценки взрывопожароопасности топливоздушных смесей на примере керосина марки РТ. VIII. Сравнение методов Дорофеева, РД 03-409-01 и BST2 // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 3. — С. 6–12.
8. Алексеев С. Г., Гурьев Е. С., Барбин Н. М. Еще раз о сравнении методик прогнозирования последствий взрывов топливно-воздушных смесей // Проблемы анализа риска. — 2015. — Т. 12, № 2. — С. 56–70.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

Материал поступил в редакцию 28 июня 2017 г.

Для цитирования: Калач А. В., Крутолапов А. С., Королев Д. С., Калач Е. В. Расчет категории помещения на основе методики прогнозирования пожароопасных свойств продуктов нефтепереработки // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 9. — С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.29-34.

English

CALCULATION OF CATEGORY OF PREMISES ON THE BASIS OF THE METHOD OF FORECASTING FIRE-PROOF PROPERTIES OF OIL-REFINING PRODUCTS

KALACH A. V., Doctor of Chemical Sciences, Professor, Vice-Rector on Scientific Work, Voronezh Institute of State Fire Service of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya St., 231, Voronezh, 394052, Russian Federation; e-mail: a_kalach@mail.ru)

KRUTOLAPOV A. S., Doctor of Technical Sciences, Docent, Deputy Head of Development Institute for Educational and Methodological Work, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Russia, 196105, St. Petersburg, Russian Federation)

KOROLEV D. S., Lecturer of Fire Safety Department of Technological Processes, Voronezh Institute of State Fire Service of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya St., 231, Voronezh, 394052, Russian Federation)

KALACH E. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Physics Department, Voronezh Institute of State Fire Service of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya St., 231, Voronezh, 394052, Russian Federation; e-mail: EVKalach@gmail.com)

ABSTRACT

The article raises the urgent issue — the lack of physicochemical properties of the new synthesized substances. These properties will allow employees of supervisory activities 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 oxygen-containing hydrocarbons, which are used practically in all areas of industry and are produced according to reference data in the amount of more than several tens of millions of tons per year, it was possible to predict the maximum explosion pressure, i. e. one of the most important fire hazard properties of a substance, with the help of a technique for predicting the fire hazard properties of oil refining products based on molecular descriptors and artificial neural networks. The proposed methodology is implemented using the author's computer program "NeuroPacket KDS 1.0".

The program "NeuroPacket KDS 1.0" allows you to: download and view databases containing the structures of chemical compounds and their properties; to correlate the input data; to evaluate the received models statistically; 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 refined 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. In addition, the maximum explosion pressure was predicted for substances that are not known 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 results obtained, the category of premises for explosion and fire hazard was calculated. It was found that the estimated value of excess pressure was less than the claimed value, and therefore the financial costs of developing a fire safety system would also be reduced.

It should be noted 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: forecasting; fire hazard properties; oil refining; fire safety; flammable liquids; neural networks.

REFERENCES

1. *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 15 June 2017).
2. Set of rules 12.13130.2009. *Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard* (ed. 01.02.2011) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200071156> (Accessed 15 June 2017).
3. Korolev D. S. Determination of safe volumes of rooms with dust-air mixes. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova / Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2016, no. 4, pp. 111–113 (in Russian).
4. Korolev D. S. Modern methods for determining fire-hazardous properties of substances (review). *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova / Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2016, no. 6, pp. 202–210 (in Russian).
5. 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.
6. 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.
7. Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Guryev E. S. Analysis methods of explosion fire hazard of mixtures of fuel and air on an example for jet fuel RT. VIII. Comparison of methods of Dorofeev, RD 03-409-01 and BST2. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 3, pp. 6–12 (in Russian).
8. Alexeev S. G., Gur'ev E. S., Burbin N. M. About comparison of methods of forecasting of consequences of vapor cloud explosions again. *Problemy analiza riska / Issues of Risk Analysis*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 56–70 (in Russian).
9. Korolev D. S., Kalach A. V., Kargashilov D. V., Zhuchkov A. V. *Neuropacket KDS 1.0*. Certificate of state registration of the computer program, no. 2016614070, publ. date 20.05.2016 (in Russian).
10. 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.
11. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik*. 2-e izd. [Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing agents. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part I, 713 p. (in Russian).
12. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik*. 2-e izd. [Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing agents. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part II, 774 p. (in Russian).

For citation: Kalach A. V., Krutolapov A. S., Korolev D. S., Kalach E. V. Calculation of category of premises on the basis of the method of forecasting fire-proof properties of oil-refining products. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 9, pp. 29–34 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.29-34.

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

А. А. МИФТАХУТДИНОВА, адъюнкт кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: mif-afto@mail.ru)

С. А. НЕФЕДЬЕВ, д-р воен. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: doktorsan@mail.ru)

М. А. СИМОНОВА, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: masima82@inbox.ru)

М. Д. МАСЛАКОВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: maslakovpm@rambler.ru)

УДК 614.841.4:62

УСЛОВИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛЕГКОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

Представлены результаты исследований способов стабилизации наножидкостей на основе этанола; определены граничные условия для обеспечения пожарной безопасности процессов транспортировки модифицированных легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ). Методами рамановской спектроскопии установлено изменение надмолекулярной структуры этанола при электрофизическом воздействии на $10\ldots 20\text{ см}^{-1}$. По полученным данным об изменении интенсивности испарения этанола с открытой поверхности установлено, что интенсивность испарения зависит от концентрации MWCNT и снижается в течение первых 4 ч в среднем на 24 % после получения стабильной наножидкости. Показано, что при электрофизическом воздействии существенное снижение интенсивности испарения сохраняется в течение 5–6 ч, что объясняется большей стабильностью наночастиц в жидкости и снижением скорости образования горючей среды. Установлено, что при возрастании концентрации MWCNT в жидкости наблюдается снижение ее удельного сопротивления на 48 %, а при воздействии ПЧМП рост удельного электросопротивления жидкости замедляется, что связано с более медленным процессом агломераций наночастиц при электрофизическом воздействии. Сделан вывод о возможности применения углеродных наночастиц в качестве присадок.

Ключевые слова: легковоспламеняющиеся жидкости; этанол; многослойные углеродные нанотрубки; стабилизация; переменный частотно-модулированный потенциал; интенсивность испарения; статическое электричество.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.35-43

Введение

Хранение, перекачка и перевозка являются основными технологическими операциями при транспорте легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ). К наиболее вероятным последствиям возникновения аварийных ситуаций при транспорте ЛВЖ относится образование горючей среды в результате испарения жидкости при разгерметизации аппаратов и трубопроводов, воспламенение парогазовой смеси

от различных источников зажигания, в том числе от разрядов статического электричества.

Одним из способов снижения пожарной опасности процессов транспорта ЛВЖ является разработка технических и технологических решений по изменению тепло- и электрофизических свойств жидкостей путем безреагентной модификации [1] либо депонированием в базовую жидкость углеродных наноструктур [2, 3]. Полученные наножидкости

Таблица 1. Сведения о способах стабилизации наножидкостей**Table 1.** Information on the methods of stabilization of nanofluids

№ п/п No.	Источник Source	Характеристика наноматериала Characteristics of nanomaterials	Концентрация наночастиц, способ подготовки Concentration of nanoparticles, preparation method	Базовая жидкость Base fluid	Седиментационная стабильность наножидкости, ч Sedimentation stability of a nanofluid, hours
1	[6]	MWCNT ($d = 10...30$ нм, $l = 10...50$ мкм) MWCNT ($d = 10...30$ nm, $l = 10...50$ μ m)	1,6 % масс., ультразвуковое диспергирование 1.6 % by mass, ultrasonic dispersing	Толуол Toluene	0,3
				Ацетон Acetone	0,3
2	[7]	MWCNT ($d = 10...30$ нм, $l = 10...50$ мкм) MWCNT ($d = 10...30$ nm, $l = 10...50$ μ m)	0...1 % об., ультразвуковое диспергирование 0...1 % by vol., ultrasonic dispersing	Дистиллированная вода с додецилсульфатом натрия Distilled water with sodium dodecyl sulfate	2,0
3	[8]	MWCNT ($d = 20...30$ нм, $l = 5...10$ мкм) MWCNT ($d = 20...30$ nm, $l = 5...10$ μ m)	0,0036 % масс., ультразвуковое диспергирование с добавлением ПАВ 0.0036 % by mass, ultrasonic dispersion with the addition of surfactants	Изопропиловый спирт Isopropyl alcohol	2,5
				Толуол Toluene	0,2
				<i>n</i> -Ксилол <i>n</i> -Xylene	0,1
4	[9]	MWCNT ($d = 10$ нм, $l = 5...10$ мкм) MWCNT ($d = 10$ nm, $l = 5...10$ μ m)	0,25 % масс., ультразвуковое диспергирование с добавлением ПАВ 0.25 % by mass, ultrasonic dispersion with the addition of surfactants	Дистиллированная вода Distilled water	30

представляют собой коллоидные двухфазные системы с измененными физическими свойствами (теплопроводностью, вязкостью, электропроводностью и др.).

Вместе с тем применение электрофизического метода управления [4] свойствами наножидкостей может быть ограничено условиями и длительностью ее транспортировки. Способ депонирования наноструктур также сталкивается с проблемой агломерации наночастиц в жидкости [5].

Существуют различные способы подготовки наножидкостей, определяющие в дальнейшем их стабильность и сохранение физических свойств. К основным можно отнести одноступенчатый и двухступенчатый способы (табл. 1).

Одноступенчатый способ заключается в синтезе наночастиц в объеме базовой жидкости и позволяет существенно увеличить “время жизни” наножидкостей, однако малоприменим в промышленных масштабах и требует значительного усложнения технологии. Кроме того, в наножидкости могут присутствовать примеси реагентов, не участвующих в синтезе.

Двухступенчатый способ включает в себя последовательную подготовку наночастиц с последующим депонированием в базовую жидкость. Данный

способ является наиболее практичным при получении наножидкостей в промышленных масштабах, однако характеризуется интенсивной агломерацией наночастиц с высокой удельной площадью поверхности.

К способам стабилизации наножидкостей можно отнести применение поверхностно-активных веществ (ПАВ), химическую функционализацию наноматериалов (обработка наноматериалов химическими реагентами), в том числе содержащих многослойные углеродные нанотрубки (MWCNT), а также электростатическую стабилизацию [5].

Обобщенные сведения о некоторых способах стабилизации наноструктур и “времени жизни” наножидкостей с MWCNT приведены в табл. 1.

В работе [6] приведены сведения, что MWCNT, помещенные в углеводородные жидкости в концентрации 1,6 % масс., без применения дополнительных методов стабилизации в течение 24 ч в большей части (до 95...99 %) осаждаются на дне емкости. Небольшая часть УНТ (1...3 %) находится на поверхности жидкости в виде фрактальных агрегаций размером 5...10 мкм. Агрегации УНТ с фрактальными размерами 8...15 мкм находятся в объеме жидкости вблизи ее поверхности.

Используя допущение, что форма агрегаций наночастиц близка к сферической, скорость осаждения наноматериалов V можно описать с помощью закона Стокса:

$$V = \frac{2R^2}{9\mu} (\rho_p - \rho_L) g, \quad (1)$$

где R — радиус наночастиц;

μ — вязкость жидкости;

ρ_L, ρ_p — средняя плотность жидкости и наночастиц соответственно;

g — ускорение свободного падения [10].

Немаловажными факторами стабилизации наножидкостей является их температура [7].

В работе представлены результаты исследования способов стабилизации наножидкостей на основе этанола, а также определены граничные условия для обеспечения пожарной безопасности процессов транспортировки модифицированных ЛВЖ.

Целью настоящего исследования было установление условий стабилизации углеродных наночастиц в жидкостях для обеспечения условий безопасной транспортировки ЛВЖ на примере этанола. В ходе исследования рассматривались способы подготовки наножидкостей и методы стабилизации углеродных наночастиц в ЛВЖ, а также изучались некоторые свойства модифицированных наножидкостей с целью обоснования применения технологических решений для обеспечения пожарной безопасности при обращении с ЛВЖ.

Материалы и методы исследований

В качестве объектов исследования были выбраны углеродные наноматериалы, содержащие MWCNT ($l = 10 \dots 20$ мкм, $d = 10 \dots 30$ нм), которые были получены методом каталитического пиролиза на установке “CVDomna” [8]. В качестве базовой жидкости использовался этанол (ГОСТ 18300–87). Сводные

Таблица 2. Свойства базовой жидкости (этанола)

Table 2. Properties of the base liquid (ethanol)

№ п/п	Свойство Property	Значение Value
1	Молярная масса, кг/кмоль Molar mass, kg/mol	46,069
2	Температура вспышки, °С Flash point, °C	13
3	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	789
4	Поверхностное натяжение, Н/м Surface tension, N/m	$22,391 \cdot 10^3$
5	Удельная электропроводность, См/м Specific electrical conductivity, S/m	$0,769 \cdot 10^{-4}$

данные по свойствам базовой жидкости приведены в табл. 2.

Наножидкости получены путем диспергирования наноматериалов с MWCNT в базовой жидкости (с концентрацией 0,5 и 1,0 % масс.) при воздействии источника ультразвука с частотой 100 кГц в течение 1 ч при температуре 40 °С. В ходе экспериментов отдельные образцы наноматериалов подвергались электрофизическому воздействию [4] с параметрами переменного частотно-модулированного потенциала (ПЧМП) 56 В, 50 Гц. Осаждение MWCNT в наножидкостях наблюдалось в течение 240 мин. Можно отметить, что в наножидкостях при воздействии ПЧМП наблюдается меньшее количество крупных агломераций наноматериала, что характеризует данные жидкости как более стабильные (рис. 1).

Оценка структуры наножидкостей с MWCNT при их модификации проводилась методом рамановской спектроскопии на установке Ntegra Spectra с длиной волны лазера 532 нм. Объем исследуемой жидкости составлял 10 мл, температура 20 °С.

Для исследования влияния стабильности наночастиц в жидкостях на интенсивность их испарения

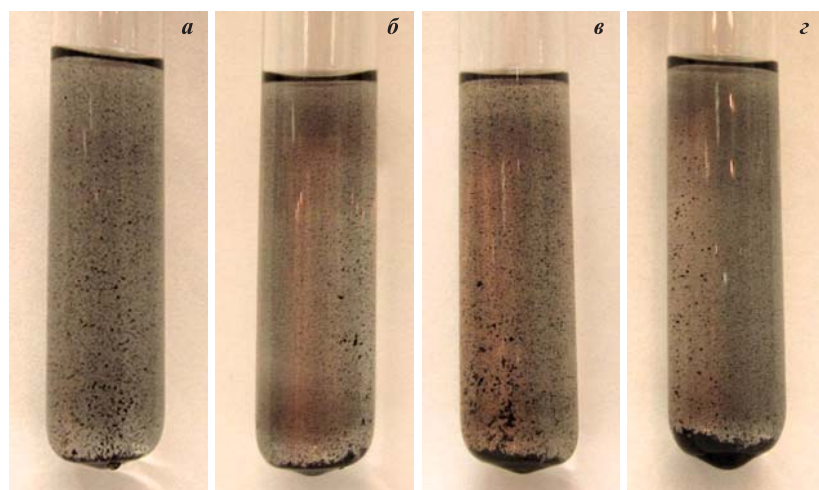


Рис. 1. Наножидкости с MWCNT в наножидкости через 240 мин после диспергирования: а — 0,5 % масс., немодифицированные; б — 0,5 % масс., при воздействии ПЧМП; в — 1,0 % масс., немодифицированные; г — 1,0 % масс. при воздействии ПЧМП

Fig. 1. Nano-fluids with MWCNT in the nano-fluid after 240 minutes after dispersion: а — 0.5 % by mass, unmodified; б — 0.5 % by mass, when exposed to a VFMP; в — 1.0 % by mass, unmodified; г — 1.0 % by mass, when exposed to VFMP

Таблица 3. Значения основных характеристических пиков исследуемых веществ**Table 3.** Characteristic peaks of test substances

№ п/п	Вещество Substance	Колебательная полоса Vibrational band	Частота полосы спектра, см^{-1} Frequency of the spectrum band, см^{-1}	Источник Source
1	MWCNT	D-полоса углеродных материалов / D-band of carbon materials	1250–1450	[12]
		G-полоса (тангенциальные колебания в плоскости графенового слоя) / The G-band (tangential oscillations in the plane of the graphene layer)	1500–1600	
		G'-полоса (первый обертона D-полосы) / The G'-band (the first overtone of the D-band)	2450–2650	
2	Этанол Ethanol	Полоса колебаний CO-группы / The band of oscillations of the CO group	950–1250	[13]
		Полоса колебаний CH_2 -группы / The vibration band of the CH_2 group	2800–3000	
		Полоса колебаний CH_3 -группы / The vibration band of the CH_3 group	3000–3100	
		Полоса колебаний OH-группы / The OH band oscillation band	3250–3550	

с открытой поверхности наножидкости помещались в емкости с открытой поверхностью диаметром 46 мм и высотой 72 мм. Испарение жидкостей происходило в вытяжном шкафу размером 1,5×1,2×2,5 м при температуре воздуха 25 °С и кратности воздухообмена 2 ч⁻¹. Потеря массы фиксировалась на лабораторных весах марки “МАССА ВК-150.1” в течение 24 ч.

Исследование зависимости электропроводности наножидкостей от условий стабилизации в ней наночастиц MWCNT проводилось в измерительной ячейке тераомметра Е6-13А [11]. Предварительно подготовленную наножидкость помещали в измерительную ячейку, где осуществляли изменение ее удельного электросопротивления каждые 30 мин в течение 4 ч.

Результаты и их обсуждение

Исследование надмолекулярной структуры наноматериалов методом рамановской спектроскопии

В табл. 3 приведены значения основных характеристических пиков исследуемых веществ.

В рамановском спектре наножидкости на основе этанола и углеродных нанотрубок характеристические пики MWCNT не наблюдаются, что свидетельствует об отсутствии наночастиц в приповерхностном слое жидкости в концентрации, достаточной для их идентификации (рис. 2).

Для образцов этанола, находящегося в условиях электрофизического воздействия, происходит смещение характеристических пиков на 10...20 см^{-1} при одновременном относительном увеличении их интенсивности в сравнении с немодифицированной жидкостью (рис. 3).

Можно предположить, что данный эффект возможен в случае, когда в результате электрофизи-

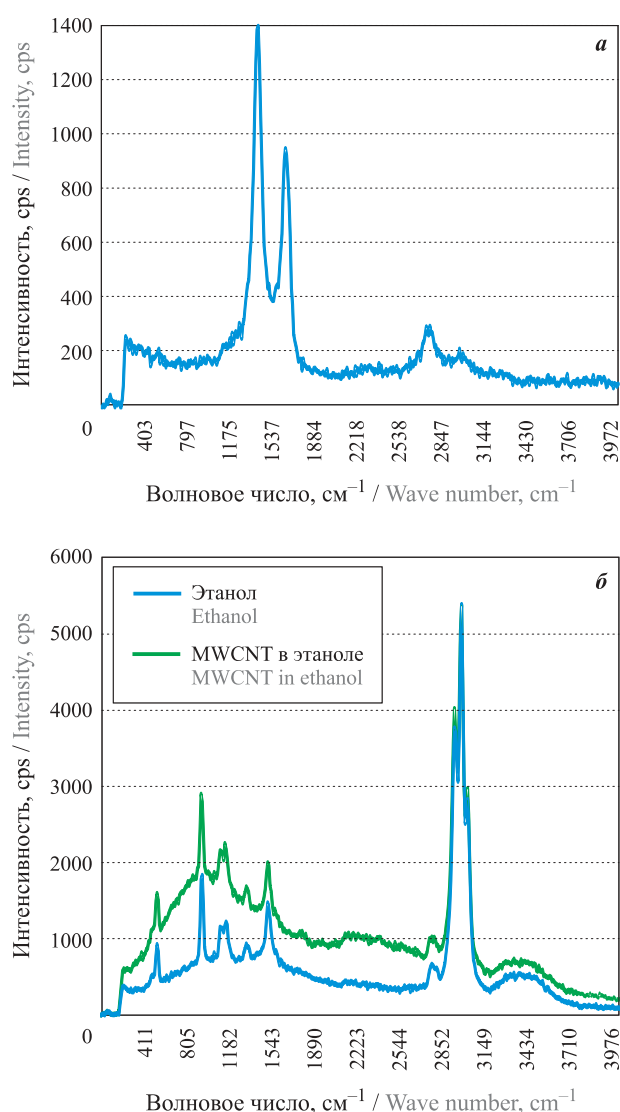


Рис. 2. Рамановский спектр MWCNT: а — исходный материал; б — MWCNT в этаноле в концентрации 1,0 % масс.

Fig. 2. Raman spectrum of MWCNT: a — source material; b — MWCNT in ethanol at a concentration of 1.0 % by mass

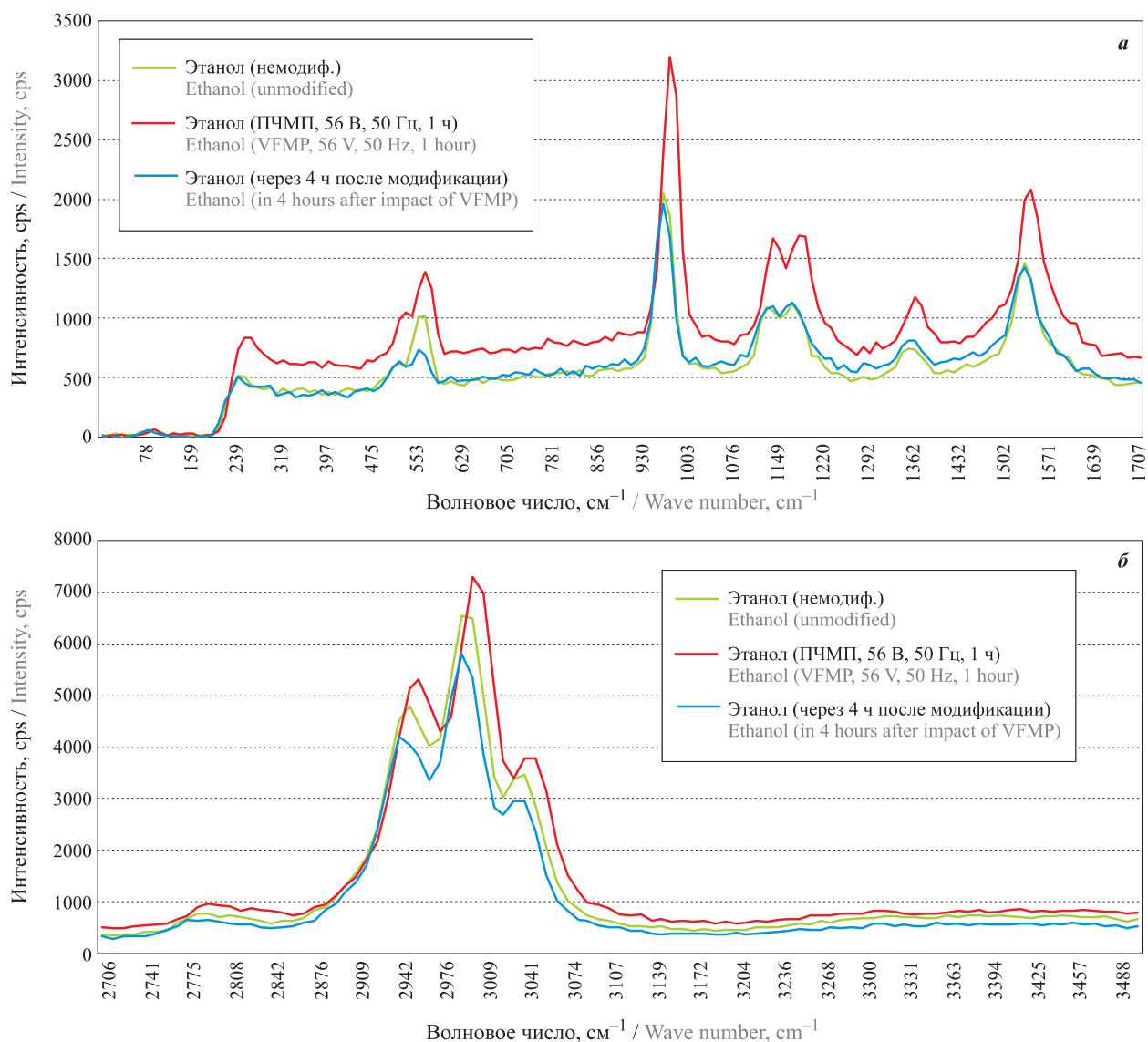


Рис. 3. Рамановский спектр этанола немодифицированного, при воздействии ПЧМП в течение 1 ч и через 4 ч после воздействия ПЧМП в диапазоне: *a* — 0...1700 см⁻¹; *б* — 2700...3400 см⁻¹

Fig. 3. Raman spectrum of ethanol unmodified, when exposed to VFMP for 1 hour and in 4 hours, after the impact of the VFMP: *a* — in the range 0...1700 cm⁻¹; *b* — in the range of 2700...3400 cm⁻¹

ческого воздействия происходит изменение надмолекулярной структуры вещества [4]. В течение 4 ч после электрофизического воздействия рамановский спектр этанола становился практически идентичен спектру немодифицированной жидкости.

Исследование влияния стабильности наночастиц в жидкостях на интенсивность их испарения с открытой поверхности

По результатам измерений можно сделать вывод, что интенсивность испарения зависит от концентрации MWCNT и снижается в течение первых 4 ч в среднем на 24 % после получения стабильной наножидкости. При электрофизическом воздействии существенное снижение интенсивности испарения сохраняется в течение 5...6 ч (рис. 4), что объясняется большей стабильностью наночастиц в жидко-

сти. Вероятно, при электрофизическом воздействии усиливаются кулоновские силы отталкивания между наночастицами, что снижает агломерацию частиц и повышает стабильность MWCNT в жидкости [5].

Исследование электропроводности в условиях стабилизации наножидкостей

Данные исследований показывают, что при возрастании концентрации MWCNT в жидкости наблюдается снижение ее удельного сопротивления в среднем на 45 %. В условиях воздействия ПЧМП происходит более медленный (до 3 ч) рост удельного электросопротивления жидкости, что, очевидно, связано с более медленным процессом агломерации наночастиц при электрофизическом воздействии (рис. 5). Можно также предположить, что решающим фактором стабилизации наножидкости

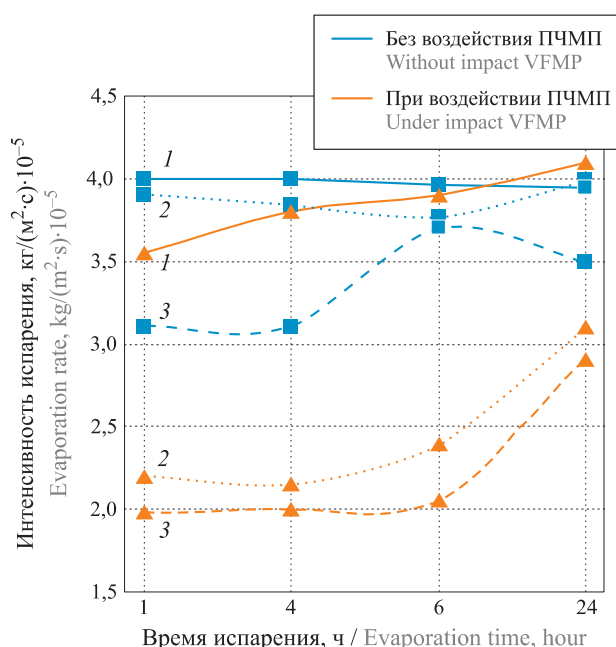


Рис. 4. Зависимость интенсивности испарения этанола от времени стабилизации MWCNT в условиях электрофизического воздействия: 1 — 0 % масс.; 2 — 0,5 % масс.; 3 — 1 % масс.

Fig. 4. Dependence of the intensity of evaporation of ethanol on the time of stabilization of MWCNT under conditions of electrophysical exposure: 1 — 0 % by mass; 2 — 0.5 % by mass; 3 — 1 % by mass

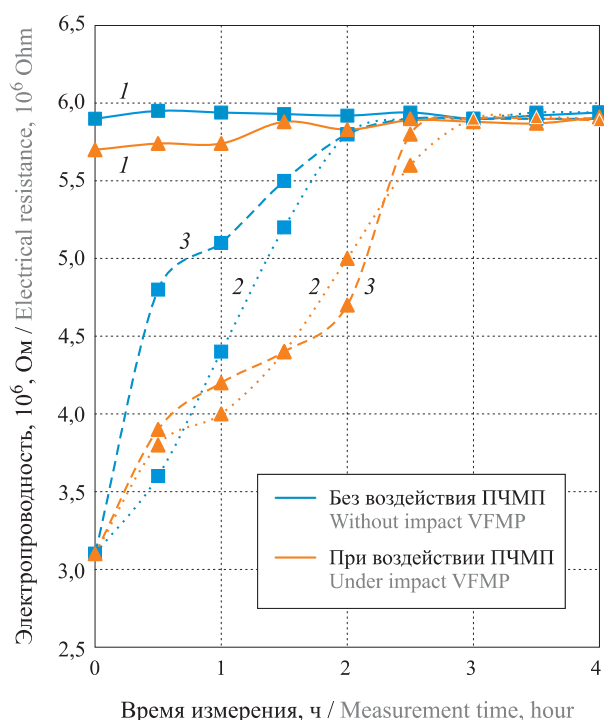


Рис. 5. Зависимость удельного сопротивления наножидкости на основе этанола от времени стабилизации MWCNT в условиях электрофизического воздействия: 1 — 0 % масс.; 2 — 0,5 % масс.; 3 — 1 % масс.

Fig. 5. Dependence of the resistivity of a nanofluid based on ethanol on the stabilization time of MWCNT under conditions of electrophysical influence: 1 — 0 % by mass; 2 — 0.5 % by mass; 3 — 1 % by mass

является наличие одноименного электрического заряда на поверхности наночастиц, что снижает процесс их агломерации [5].

Результаты исследования зависимости электропроводности от условий стабилизации наночастиц в жидкости показывают, что с течением времени удельное сопротивление наножидкости возрастает и становится сходным с удельным сопротивлением базовой жидкости преимущественно в течение 2,0...2,5 ч, что обусловлено оседанием частиц в жидкости. При электрофизическом воздействии процесс агломерации наночастиц замедляется (до 3 ч), что обусловлено наличием одноименного заряда на поверхности частиц. Наличие электрического заряда на поверхности частиц является основным источником кинетической стабильности [5].

Выводы

1. Электрофизическое воздействие изменяет надмолекулярную структуру углеводородных жидкостей, что наблюдалось на образцах с этанолом при исследовании методом рамановской спектроскопии. В результате воздействия ПЧМП происходит сдвиг основных характеристических пиков рамановского спектра этанола в диапазоне 10...20 см⁻¹. В течение 4 ч после электрофизического воздействия рамановский спектр вещества становится идентичен исходному.

2. Интенсивность испарения модифицированных углеводородных наножидкостей снижается до 30 % при увеличении концентрации MWCNT в диапазоне 0,5...1,0 % масс. в течение первых 6 ч после диспергирования наночастиц. Для образцов наножидкостей, полученных в условиях электрофизического воздействия, наблюдается дополнительное (до 50 %) снижение интенсивности испарения, обусловленное изменением электрофизических свойств базовой жидкости [14].

3. Наножидкости с MWCNT, полученные в условиях электрофизического воздействия, характеризуются более высокой стабильностью и пониженной (до 50 %) электропроводностью. Процесс агломерации наночастиц, приводящий к увеличению удельного сопротивления наножидкости, происходит медленнее при воздействии ПЧМП и составляет порядка 3 ч.

4. Применение углеродных наночастиц в качестве присадок для снижения интенсивности испарения жидкостей в сочетании с электрофизическим воздействием позволяет снизить пожарную опасность процессов хранения и транспортировки легковоспламеняющихся жидкостей. Выявленные временные ограничения сохранения свойств наножидкостей с заданными эксплуатационными характеристиками позволяют обосновать применение технологических решений по дополнительной стабилизации наночастиц при транспортировке ЛВЖ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарифулин Р. Р., Симонова М. А., Зыков А. В., Иванов А. В. Оценка воздействия электрофизической обработки на физико-химические свойства нефтепродуктов // Экология и развитие общества. — 2013. — № 1(7). — С. 29–31.
2. Иванов А. В., Ивахнюк Г. К. Применение электрофизического метода управления процессами парообразования легковоспламеняющихся жидкостей в условиях модификации углеродными наноконпонентами // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2015. — Вып. 3. — 9 с. URL: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V73/1.pdf> (дата обращения: 28.04.2016).
3. Иванов А. В., Ивахнюк Г. К., Медведева Л. В. Методы управления свойствами углеводородных жидкостей в задачах обеспечения пожарной безопасности // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 9. — С. 30–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37.
4. Пат. 2479005 Российская Федерация. МПК G05B 24/02 (2006.01), H03B 28/00 (2006.01). Способ и устройство управления физико-химическими процессами в веществе и на границе раздела фаз / Ивахнюк Г. К., Матюхин В. Н., Клачков В. А., Шевченко А. О., Князев А. С., Ивахнюк К. Г., Иванов А. В., Родионов В. А. — № 2011118347/08; заявл. 21.01.2010; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2479005> (дата обращения: 10.04.2017).
5. Yu W., Xie H. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications // Journal of Nanomaterials. — 2012. — 17 p. DOI: 10.1155/2012/435873.
6. Соколов Ю. В. Формирование и свойства агрегатов углеродных нанотрубок в жидкой среде // Физика и химия обработки материалов. — 2008. — № 4. — С. 51–53.
7. Nasiri A., Shariaty-Niasar M., Rashidi A., Amrollahi A., Khodafarin R. Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2011. — Vol. 35, No. 4. — P. 717–723. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.01.006.
8. Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М. Технология производства углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза этанола из газовой фазы // Химическая технология. — 2007. — Т. 8, № 2. — С. 58–62.
9. Захарченко В. В., Крячко Н. И., Мажара Е. Ф., Севриков В. В., Гавриленко Н. Д. Электризация жидкостей и ее предотвращение. — М.: Химия, 1975. — 128 с.
10. Симонова М. А. Электрофизический способ снижения пожарной опасности хранения и транспортировки углеводородных топлив: дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2011. — 123 с.
11. Гигиберия В. А., Арьев И. А., Лебовка Н. И. Устойчивость суспензий многослойных углеродных нанотрубок в органических растворителях в присутствии Triton X-165 // Коллоидный журнал. — 2012. — Т. 74, № 6. — С. 696–701.
12. Удовицкий В. Г. Методы оценки чистоты и характеристики свойств углеродных нанотрубок // Физическая инженерия поверхности. — 2009. — Т. 7, № 4. — С. 351–373.
13. Буриков С. А., Доленко Т. А., Пацаева С. В., Южаков В. И. Диагностика водно-этанольных растворов методом спектроскопии комбинационного рассеяния света // Оптика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 22, № 11. — С. 1082–1088.
14. Ghadimi A., Saidur R., Metselaar H. S. C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2011. — Vol. 54, No. 17-18. — P. 4051–4068. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014.
15. Hwang Y. J., Ahn Y. C., Shin H. S., Lee C. G., Kim G. T., Park H. S., Lee J. K. Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids // Current Applied Physics. — 2006. — Vol. 6, No. 6. — P. 1068–1071. DOI: 10.1016/j.cap.2005.07.021.

Материал поступил в редакцию 4 июня 2017 г.

Для цитирования: Иванов А. В., Мифтахутдинова А. А., Нефедьев С. А., Симонова М. А., Маслаков М. Д. Условия стабилизации наноструктур для безопасной транспортировки легковоспламеняющихся жидкостей // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 9. — С. 35–43. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.35-43.

CONDITIONS FOR THE STABILIZATION NANOSTRUCTURES FOR THE FIREPROOF TRANSPORT FLAMMABLE LIQUIDS

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

MIFTAKHUTDINOVA A. A., Adjunct of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: mif-afto@mail.ru)

NEFEDYEV S. A., Doctor of Military Sciences, Professor, Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: doktorsan@mail.ru)

SIMONOVA M. A., Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: masima82@inbox.ru)

MASLAKOV M. D., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: maslakovpm@rambler.ru)

ABSTRACT

Emergency situations during transportation of petroleum products are caused by the formation of a combustible medium during draining operations and the further ignition of the vapor-gas mixture from discharges of static electricity.

To date, the method of reducing the fire hazard of the transportation of flammable liquids is the development of technical and technological solutions to change the thermophysical and electrophysical properties of liquids.

The methods of stabilization of ethanol-based nanofluids by means of a non-reactive modification of a liquid under the action of variable frequency modulated potential (VFMP) were investigated.

It is established, for ethanol samples, at electrophysical action, the characteristic peaks shift by $10 \dots 20 \text{ cm}^{-1}$ in comparison with the unmodified liquid. The absence of nanoparticles in the surface layer of the liquid in a concentration sufficient for their identification was revealed.

The results of measurements of the intensity of evaporation reflect that the evaporation intensity depends on the concentration of MWCNT and decreases during the first 4 hours on average by 24 % after the creation of the nanofluid. With electrophysical action, a significant decrease in the intensity of evaporation persists for 5–6 hours. This change is explained by the strengthening of Columbic repulsion force between the nanoparticles, which reduces the aggregation of particles and increases the stability of MWCNT in the liquid.

The dependence of the electrical conductivity of nanofluids on the conditions for the stabilization of MWCNT nanoparticles in it consists in an increase in the concentration of MWCNT in the liquid, due to which its resistivity decreases by 48 %. However, within 2 hours, the resistivity of the nanofluid becomes similar to the base fluid. Under the influence of the VFMP, the process of agglomeration of the nanoparticles slows down, a slower (up to 3 hours) increase in the specific resistivity of the liquid takes place. Reduction of agglomeration of particles is due to the presence of an electric charge on the surface of nanoparticles.

The data of the research results reflect the possibility of using carbon nanoparticles as additives to reduce the fire hazard of storage and transport processes of flammable liquids. The revealed time constraints for preserving the properties of nanofluids with specified performance characteristics will allow us to justify the application of technological solutions for additional stabilization of nanoparticles to ensure fire and explosion safety and electrostatic safety when handling flammable liquids.

Keywords: flammable liquids; ethanol; multi-walled carbon nanotubes; stabilization; variable frequency-modulated potential; evaporation intensity; static electricity.

REFERENCES

1. Garifulin R. R., Simonova M. A., Zykov A. V., Ivanov A. V. An assessment of impact of electrophysical processing on physical and chemical qualities of mineral oils. *Ekologiya i razvitiye obshchestva / Ecology and Development of Society*, 2013, no. 1(7), pp. 29–31 (in Russian).
2. Ivanov A. V., Ivakhnyuk G. K. Electrophysical control methods of vaporization of flammable liquids with carbon nanoparticles. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2015, issue 3. 9 p. (in Russian). Available at: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V73/1.pdf> (Accessed 28 April 2017).
3. Ivanov A. V., Ivakhnyuk G. K., Medvedeva L. V. Methods of control properties of hydrocarbon liquids in the problems of fire safety. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 30–37 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37.
4. Ivakhnjuk G. K., Matjukhin V. N., Klachkov V. A., Shevchenko A. O., Knjazev A. S., Ivakhnjuk K. G., Ivanov A. V., Rodionov V. A. *Method and apparatus for controlling physical-chemical processes in substance and on a phase boundary*. Patent RU, no. 2479005, publ. date 10.04.2013 (in Russian).
5. Yu W., Xie H. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012. 17 p. DOI: 10.1155/2012/435873.
6. Sokolov Yu. V. Formation and properties of aggregates of carbon nanotubes in a liquid environment. *Fizika i khimiya obrabotki materialov / Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2008, no. 4, pp. 51–53 (in Russian).
7. Nasiri A., Shariaty-Niasar M., Rashidi A., Amrollahi A., Khodafarin R. Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, vol. 35, no. 4, pp. 717–723. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.01.006.
8. Bobrynetskiy I. I., Nevolin V. K., Simunin M. M. Technology of production of carbon nanotubes by the method of catalytic pyrolysis of ethanol from the gas phase. *Khimicheskaya tekhnologiya / Chemical Technology*, 2007, vol. 8, no. 2, pp. 58–62 (in Russian).
9. Zakharchenko V. V., Kryachko N. I., Mazhara E. F., Sevrikov V. V., Gavrilenko N. D. *Elektrizatsiya zhidkostey i yeye predotvrashcheniye* [Electrification of liquids and its prevention]. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 128 p. (in Russian).
10. Simonova M. A. *Electrophysical method of reducing the fire hazard of storage and transportation of hydrocarbon fuels*. Cand. tech. sci. diss. St. Petersburg, 2011. 123 p. (in Russian).
11. Gigiberiya V. A., Ar'ev I. A., Lebovka N. I. The stability of suspensions of multiwalled carbon nanotubes in organic solvents in the presence of triton X-165. *Colloid Journal*, 2012, vol. 74, no. 6, pp. 663–667. DOI: 10.1134/S1061933X12060099.
12. Udovitskiy V. G. Methods for estimating the purity and characterization of the properties of carbon nanotubes. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti / Physical Surface Engineering*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 351–373 (in Russian).
13. Burikov S. A., Dolenko T. A., Patsaeva S. V., Yuzhakov V. I. Diagnostics of aqueous ethanol solutions using Raman spectroscopy. *Optika atmosfery i okeana / Atmospheric and Oceanic Optics*, 2009, vol. 22, no. 11, pp. 1082–1088 (in Russian).
14. Ghadimi A., Saidur R., Metselaar H. S. C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, vol. 54, no. 17-18, pp. 4051–4068. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014.
15. Hwang Y. J., Ahn Y. C., Shin H. S., Lee C. G., Kim G. T., Park H. S., Lee J. K. Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. *Current Applied Physics*, 2006, vol. 6, no. 6, pp. 1068–1071. DOI: 10.1016/j.cap.2005.07.021.

For citation: Ivanov A. V., Miftakhutdinova A. A., Nefedev S. A., Simonova M. A., Maslakov M. D. Conditions for the stabilization nanostructures for the fireproof transport flammable liquids. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 9, pp. 35–43 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.35-43.

В. В. ХОЛЩЕВНИКОВ, д-р техн. наук, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры “Пожарная безопасность в строительстве”, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: reglament2004@mail.ru); эксперт Научно-исследовательского института “Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы” (НИИ РИНКЦЭ) (Россия, 123317, г. Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13, стр. 1)

Б. Б. СЕРКОВ, д-р техн. наук, заслуженный работник высшей школы РФ, начальник учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

УДК 614.844:721.012

ЗНАЧИМОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЛЮДЕЙ В ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЯХ

Показано, что в связи с разработкой СП “Здания и комплексы высотные. Требования пожарной безопасности” в чрезвычайной степени актуализируются прежде всего вопросы выбора средств и способов защиты людей от воздействия опасных факторов пожара (ОФП), поскольку от их корректного решения зависит достижение первостепенной цели технического регулирования: “Защита жизни и здоровья граждан”. Показано также, что нормируемые значения пожарного риска не позволяют обеспечить достижение этой цели. Рассматривается нетрадиционная концепция обеспечения пожарной безопасности людей за счет повышения надежности и эффективности функционирования автоматизированных систем противопожарной защиты и современные возможности ее реализации в высотных зданиях, которые должны составлять основу правил проектирования системы противопожарной безопасности высотных зданий.

Ключевые слова: безопасность; высотные здания; системы противопожарной защиты; системы пожаротушения; точечные датчики; сплинклерные установки; огнетушащие средства; системы передачи данных; беспроводные системы.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.44-53

Введение

Согласно ФЗ № 184 “О техническом регулировании” [1] первоочередными целями его введения являются (ст. 6, п. 1):

- защита жизни и здоровья граждан;
- предупреждение действий, вводящих в заблуждение приобретателей.

Реализуя эти цели, “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” (ФЗ-123) [2] требует (ст. 79): “Риск гибели людей в результате воздействия опасных факторов пожара (ОФП) должен определяться с учетом функционирования систем обеспечения пожарной безопасности зданий, сооружений и строений” и не должен превышать:

$$Q_{в,i} \leq Q_B^H = 1 \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где $Q_{в,i}$ — расчетная величина индивидуального пожарного риска;

Q_B^H — нормативная величина индивидуального пожарного риска.

В соответствии с этими требованиями регламента в “Методике определения расчетных величин

пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности”¹ [3] значение $Q_{в,i}$ определяется по формуле

$$Q_{в,i} = Q_{п,i}(1 - R_{ап})P_{пр}(1 - P_{э})(1 - P_{п.з}), \quad (2)$$

где $Q_{п,i}$ — частота возникновения пожара в здании в течение года, значения которой для зданий некоторых классов функциональной пожарной опасности, которые могут входить в комплексы высотных зданий, приводятся в приложении № 1 Методики [3] в явном виде; при отсутствии статистических данных допускается (п. 8) принимать $Q_{п,i} = 4 \cdot 10^{-2}$;

¹ Будем придерживаться этой редакции Методики, поскольку в ее последней редакции [4] вероятности R заменены на соответствующие постоянные коэффициенты K с теми же значениями, что не изменяет сути методики, но усугубляет безвыходность положения: как бы ни совершенствовались автоматические системы, их нормируемые показатели — надежность и эффективность не повышаются.

$R_{\text{ап}}$ — вероятность эффективного срабатывания установок автоматического пожаротушения (АУПТ); определяется технической надежностью элементов АУПТ; при отсутствии сведений по параметрам технической надежности допускается принимать $R_{\text{ап}} = 0,9$ (это оптимистическая, быстрее желаемая, чем действительная на сегодняшний день оценка, поскольку “в среднем эффективность выполнения задач установок пожарной автоматики немногим более 50 %” [5, 6]);
 $P_{\text{пр}}$ — вероятность присутствия людей в здании;
 $P_{\text{пр}} = t_{\text{функц}}/24$;
 $t_{\text{функц}}$ — время нахождения людей в здании, ч;
 $P_{\text{э}}$ — вероятность эвакуации людей;
 $P_{\text{п.з}}$ — вероятность эффективной работы системы противопожарной защиты, направленной на обеспечение безопасной эвакуации людей при пожаре, которая благодаря приведенным в Методике [3] значениям входящих в нее параметров может быть легко определена;

$$P_{\text{п.з}} = 1 - (1 - R_{\text{обн}} R_{\text{соуэ}})(1 - R_{\text{обн}} R_{\text{пдз}}); \quad (3)$$

$R_{\text{обн}}$ — вероятность эффективного срабатывания системы пожарной сигнализации; принимается согласно п. 13 [3] $R_{\text{обн}} = 0,8$;

$R_{\text{соуэ}}$ — условная вероятность эффективного срабатывания системы оповещения людей о пожаре и управления эвакуацией людей в случае срабатывания системы пожарной сигнализации; принимается согласно п. 25 [3] $R_{\text{соуэ}} = 0,8$;

$R_{\text{пдз}}$ — условная вероятность эффективного срабатывания системы противопожарной защиты в случае срабатывания системы пожарной сигнализации; принимается согласно п. 26 [3] $R_{\text{пдз}} = 0,8$.
 Таким образом,

$$P_{\text{п.з}} = 1 - (1 - 0,8 \cdot 0,8)(1 - 0,8 \cdot 0,8) = 0,87.$$

Оценка надежности инженерных систем

Формула (2) — это произведение вероятностей наступления событий — отказов систем (в скобках). Следовательно, в любом случае вероятность отказа элементов автоматических систем противопожарной защиты $P_{\text{п.з}}^0$ и пожаротушения $P_{\text{ап}}^0$ составляет соответственно:

$$P_{\text{п.з}}^0 = (1 - 0,87) = 0,13;$$

$$P_{\text{ап}}^0 = (1 - 0,9) = 0,1,$$

т. е. в 10–13 % случаев возникновения пожара они не могут влиять на его подавление и на обеспечение безопасности людей в зданиях. Очевидно, что в этих случаях людям остается рассчитывать только на успешную эвакуацию, осуществляемую за счет их собственных сил и психофизических возможностей.

Своевременно задать вопрос: *при каких же значениях вероятности безотказного функционирования элементов систем противопожарной защиты и пожаротушения отпадает необходимость в эвакуации людей?* С учетом возможности такой ситуации п. 3.1 ГОСТ 12.1.004–91 требует первоначально проверять выполнение условия (2) при значении $P_{\text{э}}$, равном нулю.

Если пожар произошел, следовательно, мероприятия и системы пассивной противопожарной защиты, направленные на предотвращение пожара, не сработали. Вероятность этого события в общем случае $Q_{\text{п}} = 4 \cdot 10^{-2}$. Тогда вероятность обеспечения безопасности людей только за счет инженерных систем пожарной безопасности зданий (при $P_{\text{э}} = 0$) даже при оптимистических оценках ($R_{\text{ап}} = 0,9$) составляет:

- при круглосуточном пребывании людей в здании ($P_{\text{пр}} = 1$):

$$Q_{\text{в}} = 0,04 \cdot (1 - 0,9) \cdot 1 \cdot (1 - 0)(1 - 0,87) = 520 \cdot 10^{-6};$$

- при присутствии людей в здании немногим более 9 ч ($P_{\text{пр}} = 0,385$):

$$Q_{\text{в}} = 190 \cdot 10^{-6}.$$

Как видно, эти значения на несколько порядков выше требуемого нормативного значения $Q_{\text{в}}^{\text{н}} = 1 \cdot 10^{-6}$. Следовательно, *всегда необходима организация эвакуации людей из здания.*

Определим значение $P_{\text{э.и}}^{\text{т}}$, требуемое для выполнения условия (1). Очевидно, что $P_{\text{э.и}}^{\text{т}} \geq 1 - 1 \cdot 10^{-6} : 5,2 \cdot 10^{-4} = 0,9981$, т. е. вероятность отказа в системе “Эвакуация” $P_{\text{э}}^0$ не должна превышать: $P_{\text{э.и}}^0 = (1 - P_{\text{э.и}}^{\text{т}}) = 1 - 0,9981 = 0,0019$. Поэтому-то значение $P_{\text{э}}$ и “принимается” Методикой равным: $P_{\text{э}} = P_{\text{н.э}} + P_{\text{р}} = 0,999$.

Таким образом, фактически нормируемое значение отказа в системе-процессе “эвакуации людей” составляет $P_{\text{э}}^0 = 0,001$, т. е. более чем на два порядка ниже (в 800 раз — $0,8/0,001$), чем в инженерных системах! И это в системе, которую создает природа — Бог, а не человек — творец инженерных систем. Минимальные требуемые значения вероятности эвакуации для исключения превышения нормативного значения пожарного риска в зданиях различных классов функциональной пожарной опасности приведены на рис. 1.

В результате имеем прямо-таки роман “Двенадцать стульев” — плакат на стенах здания в г. Васюки: “Спасение утопающих — дело рук самих утопающих”.

Разве население и посетители зданий, оборудованных автоматическими системами противопожарной защиты, которые надеются на них, не вводятся в заблуждение относительно обеспечения собственной безопасности?!

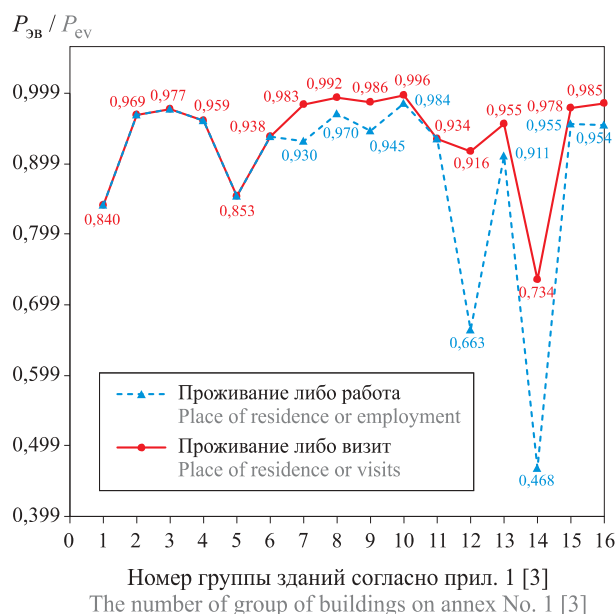


Рис. 1. Минимально необходимые значения вероятности эвакуации для исключения превышения нормативного значения пожарного риска в зданиях различных классов функциональной пожарной опасности [7] (группа зданий № 16 с $Q_{п} = 0,04$)

Fig. 1. The minimum required values of evacuation probability to avoid exceeding the standard value of fire risk in buildings of various classes of functional fire hazard [7] (the group of buildings No. 16 in take with $Q_{п} = 0,04$)

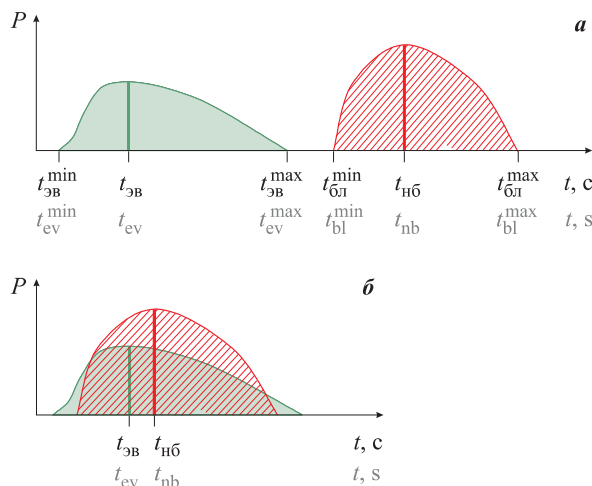


Рис. 2. Иллюстрация обеспечения условий своевременной эвакуации людей [8]: *a* — при действительном развитии процессов эвакуации ($t_{эв} = t_{н.э} + t_{р}$) и опасных факторов пожара ($t_{нб}$), описываемых плотностями распределения вероятностей времени их достижения $P(t)$; *b* — при детерминированном описании этих процессов, игнорирующем их действительный (вероятностный) характер (соотношение только между средними значениями $t_{эв} \leq t_{нб}$)

Fig. 2. Illustration of the conditions of safe evacuation of people [8]: *a* — by a actual development of the processes of evacuation ($t_{эв} = t_{н.э} + t_{р}$) and harmful fire factors ($t_{нб}$), described by probability density functions of time to achieve them; *b* — by a deterministic description of these processes, ignoring their valid (probabilistic) character (only the ratio between the average values $t_{эв} \leq t_{нб}$)

При этом вероятность эвакуации каждого человека не может назначаться или приниматься $P_{э} = 0,999$ даже при $t_{эв} = (t_{н.э} + t_{р}) \leq 0,8t_{бл}$ и $t_{ск} \leq 6$ мин [3, п. 9]. Она должна обеспечиваться его индивидуальными физическими и психофизиологическими возможностями и учитываться при моделировании стохастичности процессов эвакуации и распространения ОФП (рис. 2) [8].

Здесь-то и проявляется со всей очевидностью недопустимость подмены вероятности не только надежного срабатывания комплекса автоматических систем противопожарной защиты, но и эффективности их функционирования их средними значениями.

Эффективность противопожарных систем

Согласно требованиям Технических регламентов в зданиях и сооружениях должно обеспечиваться “ограничение образования и распространения опасных факторов пожара в пределах очага пожара” (ст. 8 [9]), а “автоматические установки пожаротушения должны обеспечивать... ликвидацию пожара в помещении до возникновения критических значений опасных факторов пожара...” (ст. 61 [2]).

Численное моделирование динамики ОФП [10], учитывающее варианты размещения клапанов удаления дыма и их производительности, позволяет определить время блокирования эвакуации людей в офисных помещениях высотных зданий, характерных для зданий управления всех отраслей народного хозяйства. В зависимости от площади помещения S оно может быть описано уравнением $t_{бл} = 9,45S^{0,32}$ (рис. 3).

Столь малые значения $t_{эв}$, определяемые временем $t_{бл}$, показывают необходимость поиска способов подавления пожара в его начальной стадии.

Существующие, устанавливаемые в большинстве зданий и сооружений автоматические системы пожаротушения начинают функционировать намного позже завершения эвакуации из помещения и по-

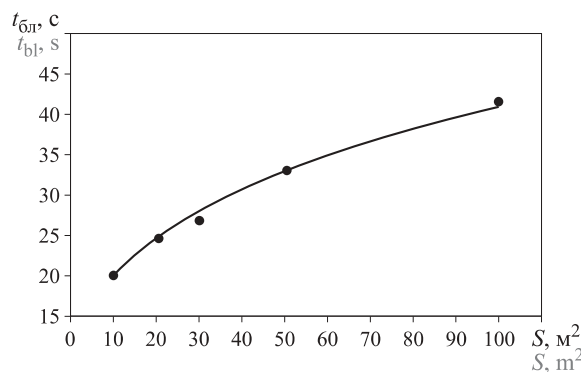


Рис. 3. Зависимость времени блокирования от площади помещения: $t_{бл} = f(S)$ [10]

Fig. 3. The relation of ASET against premises area: $t_{бл} = f(S)$ [10]

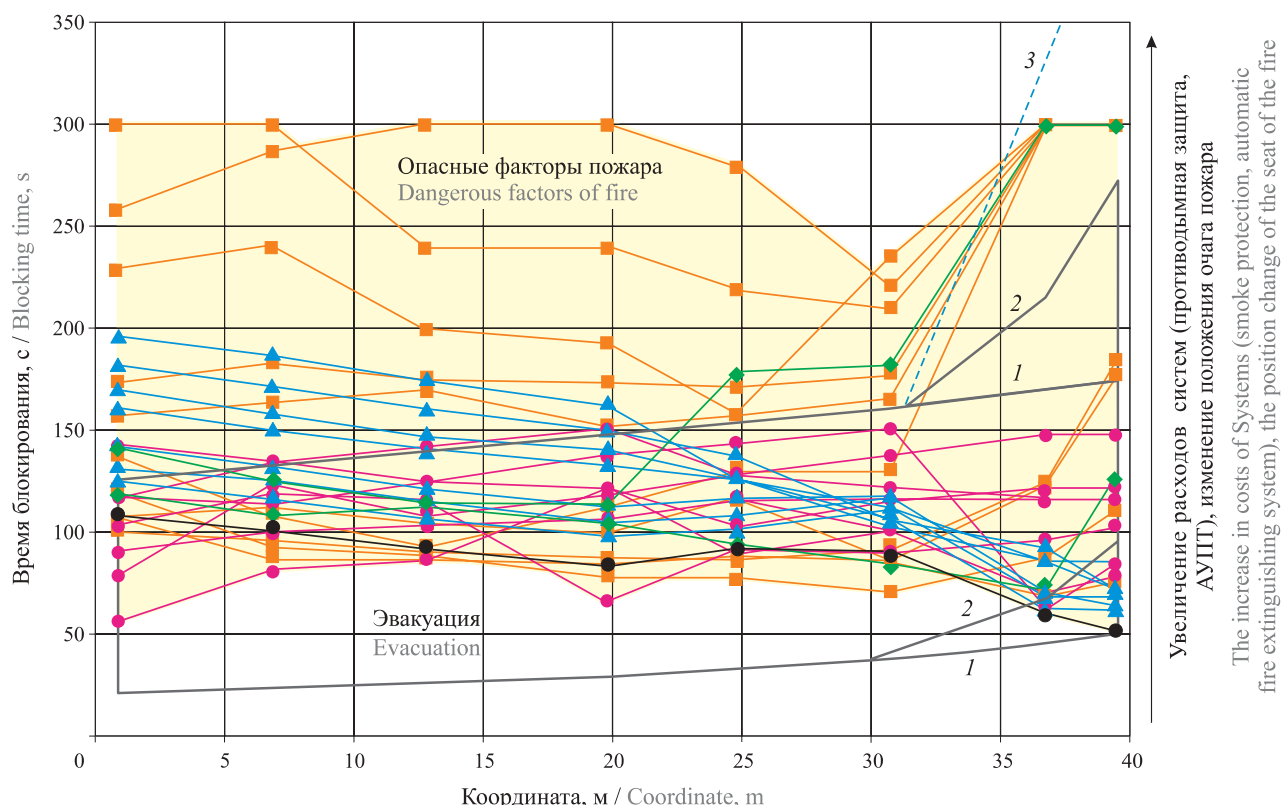


Рис. 4. Область возможных решений по выбору систем пожарной безопасности [12]: ● — без систем противопожарной защиты; ● — изменение расположения помещения очага пожара и клапана дымоудаления; ■ — изменение расхода воздуха через клапан дымоудаления; ▲ — изменение расхода воды системы пожаротушения (дренчерная завеса); ◆ — изменение расхода воздуха через клапан дымоудаления и расхода дренчерной системы пожаротушения (дренчерная завеса)

Fig. 4. Field of possible solutions for selection of fire safety systems [12]: ● — without fire protection systems; ● — change the location of the premises of fire origin and smoke control valve; ■ — changing the flow of air through smoke control valve; ▲ — changing the water consumption of the fire-extinguishing system (deluge curtain); ◆ — changing the flow of air through smoke control valve and consumption of deluge fire extinguishing system (deluge curtain)

этому не могут оказать влияния на обеспечение безопасности находящихся в них людей [11]. Результаты моделирования показывают, что для быстрой локализации источника горения необходимо уменьшить время срабатывания систем обнаружения, оповещения и инерционности системы пожаротушения. Только в этом случае система противодымной защиты, установленная в помещении, сможет обеспечить его незадымляемость, что даст возможность выполнить требование ч. 2 ст. 61 [2] о ликвидации пожара до возникновения критических значений ОФП в помещении.

Распространившись из помещения в коридор этажа здания, ОФП в большинстве случаев блокируют и возможность безопасной эвакуации людей с этажа здания, несмотря на его оборудование системами противопожарной защиты (рис. 4).

При распространении ОФП в коридор система дымоудаления в коридоре с нормативными расходами увеличивает время блокирования на 34 %. Полное удаление продуктов горения из коридора возможно только при увеличении расходов в десятки раз. Использование дренчерной системы перед вы-

ходом из помещений при нормативных объемах подачи воды увеличивает время блокирования всего на 9 %. Совместное использование дренчерной системы и системы дымоудаления позволяет увеличить время блокирования на 40 %. Таким образом, результаты моделирования свидетельствуют о том, что при отсутствии воздействия на очаг возгорания продукты горения, распространяясь за пределы помещения, в считанные минуты (менее $t_{н.э}$) блокируют коммуникационные пути на этаже, вне зависимости от работы систем противопожарной защиты.

При этом на сокращение времени эвакуации людей $t_{эв}$ ($t_{эв} = t_{н.э} + t_p$) за счет “совершенствования” физических и психофизических возможностей людей рассчитывать не приходится, поскольку данные демографических исследований ООН и ВОЗ определяют противоположную перспективу [13, 14]: рост доли населения в возрасте свыше 65 лет с 20 % почти до 50 % к 2050 г., увеличение числа инвалидов, рост количества людей всех возрастов, страдающих ожирением, до 50 % к 2030 г. (рис. 5).

Эти демографические показатели народонаселения оказывают значительное влияние на пара-

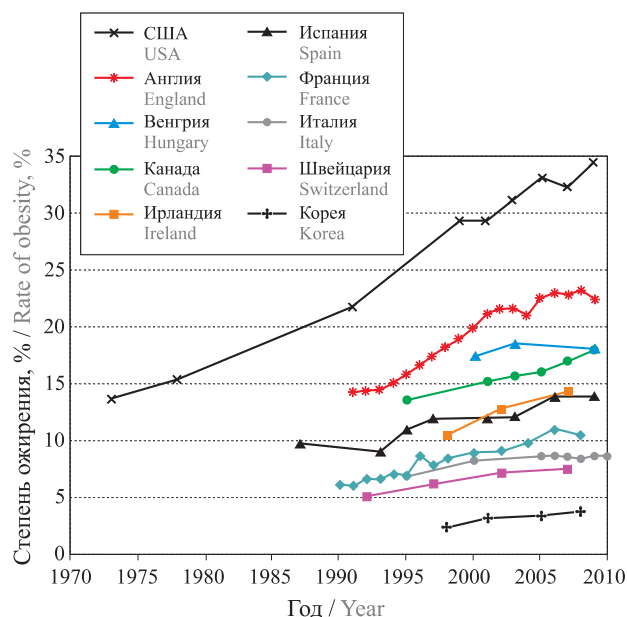


Рис. 5. Показатели степени ожирения взрослых людей в различных странах (1970–2010 гг.) [15]

Fig. 5. Adult obesity rates in multiple OECD countries in 1970–2010 years [15]

метры людского потока, снижая скорость и, следовательно, интенсивность их движения на 40–50 %. Соответствующие данные, полученные в отечественных исследованиях [16–18], приведены на рис. 6. Они опубликованы в отечественной и зарубежной печати [7, 19–24], используются при установлении расчетных величин пожарного риска [4], а также в работах зарубежных ученых при пересмотре моделей движения людских потоков, вызванных происходящими демографическими изменениями.

Включение в состав высотных комплексов жилых зданий со смешанным составом потока при эвакуации требует учета демографических групп населения в составе основного функционального контингента высотных зданий [7]. Однако это никак не отображено в разрабатываемом СП “Здания и комплексы высотные. Требования пожарной безопасности” [25], хотя многие из этих людей не способны к пешеходной эвакуации по лестничным клеткам, и использование лифтов для их эвакуации во время пожара становится необходимым. Для этого недостаточно только использовать лифты для транспортирования пожарных подразделений. Необходимо еще обеспечить их оптимальное использование, для чего требуется специальный алгоритм организации их работы в системе поэтапной комбинированной эвакуации. Принципы построения такой системы уже разработаны [10, 26], но в представленной редакции свода правил они, тем не менее, отсутствуют. При этом следует учитывать, что сокращение в 2–3 раза времени эвакуации влияет и

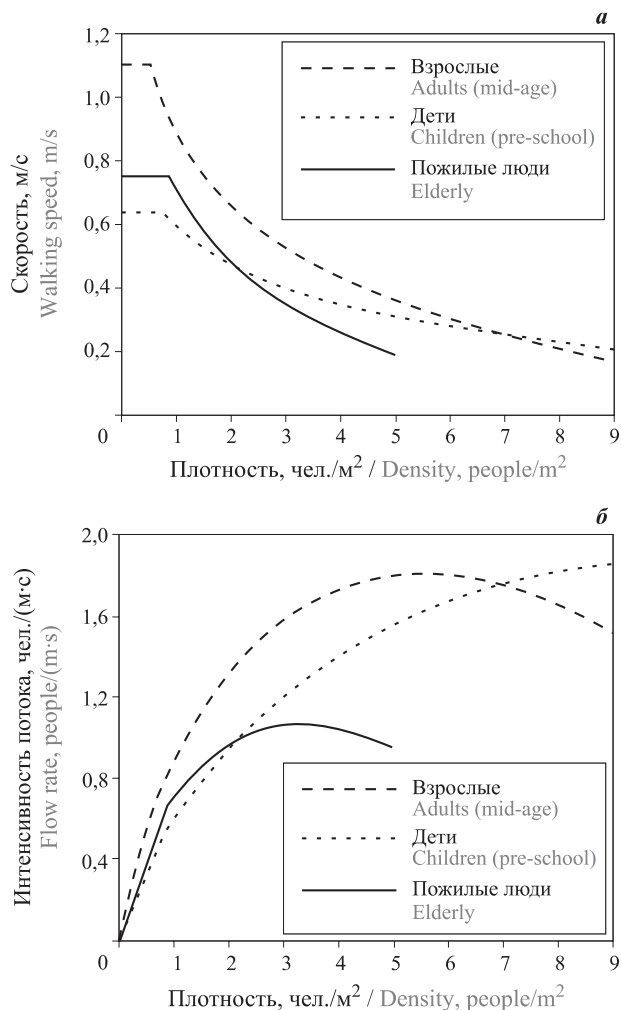


Рис. 6. Закономерности связи между параметрами потоков людей различных возрастных групп: а — скорость — плотность потока; б — интенсивность движения — плотность потока [16–18]

Fig. 6. The relationship between parameters of human flows for different age demographics: а — walking speed vs density; б — crowd flow rate vs density [16–18]

на технико-экономические показатели систем, которыми предусматривается оборудовать высотные здания (п. 14.20 СП 267.1325800.2016 [27]), чем определяется минимальное время их живучести.

Современные возможности автоматических систем в обеспечении противопожарной безопасности высотных зданий

Автоматическая система противопожарной защиты высотного здания состоит из исполнительных элементов входящих в нее подсистем обнаружения очага возгорания, пожаротушения, противодымной вентиляции и системы передачи данных и координации управления их функционированием.

В настоящее время отечественными учеными и производителями созданы датчики обнаружения

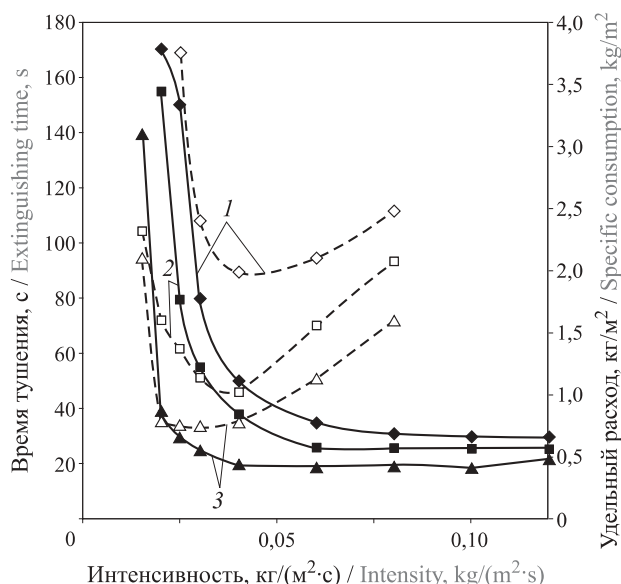


Рис. 7. Пример типичной зависимости времени тушения пламени гептана (—) и удельного расхода пены (---) из пенообразователей углеводородных (ПО-ЗАИ) (1), фторсинтетических “Гидрал” (ФП-1) (2) и “Петрофильм” (ФП-2) (3) [29]

возгорания на ранней стадии его возникновения, на порядок превосходящие по чувствительности и надежности функционирования лучшие образцы зарубежных дымовых точечных пожарных извещателей [28].

Созданы спринклерные системы “быстрого реагирования” адресного воздействия на очаг пожара, способные его подавлять до образования ОФП (тем более на ранней стадии его возникновения) [29].

Установлены универсальные механизмы тушения пожара [30], позволяющие оптимизировать расходы огнетушащих материалов для достижения минимального времени подавления пламени в зданиях и сооружениях различного назначения (рис. 7).

Разработана [31] и общая система беспроводной передачи сигнала, базирующаяся на принципе динамической маршрутизации сигналов и гарантирующая повышение вероятности функционирования

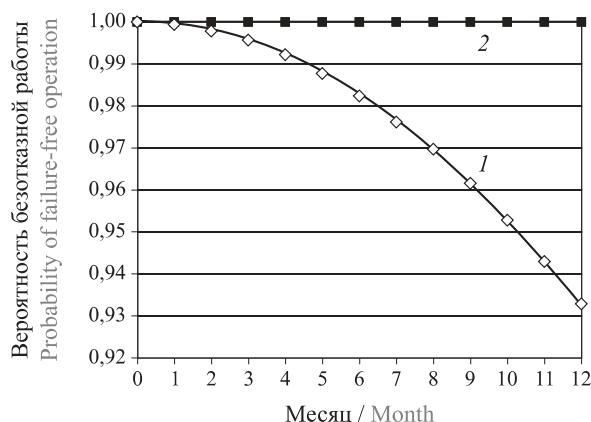


Рис. 8. Графические зависимости надежности (вероятности безотказной работы) беспроводных систем обнаружения пожаров от времени: 1 — с функцией статической маршрутизации сигналов; 2 — с функцией динамической маршрутизации сигналов [31]

Fig. 8. Graphic relation for the reliability (probability of failure-free operation) wireless fire detection systems from time to time: 1 — with the function of static routing signals; 2 — with the function of dynamic routing of signals [31]

до 0,999 (вместо сегодняшних 0,76). При этом критерием оценки служит впервые разработанный комплексный критерий, учитывающий совокупность показателей функционирования автоматических систем:

$$L_{\text{окк}} = a_1 Q + a_2 E + a_3 H + a_4 P + a_5 S + a_6 C, \quad (4)$$

где Q — оперативность;

E — эффективность;

H — помехоустойчивость;

P — надежность;

S — площадь обслуживания;

C — экономическая целесообразность.

Выводы

Эти разработки демонстрируют возможность создания в настоящее время автоматических систем пожарной защиты, способных обеспечить достижение нормативного уровня индивидуального пожарного риска и выполнение требований технических регламентов об ограничении распространения ОФП помещением возникновения очага пожара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О техническом регулировании : Федер. закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ (ред. от 29.07.2017). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (дата обращения: 04.08.2017).
2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (с изм. на 29.07.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 04.08.2017).
3. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382. — М. : ВНИИПО МЧС России, 2009.

4. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382 (с изм. на 02.12.2015). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902167776> (дата обращения: 04.08.2017).
5. *Болодьян И. А., Хасанов И. Р., Гомозов А. В.* Концептуальный подход к обеспечению пожарной безопасности высотного строительства и формирование противопожарных норм для высотных многофункциональных комплексов // Современные системы и средства комплексной безопасности и противопожарной защиты объектов строительства : материалы 2-й науч.-практ. конф. — М. : Стройбезопасность, 2003. — С. 14–15.
6. *Васильев М. А., Демёхин Ф. В.* Проблемы обеспечения эффективности пожарной автоматики // Системы безопасности : сб. матер. 14-й науч.-техн. конф. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2005.
7. *Самошин Д. А.* Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации. — М. : АГПС МЧС РФ, 2016. — 209 с.
8. *Холицевников В. В., Присадков В. И., Костерин И. В.* Совершенствование методологии определения расчетных величин пожарного риска в зданиях и сооружениях на основе стохастического описания определяющих их процессов и деревьев событий // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 1. — С. 5–17. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.5-17.
9. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федер. закон РФ от 30.12.2009 № 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (дата обращения: 26.07.2017).
10. *Кудрин И. С.* Влияние параметров движения людских потоков при пожаре на объемно-планировочные решения высотных зданий : дис. ... канд. техн. наук. — М. : АГПС МЧС РФ, 2013. — 190 с.
11. *Самошин Д. А.* К вопросу о защите людей техническими средствами пожарной автоматики // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 12. — С. 53–59. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.53-59.
12. *Холицевников В. В., Кудрин И. С.* Обеспечение безопасной эвакуации людей с учетом стохастичности процесса распространения опасных факторов пожара в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2013. — Т. 22, № 4. — С. 38–51.
13. World Population Ageing 2013/Department of Economic and Social Affairs Population Division. — New York : United Nations, 2013. URL: <http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WorldPopulationAgeing2013.pdf> (дата обращения: 04.08.2017).
14. World Population Prospects: The 2012 Revision. Highlights and Advance Tables / Department of Economic and Social Affairs Population Division. — New York : United Nations, 2013. URL: <http://stadtteilagenten.de/wp-content/uploads/2013/08/World-Population-Prospects-The-2012-Revision-Highlights-and-Advance-Tables.pdf> (дата обращения: 04.08.2017).
15. *Peter Thompson, Daniel Nilsson, Karen Boyce, Denise McGrath.* Evacuation models are running out of time // Fire Safety Journal. — 2015. — Vol. 78. — P. 251–261. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.09.004.
16. *Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Parfyonenko A. P., Belosokhov I. R.* Study of children evacuation from pre-school education institutions // Fire and Materials. — 2012. — Vol. 36, No. 5-6. — P. 349–366. DOI: 10.1002/fam.2152.
17. *Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Istratov R. I.* The problems of elderly people safe evacuation from senior citizen health care buildings in case of fire // Human Behaviour In Fire: Proceedings of 5th International Symposium. — Cambridge, UK, 2012. — P. 587–593.
18. *Kholshchevnikov V. V., Shields T. J., Boyce K. E., Samoshin D. A.* Recent developments in pedestrian flow theory and research in Russia // Fire Safety Journal. — 2008. — Vol. 43, Issue 2. — P. 108–118. DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.05.005.
19. *Парфененко А. П.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях детских дошкольных образовательных учреждений : дис. ... канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС РФ, 2012. — 153 с.
20. *Истратов Р. Н.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в стационарах социальных учреждений по обслуживанию граждан пожилого возраста : дис. ... канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС РФ, 2014. — 160 с.
21. *Фан А.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в многоэтажных жилых зданиях во Вьетнаме : дис. ... канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС РФ, 2017.
22. *Фан А., Ле Н. З.* Анализ мероприятий по снижению пожарной опасности в высотных жилых зданиях // Журнал пожарной безопасности ИПБ Республики Вьетнам. — 2015. — Т. 77. — С. 20–23.
23. OECD. Obesity Update 2012. URL: <http://www.oecd.org/health/49716427.pdf> (дата обращения: 04.08.2017).

24. Society at a glance: OECD social indicators. — Paris : OECD Publishing, 2006.
25. Проект свода правил (изменения к своду правил) “Здания и комплексы высотные. Требования пожарной безопасности”. URL: http://www.gost.ru/wps/portal/pages/directions?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/gost/GOSTRU/directions/Standardization/notifications/notificationsnationalstandards (дата обращения: 04.08.2017).
26. Поэтапная эвакуация из высотных зданий : отчет по НИР. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2011. — 123 с.
27. СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456044284> (дата обращения: 01.08.2017).
28. Саутин И. Концепция построения безопасной противопожарной автоматики // Алгоритм безопасности. — 2015. — № 4. — С. 68–70.
29. Белоусов Л., Дауэнгауэр С. Спринклерные системы водяного пожаротушения с принудительным пуском // Алгоритм безопасности. — 2009. — № 6. — С. 24–27.
30. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Универсальность механизмов тушения пламени различными огнетушащими веществами // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2014. — Т. 23, № 11. — С. 84–88.
31. Иванников А. П., Зыков В. И., Ватюкова О. Ю., Уваркин В. С. Математическая модель функционирования системы радиоканального мониторинга пожарной безопасности объектов энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2016. — № 2. — С. 43–47.

Материал поступил в редакцию 14 августа 2017 г.

Для цитирования: Холщевников В. В., Серков Б. Б. Значимость автоматических систем противопожарной защиты для обеспечения безопасности людей в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 9. — С. 44–53. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.44-53.

English

IMPORTANCE OF AUTOMATIC FIRE PROTECTION SYSTEMS TO ENSURE THE SAFETY OF PEOPLE IN HIGH-RISE BUILDINGS

KHOLSHCHEVNIKOV V. V., Doctor of Technical Sciences, Honoured Science Worker of High School of Russia, Professor of Fire Safety in Construction, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina str., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: reglament2004@mail.ru); Expert of Scientific Research Institute “Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services” (Antonova-Ovseenko St., 13, Bild. 1, Moscow, 123317, Russian Federation)

SERKOV B. B., Doctor of Technical Sciences, Honoured Science Worker of High School of Russia, Head of the Educational Research Center of Fire Safety in Construction, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

ABSTRACT

Considering the development Set of Rules “High-rise buildings and complexes. Fire safety requirements” it became very important, first of all, the choice of means and methods to protect people from the impact of dangerous fire factors. The correct solution of these issues leads to the achievement of the primary objective of the technical regulation “protection of life and health of citizens”.

The paper shows that these calculated values of fire risk focused on the parameters for automatic systems of fire protection and fire extinguishing equipment of foreign production, do not allow achieving this goal without evacuation of people. Calculations have shown, that the probability of a successful evacuation should be 0.999, while the probability of failure-free operation (or safety factor) of applied automated systems is about 0.8–0.9.

At the same time, the analysis of the demographic data of the UN and WHO shows that the physical ability for the safety of pedestrian evacuation of the population in developed countries over the past decade has declined significantly and they continue to degrade in connection with the increase in the number of elderly people, rising disability among people and obesity spreading to all age groups.

Consideration of these demographic trends leads to the inevitable conclusion about the necessity of improving the reliability and efficiency of functioning of the automated systems of fire protection.

The paper summarizes the presentations of Russian scientists and domestic manufacturers of these systems, showing that over the last decade they've managed to make a number of innovative inventions that are currently able to provide the domestic market with the products, which many times exceed the value of the characteristics of the foreign samples.

Evaluation of the effectiveness and reliability of these systems and of new control algorithms implemented a wireless transmission system, demonstrates the probability of their operation required to ensure the standard level of the individual fire risk.

The article discusses an unconventional concept of fire safety of people by improving the reliability and efficiency of functioning of the elements and their governing systems. The principles of this concept should form the basis for the design of fire protection systems of high-rise buildings. Their implementation in conjunction with the organization of a combined phased evacuation (pedestrian evacuation + protected elevator evacuation) will ensure the safety of high-rise buildings and decrease the time of stay of people in these building in emergency situations.

Keywords: safety; high-rise buildings; fire protection system; fire extinguishing system; spot sensors; sprinkler installation; fire extinguishing facilities; data transmission systems; wireless systems.

REFERENCES

1. *On technical regulation*. Law of Russian Federation on 22. 07. 2008 No. 184 (ed. 29. 07. 2017) (in Russian). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (Accessed 4 August 2017).
2. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22.07.2008 No. 123 (ed. 29.07.2017) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 4 August 2017).
3. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger*. Order of Emercom of Russia on 30. 06. 2009 No. 382. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009 (in Russian).
4. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger*. Order of Emercom of Russia on 30.06.2009 No. 382 (ed. 02.12.2015) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902167776> (Accessed 4 August 2017).
5. Bolodyan I. A., Khasanov I. R., Gomozov A. V. The conceptual approach to providing fire safety of high-rise construction and the formation of fire safety standards for high-rise multifunctional complexes. In: *Sovremennyye sistemy i sredstva kompleksnoy bezopasnosti i protivopozharnoy zashchity obyektov stroitelstva: materialy 2-y nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern systems and means of integrated safety and fire protection of construction objects. Proceedings of 2nd Scientific and Practical Conference]. Moscow, Stroybezopasnost Publ., 2003, pp. 14–15 (in Russian).
6. Vasilyev M. A., Demekhin F. V. Problems of ensuring the effectiveness of fire automatics. In: *Sistemy bezopasnosti. Sbornik materialov 14-y nauchno-tekhnicheskoy kontserentsii* [Safety Systems. Proceedings of 14th scientific and technical conference]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2005 (in Russian).
7. Samoshin D. A. *Sostav lyudskikh potokov i parametry ikh dvizheniya pri evakuatsii* [Composition of human flows and parameters of their movement during evacuation]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2016. 209 p. (in Russian).
8. Kholshchevnikov V. V., Prisdakov V. I., Kosterin I. V. Improvement methodology for determining the calculated value of the fire risk in buildings and structures based on stochastic description of determining their processes and trees events. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 1, pp. 5–17 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.5-17.
9. *Technical regulations for safety of buildings and constructions*. Federal Law on 30.12.2009 No. 384 (in Russian). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (Accessed 26 July 2017).
10. Kudrin I. S. *Influence of parameters of traffic flows of people in case of fire in the volumetric-planning solutions of tall buildings*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, 2013. 190 p. (in Russian).
11. Samoshin D. A. Towards the discussion of the protection of building occupants with technical means of fire automatics. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 12, pp. 53–59 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.53-59.

12. Kholshchevnikov V. V., Kudrin I. S. The safe evacuation with consideration of the stochastic behavior of the spread process in high-rise buildings. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 38–51 (in Russian).
13. *World Population Ageing 2013*. Department of Economic and Social Affairs Population Division. New York, United Nations, 2013. Available at: <http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WorldPopulationAgeing2013.pdf> (Accessed 4 August 2017).
14. *World Population Prospects: The 2012 Revision. Highlights and Advance Tables*. Department of Economic and Social Affairs Population Division. New York, United Nations, 2013. Available at: <http://stadtteilagenten.de/wp-content/uploads/2013/08/World-Population-Prospects-The-2012-Revision-Highlights-and-Advance-Tables.pdf> (Accessed 4 August 2017).
15. Peter Thompson, Daniel Nilsson, Karen Boyce, Denise McGrath. Evacuation models are running out of time. *Fire Safety Journal*, 2015, vol. 78, pp. 251–261. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.09.004.
16. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Parfyonenko A. P., Belosokhov I. R. Study of children evacuation from pre-school education institutions. *Fire and Materials*, 2012, vol. 36, no. 5-6, pp. 349–366. DOI: 10.1002/fam.2152.
17. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Istratov R. I. The problems of elderly people safe evacuation from senior citizen health care buildings in case of fire. In: *Human Behaviour In Fire*. Proceedings of 5th International Symposium. Cambridge, UK, 2012, pp. 587–593.
18. Kholshchevnikov V. V., Shields T. J., Boyce K. E., Samoshin D. A. Recent developments in pedestrian flow theory and research in Russia. *Fire Safety Journal*, 2008, vol. 43, issue 2, pp. 108–118. DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.05.005.
19. Parfenenko A. P. *Rationing of fire safety requirements for evacuation routes and exits in buildings of preschool educational institutions*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2012. 153 p. (in Russian).
20. Istratov R. N. *Rationing of requirements of fire safety to evacuation ways and exits in hospitals of social establishments on service of citizens of advanced age*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2014. 160 p. (in Russian).
21. Phan A. *Rationing of fire safety requirements for evacuation routes and exits in multi-storey residential buildings in Vietnam*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2017 (in Russian).
22. Phan A., Le H. Z. Analysis of measures to reduce fire hazard in high-rise residential buildings. *Zhurnal požarnoy bezopasnosti IPB Respubliki Vyetnam/Journal of Fire Safety IFS of the Republic of Vietnam*, 2015, vol. 77, pp. 20–23.
23. *OECD. Obesity Update 2012*. Available at: <http://www.oecd.org/health/49716427.pdf> (Accessed 4 August 2017).
24. *Society at a glance: OECD social indicators*. Paris, OECD Publishing, 2006.
25. The draft set of rules (changes to set of rules) “*High-rise buildings and complexes. Fire safety requirements*” (in Russian). Available at: http://www.gost.ru/wps/portal/pages/directions?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/gost/GOSTRU/directions/Standardization/notifications/notificationsnationalstandards (Accessed 4 August 2017).
26. *Step-by-step evacuation from high-rise buildings*. Report on scientific research. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2011. 123 p. (in Russian).
27. Set of rules 267.1325800.2016. High rise buildings and complexes. Design rules (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456044284> (Accessed 1 August 2017).
28. Sautin I. The concept of building a safe fire-fighting automatics. *Algoritm bezopasnosti / Security Algorithm*, 2015, no. 4, pp. 68–70 (in Russian).
29. Belousov L., Dauengauer S. Sprinkler water fire extinguishing systems with forced start. *Algoritm bezopasnosti / Security Algorithm*, 2009, no. 6, pp. 24–27 (in Russian).
30. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Universality of mechanisms of fire suppression by various extinguishing agents. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 11, pp. 84–88 (in Russian).
31. Ivannikov A. P., Zykov V. I., Vatyukova O. Yu., Uvarin V. S. Mathematical model of fire safety radio monitoring system operation of power engineering facilities. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: pre-dotvrashcheniye, likvidatsiya / Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2016, no. 2, pp. 43–47 (in Russian).

For citation: Kholshchevnikov V. V., Serkov B. B. Importance of automatic fire protection systems to ensure the safety of people in high-rise buildings. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 9, pp. 44–53 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.44-53.

А. А. ТАРАНЦЕВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13; e-mail: t_54@mail.ru)

А. Л. ХОЛОСТОВ, д-р техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: holostov@mail.ru)

А. А. ТАРАНЦЕВ, преподаватель кафедры пожарной тактики и службы, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: dask_cradle@mail.ru)

УДК 614.843, 628.1

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С РАЗНОТИПНЫМИ ЗАЯВКАМИ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Предложено обосновывать количественные решения при проектировании и эксплуатации систем безопасности автономных объектов на основе методов теории массового обслуживания. Рассмотрены задачи анализа и синтеза систем массового обслуживания при решении задач обеспечения безопасности объектов (например, систем противопожарной или противоаварийной защиты автономного удаленного объекта), особенностью которых является наличие различных типов заявок, требующих разного времени обслуживания (например, пожарно-спасательными подразделениями или ремонтно-восстановительными бригадами). Получены аналитические выражения для вероятностей состояний систем обслуживания. Сформулирована задача анализа как нахождение вероятности отказа системы в приеме заявки какого-либо типа по причине занятости всех каналов обслуживания, когда известны интенсивности поступления заявок и скорости их обслуживания. Сформулирована задача синтеза как нахождение необходимого числа каналов обслуживания при заданных ограничениях на вероятности отказа в приеме заявок. Приведены примеры расчета данных характеристик для одно-, двух- и трехканальной систем массового обслуживания с двумя и тремя типами заявок.

Ключевые слова: пожары; чрезвычайные ситуации; разнотипные заявки; системы массового обслуживания; система безопасности объекта.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.54-64

Введение

В настоящее время особенно актуальными становятся вопросы обеспечения безопасности автономных или труднодоступных объектов (например, в северных районах или в Арктической зоне) [1–4]. При проектировании и эксплуатации систем безопасности этих объектов необходимо обосновывать решения по их количественным показателям. В качестве таких показателей может рассматриваться число универсальных аварийно-наладочных и пожарно-спасательных подразделений, принимающих участие в ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС) различного характера, а также вероятностно-временные характеристики их реагирования на ЧС. Эти решения могут быть обоснованы с использованием методов теории массового обслуживания.

Теория массового обслуживания широко применяется для решения многих прикладных задач в различных областях науки и техники, в том числе в системах пожарной и промышленной безопасности [5–9]. Практический интерес в этих случаях представляют в основном задачи двух видов — анализ и синтез [6, 10, 11]. В первом случае, исходя из известных интенсивностей (частот) возникновения пожаров или других чрезвычайных ситуаций (которые представляются как заявки, поступающие на обслуживание) $\{\lambda\}$, скоростей их ликвидации (обслуживания) $\{\mu\}$, числа n каналов обслуживания (КО), в качестве которых рассматриваются такие ресурсы системы безопасности, как: количество единиц техники, личного состава, материальных средств и мест в очереди на обслуживание m , определяются веро-

ятности $\{p\}$ состояний системы массового обслуживания (СМО) (которые могут рассматриваться как показатели возможности выполнения системой безопасности своих функций). Из этих состояний представляют интерес ключевые: S_0 — проблемных ситуаций не возникло (заявок не поступило), все КО свободны; S_n — свободен хотя бы один КО, способный отреагировать на проблему (обслужить заявку); $S_{отк}$ — все n КО заняты, на возникшую проблему нет возможности отреагировать (заявка получает отказ в обслуживании), такая ситуация может привести к катастрофическим последствиям. Вероятности таких состояний соответственно p_0 , p_n и $p_{отк}$. После количественного определения ключевых вероятностей появляется возможность сделать вывод о том, насколько эффективно система может обеспечить безопасность защищаемого объекта.

Во втором случае (задача синтеза СМО) по заданным допустимым значениям вероятностей p_0 , p_n и $p_{отк}$ и известным частотам $\{\lambda\}$ подбираются необходимые количественные характеристики системы, такие как число КО n , число мест в очереди и/или скорости обслуживания $\{\mu\}$ [5].

Решение задач, связанных с функционированием СМО, подробно рассматривается в специальной литературе [5, 6, 12–17]. Для удобства сформулированы общепринятые допущения. В частности, считается [5], что, поскольку поток заявок простейший, время обслуживания подчинено экспоненциальному закону, процессы приема-обслуживания установившиеся, каждый КО обслуживает заявку самостоятельно, задача синтеза многоканальной СМО с очередью может решаться с использованием номограмм [6, 10], а задача анализа — по достаточно простым аналитическим выражениям [5, 6].

Теоретические основы (постановка задачи)

В работе [11] рассмотрены задачи анализа и синтеза СМО с несколькими типами заявок, для обслуживания которых требуется привлечение одного, двух, трех или более КО. С учетом особенностей функционирования систем безопасности становится актуальной разработка математической модели системы безопасности как СМО, в которую поступают m потоков разнородных заявок с интенсивностями (частотами) $\lambda_1, \dots, \lambda_m$, обслуживаемых универсальными КО со скоростями $\mu_1, \dots, \mu_m$ соответственно. Наличие такой математической модели позволяет решать задачи анализа и синтеза системы безопасности как СМО для широкого круга удаленных автономных объектов (например, в Арктической зоне), используя незначительные допущения и упрощения.

В первом случае (задача анализа) по известным значениям $\lambda_1, \dots, \lambda_m$, $\mu_1, \dots, \mu_m$ и числе КО n проводится оценка вероятностей наиболее важных состояний СМО — p_0 , p_n и $p_{отк}$, что позволяет сделать заключение о качестве функционирования СМО.

Задача синтеза предполагает наличие информации о величинах $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ и задание допустимых вероятностей основных состояний и соответствующих требований:

$$p_0 \geq p_0^{\text{доп}} \text{ и/или } p_n \geq p_n^{\text{доп}} \text{ и/или } p_{отк} \leq p_{отк}^{\text{доп}}. \quad (1)$$

При этом может быть две формулировки задачи синтеза:

- по данным о скоростях обслуживания $\mu_1, \dots, \mu_m$ и требованиям (1) определить необходимое число КО n ;
- при известном числе КО n и требованиям (1) найти необходимые скорости обслуживания $\mu_1, \dots, \mu_m$.

Система безопасности как СМО с заявками двух типов

1. Если в одноканальную ($n = 1$) СМО поступают заявки двух типов, т. е. $m = 2$ (например, заявки 1-го типа — аварии (отказы оборудования), 2-го типа — пожары), то она может пребывать в одном из трех состояний: S_0 , S_1 и S_2 (см. табл. 1, $n = 1$). Граф переходов для такой СМО представлен на рис. 1. При ранее оговоренных допущениях [5, 6] такому графу переходов соответствует система из трех линейных алгебраических уравнений, приведенная в графе 2 табл. 2 для $n = 1$. Ее решение, полученное в аналитическом виде, представлено в 3-й графе табл. 2 и может непосредственно использоваться для решения задачи анализа. В задаче синтеза условия (1) могут быть сведены к виду:

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} \leq \min \left(\frac{1}{p_0^{\text{доп}}} - 1; \frac{1}{p_n^{\text{доп}}} - 1; \frac{p_{отк}^{\text{доп}}}{1 - p_{отк}^{\text{доп}}} \right). \quad (2)$$

Пример 1. Проектируется одноканальная ($n = 1$) СМО, в которую поступает два типа ($m = 2$) заявок с частотами λ_1 и λ_2 . Требуется найти скорости обслуживания μ_1 и μ_2 , если заданы допустимые значения

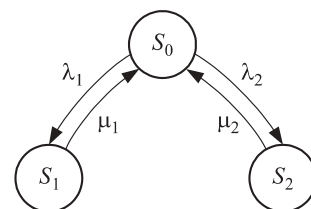


Рис. 1. Граф переходов одноканальной ($n = 1$) СМО с двумя типами ($m = 2$) заявок

Fig. 1. The transition graph of a single-channel queuing ($n = 1$) system with two types ($m = 2$) of applications

Таблица 1. Состояния СМО, обслуживающей два типа заявок

Table 1. States of the queuing systems with two types of applications

n	Состояние $\{S\}$ State $\{S\}$	$S_n, S_{отк}$ S_u, S_{ref}
1	2	3
$n = 1$ (рис. 1 / fig. 1)	S_1 — поступила заявка 1-го типа, обслуживается в КО S_1 — the 1 st type of application was received and serviced in the service channel; S_2 — поступила заявка 2-го типа, обслуживается в КО S_2 — the 2 nd type of application was received and serviced in the service channel	$S_n = S_0$ $S_u = S_0$; $S_{отк} = S_1 \cup S_2$ $S_{ref} = S_1 \cup S_2$
$n = 2$ (рис. 2 / fig. 2)	S_1 — поступила заявка 1-го типа, один КО занят, другой свободен S_1 — the 1 st type of application was received, one service channel is busy, the other is free; S_2 — поступила заявка 2-го типа, один КО занят, другой свободен S_2 — the 2 nd type of application was received, one service channel is busy, the other is free; S_3 — поступили 2 заявки 1-го типа, оба КО заняты S_3 — received 2 applications of the 1 st type, both service channels are occupied; S_4 — поступили заявки 1-го и 2-го типов, оба КО заняты S_4 — applications of the 1 st and 2 nd types were received, both service channels are occupied; S_5 — поступили 2 заявки 2-го типа, оба КО заняты S_5 — received 2 applications of the 2 nd types, both service channels are occupied	$S_n = \bigcup_{i=0}^2 S_i$ $S_u = \bigcup_{i=0}^2 S_i$; $S_{отк} = \bigcup_{i=3}^5 S_i$ $S_{ref} = \bigcup_{i=3}^5 S_i$
$n \geq 3$	S_0 — заявок не поступило, все КО свободны S_0 — there were no requests, all channels of service are free	

Таблица 2. Выражения для определения вероятностей состояний СМО с заявками двух типов ($m = 2$)

Table 2. Expressions for the probabilities of the states of the queuing systems with two types ($m = 2$) of applications

n	Система уравнений / System of equations	Аналитическое решение / Analytical expressions
1	2	3
1	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2) p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2$; $0 = \lambda_1 p_0 - \mu_1 p_1$; $0 = \lambda_2 p_0 - \mu_2 p_2$	$p_0^{-1} = 1 + \alpha_1 + \alpha_2$; $p_1 = \alpha_1 p_0$; $p_2 = \alpha_2 p_0$; $p_n = p_0$; $p_{отк} = p_1 + p_2 = (\alpha_1 + \alpha_2) p_0$
2	$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2) p_0 + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2$; $0 = \lambda_1 p_0 - (\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_2) p_1 + 2\mu_1 p_3 + \mu_2 p_5$; $0 = \lambda_2 p_0 - (\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2) p_1 + 2\mu_2 p_4 + \mu_1 p_5$; $0 = \lambda_1 p_1 - 2\mu_1 p_3$; $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\mu_1 + \mu_2) p_5$; $0 = \lambda_2 p_2 + 2\mu_2 p_4$	$p_0^{-1} = 1 + \alpha_1 + \alpha_2 + 0,5\alpha_1^2 + \alpha_1\alpha_2 + 0,5\alpha_2^2$; $p_1 = \alpha_1 p_0$; $p_2 = \alpha_2 p_0$; $p_3 = 0,5\alpha_1^2 p_0$; $p_4 = \alpha_1\alpha_2 p_0$; $p_5 = 0,5\alpha_2^2 p_0$; $p_{отк} = 0,5(\alpha_1 + \alpha_2)^2 p_0$
Примечание. $\alpha_1 = \lambda_1/\mu_1$, $\alpha_2 = \lambda_2/\mu_2$ — приведенные нагрузки; $\sum_{i=0}^C p_i = 1$; $C = C_{2m}^m - 1$. Note. $\alpha_1 = \lambda_1/\mu_1$, $\alpha_2 = \lambda_2/\mu_2$ — given load; $\sum_{i=0}^C p_i = 1$; $C = C_{2m}^m - 1$.		

ния вероятностей $p_0^{\text{доп}} = 0,95$, $p_n^{\text{доп}} = 0,99$ и $p_{отк}^{\text{доп}} = 0,001$.

Воспользовавшись выражением (2), получаем:

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} \leq \min\left(\frac{1}{0,95} - 1; \frac{1}{0,99} - 1; \frac{0,001}{1 - 0,001}\right) = \min(0,0526; 0,0101; 0,001) = 0,001.$$

Критичным здесь является условие $p_{отк} \leq p_{отк}^{\text{доп}} = 0,001$. Полученный результат свидетельствует о необходимости предъявления достаточно жестких требований к скоростям обслуживания: $[\mu_1, \mu_2]^T > 1000[\lambda_1, \lambda_2]^T$.

2. Если в двухканальную ($n = 2$) СМО поступают заявки двух типов ($m = 2$), то при условии, что КО универсальны, она может пребывать в одном из шести состояний — S_0 – S_5 (см. табл. 1, $n = 2$). Граф переходов для такой СМО представлен на рис. 2. При ранее оговоренных допущениях [5, 6] такому графу переходов соответствует система из шести линейных алгебраических уравнений, приведенная для $n = 2$ в графе 2 табл. 2. Ее решение, полученное в аналитическом виде, представлено в графе 3 табл. 2 и может непосредственно использоваться для решения задачи анализа. В задаче синтеза условия (1) могут быть сведены к виду:

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} \leq \min \left(\sqrt{\frac{2}{p_0^{\text{доп}}}} - 1 - 1; \frac{1 - p_n^{\text{доп}} + \sqrt{1 - (p_n^{\text{доп}})^2}}{p_n^{\text{доп}}}; \frac{p_{\text{отк}}^{\text{доп}} + \sqrt{p_{\text{отк}}^{\text{доп}}(2 - p_{\text{отк}}^{\text{доп}})}}{1 - p_{\text{отк}}^{\text{доп}}} \right). \quad (3)$$

Пример 2. Проектируется двухканальная ($n = 2$) СМО, в которую поступает два типа ($m = 2$) заявок с частотами λ_1 и λ_2 . Требуется найти скорости обслуживания μ_1 и μ_2 , если заданы допустимые значения вероятностей $p_0^{\text{доп}} = 0,95$, $p_n^{\text{доп}} = 0,99$ и $p_{\text{отк}}^{\text{доп}} = 0,001$.

Воспользовавшись выражением (3), получаем:

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} \leq \min \left(\sqrt{\frac{2}{0,95}} - 1 - 1; \frac{1 - 0,99 - \sqrt{1 - 0,9801}}{0,99}; \frac{0,001 + \sqrt{0,001(2 - 0,001)}}{1 - 0,001} \right) =$$

$$= \min(0,0513; 0,526; 0,0458) = 0,0458.$$

Критичным здесь также является условие $p_{\text{отк}} \leq p_{\text{отк}}^{\text{доп}} = 0,001$. Полученный результат свидетельствует о необходимости предъявления следующих требований к скоростям обслуживания: $[\mu_1, \mu_2]^T > 21,83[\lambda_1, \lambda_2]^T$. Как видим, по сравнению с одноканальным вариантом эти требования отличаются меньшей жесткостью.

Система безопасности как СМО с заявками трех типов

1. Если в одноканальную ($n = 1$) СМО поступают заявки трех типов, т. е. $m = 3$ (например, заявки 1-го типа — аварии (отказы оборудования), 2-го

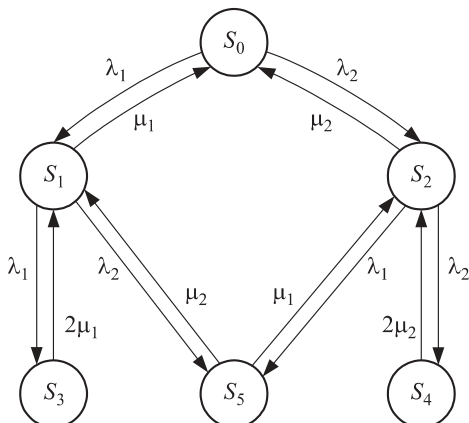


Рис. 2. Граф переходов двухканальной ($n = 2$) СМО с двумя типами ($m = 2$) заявок

Fig. 2. The transition graph a two-channel queuing ($n = 2$) system with two types ($m = 2$) of applications

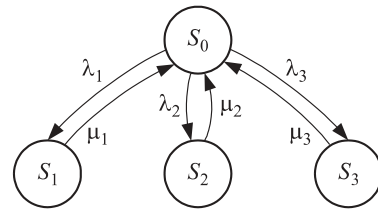


Рис. 3. Граф переходов одноканальной ($n = 1$) СМО с тремя типами ($m = 3$) заявок

Fig. 3. The transition graph of a single-channel queuing ($n = 1$) system with three types ($m = 3$) of applications

типа — пожары, 3-го типа — утечки из продуктопроводов), то она может пребывать в одном из четырех состояний — S_0 – S_3 (см. табл. 3, $n = 1$). Граф переходов для такой СМО представлен на рис. 3. При ранее оговоренных допущениях [5, 6] такому графу переходов соответствует система из четырех линейных алгебраических уравнений, приведенная для $n = 1$ в графе 2 табл. 4. Ее решение, полученное в аналитическом виде, представлено в графе 3 табл. 4 и может использоваться для решения задачи анализа. В задаче синтеза условия (1) могут быть сведены к виду, аналогичному (2):

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} \leq \min \left(\frac{1}{p_0^{\text{доп}}} - 1; \frac{1}{p_n^{\text{доп}}} - 1; \frac{p_{\text{отк}}^{\text{доп}}}{1 - p_{\text{отк}}^{\text{доп}}} \right). \quad (4)$$

Пример 3. Проектируется одноканальная ($n = 1$) СМО, в которую поступает три типа ($m = 3$) заявок с частотами λ_1 , λ_2 и λ_3 . Требуется найти скорости обслуживания μ_1 , μ_2 и μ_3 , если заданы допустимые значения вероятностей: $p_0^{\text{доп}} = 0,95$, $p_n^{\text{доп}} = 0,99$ и $p_{\text{отк}}^{\text{доп}} = 0,001$.

Как и в примере 1, получаем:

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} \leq$$

$$\leq \min \left(\frac{1}{0,95} - 1; \frac{1}{0,99} - 1; \frac{0,001}{1 - 0,001} \right) =$$

$$= \min(0,0526; 0,0101; 0,001) = 0,001.$$

Полученный результат свидетельствует о необходимости предъявления достаточно жестких требований к скоростям обслуживания: $[\mu_1, \mu_2, \mu_3]^T > 1000[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$.

2. Если в двухканальную ($n = 2$) СМО поступают заявки трех типов ($m = 3$), то она может пребывать в одном из 10 состояний: S_0 – S_9 (см. табл. 3, $n = 2$). Граф переходов для такой СМО представлен на рис. 4. При ранее оговоренных допущениях [5, 6] такому графу переходов соответствует система из 10 линейных алгебраических уравнений, приведенная в графе 2 табл. 4 для $n = 2$. Ее решение, полученное в аналитическом виде, приведено в графе 3 табл. 4 и может непосредственно использоваться для реше-

Таблица 3. Состояния СМО, обслуживающей три типа заявок
Table 3. States of the queuing systems with three types of applications

n	Состояние $\{S\}$ State $\{S\}$	$S_H, S_{отк}$ S_u, S_{ref}
$n = 1$ (рис. 3 / fig. 3)	S_1 — поступила заявка 1-го типа, обслуживается в КО S_1 — the 1 st type of application was received and serviced in the service channel; S_2 — поступила заявка 2-го типа, обслуживается в КО S_2 — the 2 nd type of application was received and serviced in the service channel; S_3 — поступила заявка 3-го типа, обслуживается в КО S_3 — the 3 rd type of application was received and serviced in the service channel	$S_H = S_0$ $S_u = S_0;$ $S_{отк} = \bigcup_{i=1}^3 S_i$ $S_{ref} = \bigcup_{i=1}^3 S_i$
$n = 2$ (рис. 4 / fig. 4)	S_1 — поступила заявка 1-го типа, обслуживается в КО S_1 — the 1 st type of application was received and serviced in the service channel; S_2 — поступила заявка 2-го типа, обслуживается в КО S_2 — the 2 nd type of application was received and serviced in the service channel; S_3 — поступила заявка 3-го типа, обслуживается в КО S_3 — the 3 rd type of application was received and serviced in the service channel; S_4 — поступили 2 заявки 1-го типа, оба КО заняты S_4 — received 2 applications of the 1 st type, both service channels are occupied; S_5 — поступили заявки 1-го и 2-го типов, оба КО заняты S_5 — applications of the 1 st and 2 nd types were received, both service channels are occupied; S_6 — поступили заявки 1-го и 3-го типов, оба КО заняты S_6 — received applications of the 1 st and 3 rd types, both service channels are occupied; S_7 — поступили 2 заявки 2-го типа, оба КО заняты S_7 — received 2 applications of the 2 nd type, both service channels are occupied; S_8 — поступили заявки 2-го и 3-го типов, оба КО заняты S_8 — received applications of the 2 nd and 3 rd types, both service channels are occupied; S_9 — поступили 2 заявки 3-го типа, оба КО заняты S_9 — received 2 applications of the 3 rd type, both service channels are occupied	$S_H = \bigcup_{i=0}^3 S_i$ $S_u = \bigcup_{i=0}^3 S_i;$ $S_{отк} = \bigcup_{i=4}^9 S_i$ $S_{ref} = \bigcup_{i=4}^9 S_i$
$n = 3$ (рис. 5 / fig. 5)	S_1 — поступила заявка 1-го типа, обслуживается в КО S_1 — the 1 st type of application was received and serviced in the service channel; S_2 — поступила заявка 2-го типа, обслуживается в КО S_2 — the 2 nd type of application was received and serviced in the service channel; S_3 — поступила заявка 3-го типа, обслуживается в КО S_3 — the 3 rd type of application was received and serviced in the service channel; S_4 — поступили 2 заявки 1-го типа, оба КО заняты S_4 — received 2 applications of the 1 st type, both service channels are occupied; S_5 — поступили заявки 1-го и 2-го типов, оба КО заняты S_5 — applications of the 1 st and 2 nd types were received, both service channels are occupied; S_6 — поступили заявки 1-го и 3-го типов, оба КО заняты S_6 — received applications of the 1 st and 3 rd types, both service channels are occupied; S_7 — поступили 2 заявки 2-го типа, оба КО заняты S_7 — received 2 applications of the 2 nd type, both service channels are occupied; S_8 — поступили заявки 2-го и 3-го типов, оба КО заняты S_8 — received applications of the 2 nd and 3 rd types, both service channels are occupied; S_9 — поступили 2 заявки 3-го типа, оба КО заняты S_9 — received 2 applications of the 3 rd type, both service channels are occupied; S_{10} — поступили 3 заявки 1-го типа, все КО заняты S_{10} — received 3 applications of the 1 st type, all service channels are occupied; S_{11} — поступили 2 заявки 1-го типа и заявка 2-го типа, все КО заняты S_{11} — received 2 applications of the 1 st type and the application of the 2 nd type, all service channels are occupied; S_{12} — поступила заявка 1-го типа и 2 заявки 2-го типа, все КО заняты S_{12} — received application of the 1 st type and 2 applications of the 2 nd type, all the service channels are occupied;	$S_H = \bigcup_{i=0}^9 S_i$ $S_u = \bigcup_{i=0}^9 S_i;$ $S_{отк} = \bigcup_{i=10}^{19} S_i$ $S_{ref} = \bigcup_{i=10}^{19} S_i$

n	Состояние $\{S\}$ State $\{S\}$	$S_n, S_{отк}$ S_n, S_{ref}
	S_{13} — поступили заявки 1, 2 и 3-го типов, все КО заняты S_{13} — received applications of the 1 st , 2 nd and 3 rd types, all service channels are occupied; S_{14} — поступили 2 заявки 1-го типа и заявка 3-го типа, все КО заняты S_{14} — received 2 applications of the 1 st type and the application of the 3 rd type, all service channels are occupied; S_{15} — поступили 2 заявки 3-го типа и заявка 1-го типа, все КО заняты S_{15} — received 2 applications of the 3 rd type and the application of the 1 st type, all service channels are occupied; S_{16} — поступили 3 заявки 2-го типа, все КО заняты S_{16} — received 3 applications of the 2 nd type, all service channels are occupied; S_{17} — поступили 2 заявки 2-го типа и заявка 3-го типа, все КО заняты S_{17} — received 2 applications of the 2 nd type and the application of the 3 rd type, all service channels are occupied; S_{18} — поступили заявка 2-го типа и 2 заявки 3-го типа, все КО заняты S_{18} — received application of the 2 nd type and 2 applications of the 3 rd type, all the service channels are occupied; S_{19} — поступили 3 заявки 3-го типа, все КО заняты S_{19} — received 3 applications of the 3 rd type, all service channels are occupied	
$n \geq 4$	S_0 — заявок не поступало, все КО свободны S_0 — there were no requests, all channels of service are free	

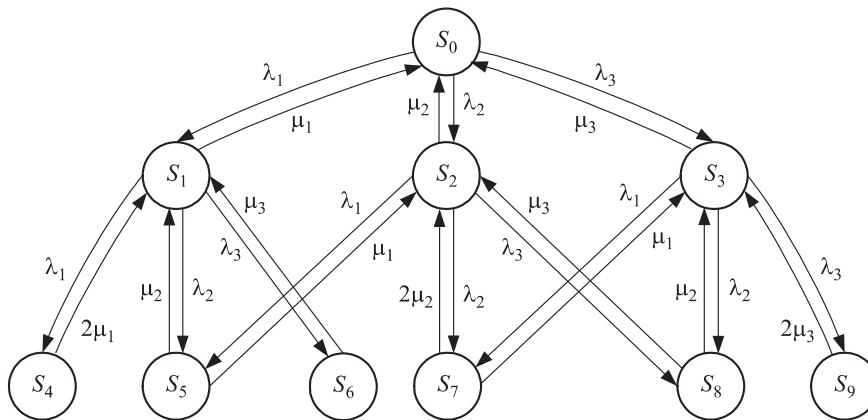


Рис. 4. Граф переходов двухканальной ($n = 2$) СМО с тремя типами ($m = 3$) заявок

Fig. 4. The transition graph a two-channel queuing ($n = 2$) system with three types ($m = 3$) of applications

ния задачи анализа. В задаче синтеза условия (1) могут быть сведены к виду, аналогичному (3):

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} \leq \min \left(\sqrt{\frac{2}{p_0^{\text{доп}}}} - 1 - 1; \frac{1 - p_n^{\text{доп}} + \sqrt{1 - (p_n^{\text{доп}})^2}}{p_n^{\text{доп}}}; \frac{p_{отк}^{\text{доп}} + \sqrt{p_{отк}^{\text{доп}}(2 - p_{отк}^{\text{доп}})}}{1 - p_{отк}^{\text{доп}}} \right). \quad (5)$$

3. Если в трехканальную ($n = 3$) СМО поступают заявки трех типов ($m = 3$), то при условии, что КО универсальны, она может пребывать в одном из 20 состояний — S_0 – S_{19} (см. табл. 3, $n = 3$). Граф переходов для такой СМО представлен на рис. 5. При ранее оговоренных допущениях [5, 6] такому графу переходов соответствует система из 20 линейных

алгебраических уравнений, приведенная для $n = 3$ в графе 2 табл. 4. Ее решение, полученное в аналитическом виде, представлено в графе 3 табл. 4 и может непосредственно использоваться для решения задачи анализа. В задаче синтеза необходимо найти приведенные нагрузки α_0 , α_n и $\alpha_{отк}$ из решения кубических уравнений:

$$\alpha_0^3 + 3\alpha_0^2 + 6\alpha_0 - 6 \left(\frac{1}{p_0^{\text{доп}}} - 1 \right) = 0; \quad (6)$$

$$\left(\frac{p_n^{\text{доп}}}{1 - p_n^{\text{доп}}} \right) \alpha_n^3 - 3\alpha_n^2 - 6\alpha_n - 6 = 0; \quad (7)$$

$$\left(\frac{1}{p_{отк}^{\text{доп}}} - 1 \right) \alpha_{отк}^3 - 3\alpha_{отк}^2 - 6\alpha_{отк} - 6 = 0. \quad (8)$$

Таблица 4. Выражения для определения вероятностей состояний СМО с заявками трех типов ($m = 3$)

Table 4. Expressions for the probabilities of the states of the queuing systems with three types ($m = 3$) of applications

n	Система уравнений / System of equations	Аналитическое решение / Analytical expressions
1	2	3
1	$0 = -p_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3;$ $0 = \lambda_1 p_0 - \mu_1 p_1; \quad 0 = \lambda_2 p_0 - \mu_2 p_2; \quad 0 = \lambda_3 p_0 - \mu_3 p_3$	$p_0^{-1} = 1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3; \quad p_1 = \alpha_1 p_0; \quad p_2 = \alpha_2 p_0;$ $p_3 = \alpha_3 p_0; \quad p_n = p_0; \quad p_{отк} = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) p_0$
2	$0 = -p_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_1 + 2\mu_1 p_4 + \mu_2 p_5 + \mu_3 p_6;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_2 + \mu_1 p_5 + 2\mu_2 p_7 + \mu_3 p_8;$ $0 = \lambda_3 p_0 - (\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_3 + \mu_1 p_6 + \mu_2 p_8 + 2\mu_3 p_9;$ $0 = \lambda_1 p_1 - 2\mu_1 p_4; \quad 0 = \lambda_1 p_1 - (\mu_1 + \mu_2) p_5 + \lambda_1 p_2;$ $0 = \lambda_3 p_1 + \lambda_1 p_3 - (\mu_1 + \mu_3) p_6; \quad 0 = \lambda_2 p_2 - 2\mu_2 p_7;$ $0 = \lambda_3 p_2 + \lambda_2 p_3 - (\mu_2 + \mu_3) p_8; \quad 0 = \lambda_3 p_3 - 2\mu_3 p_9$	$p_0^{-1} = 1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + 0,5(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2) +$ $+ \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_3 + \alpha_2 \alpha_3;$ $p_1 = \alpha_1 p_0; \quad p_2 = \alpha_2 p_0; \quad p_3 = \alpha_3 p_0;$ $p_4 = 0,5 \alpha_1^2 p_0; \quad p_5 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; \quad p_6 = \alpha_1 \alpha_3 p_0;$ $p_7 = 0,5 \alpha_2^2 p_0; \quad p_8 = \alpha_2 \alpha_3 p_0; \quad p_9 = 0,5 \alpha_3^2 p_0;$ $p_n = p_0(1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3);$ $p_{отк} = 0,5(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)^2 p_0$
3	$0 = -p_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) + \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 + \mu_3 p_3;$ $0 = \lambda_1 p_0 - (\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_1 + 2\mu_1 p_4 + \mu_2 p_5 + \mu_3 p_6;$ $0 = \lambda_2 p_0 - (\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_2 + \mu_1 p_5 + 2\mu_2 p_7 + \mu_3 p_8;$ $0 = \lambda_3 p_0 - (\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_3 + \mu_1 p_6 + \mu_2 p_8 + 2\mu_3 p_9;$ $0 = \lambda_1 p_1 - (2\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_4 + 3\mu_1 p_{10} + \mu_2 p_{11} + \mu_3 p_{14};$ $0 = \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_5 + 2\mu_1 p_{11} + 2\mu_2 p_{12} + \mu_3 p_{13};$ $0 = \lambda_3 p_1 + \lambda_1 p_3 - (\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_6 + \mu_2 p_{13} + 2\mu_1 p_{14} + 2\mu_3 p_{15};$ $0 = \lambda_2 p_2 - (2\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_7 + \mu_1 p_{12} + 3\mu_2 p_{16} + \mu_3 p_{17};$ $0 = \lambda_3 p_2 + \lambda_2 p_3 - (\mu_2 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_8 + \mu_1 p_{13} + 2\mu_2 p_{17} + 2\mu_3 p_{18};$ $0 = \lambda_3 p_3 - (2\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) p_9 + \mu_1 p_{15} + \mu_2 p_{18} + 3\mu_3 p_{19};$ $0 = \lambda_1 p_4 - 3\mu_1 p_{10}; \quad 0 = \lambda_2 p_4 + \lambda_1 p_5 - (2\mu_1 + \mu_2) p_{11};$ $0 = \lambda_2 p_5 + \lambda_1 p_7 - (\mu_1 + 2\mu_2) p_{12};$ $0 = \lambda_3 p_5 + \lambda_2 p_6 + \lambda_1 p_8 - (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) p_9 + \mu_1 p_{13};$ $0 = \lambda_3 p_4 + \lambda_1 p_6 - (2\mu_1 + \mu_3) p_{14}; \quad 0 = \lambda_3 p_6 + \lambda_1 p_9 - (\mu_1 + 2\mu_3) p_{15};$ $0 = \lambda_2 p_7 - 3\mu_2 p_{16}; \quad 0 = \lambda_3 p_7 + \lambda_2 p_8 - (2\mu_2 + \mu_3) p_{17};$ $0 = \lambda_3 p_8 + \lambda_2 p_9 - (\mu_2 + 2\mu_3) p_{18}; \quad 0 = \lambda_3 p_9 - 3\mu_3 p_{19}$	$p_0^{-1} = 1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + 0,5(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)^2 +$ $+ (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)^3 / 6;$ $p_1 = \alpha_1 p_0; \quad p_2 = \alpha_2 p_0; \quad p_3 = \alpha_3 p_0;$ $p_4 = 0,5 \alpha_1^2 p_0; \quad p_5 = \alpha_1 \alpha_2 p_0; \quad p_6 = \alpha_1 \alpha_3 p_0;$ $p_7 = 0,5 \alpha_2^2 p_0; \quad p_8 = \alpha_2 \alpha_3 p_0; \quad p_9 = 0,5 \alpha_3^2 p_0;$ $p_{10} = \alpha_1^3 p_0 / 6; \quad p_{11} = 0,5 \alpha_1^2 \alpha_2 p_0;$ $p_{12} = 0,5 \alpha_1 \alpha_2^2 p_0; \quad p_{13} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 p_0;$ $p_{14} = 0,5 \alpha_1^2 \alpha_3 p_0; \quad p_{15} = 0,5 \alpha_1 \alpha_3^2 p_0;$ $p_{16} = \alpha_2^3 p_0 / 6; \quad p_{17} = 0,5 \alpha_2^2 \alpha_3 p_0;$ $p_{18} = 0,5 \alpha_2 \alpha_3^2 p_0; \quad p_{19} = \alpha_2 \alpha_3^2 p_0 / 6;$ $p_n = p_0 [1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + 0,5(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)^2];$ $p_{отк} = p_0 (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)^3 / 6$

Примечание. $\alpha_1 = \lambda_1 / \mu_1, \alpha_2 = \lambda_2 / \mu_2, \alpha_3 = \lambda_3 / \mu_3$ — приведенные нагрузки; $\sum_{i=0}^C p_i = 1; C = C_{2m}^m - 1$.

Note. $\alpha_1 = \lambda_1 / \mu_1, \alpha_2 = \lambda_2 / \mu_2, \alpha_3 = \lambda_3 / \mu_3$ — given load; $\sum_{i=0}^C p_i = 1; C = C_{2m}^m - 1$.

Условия (1) могут быть сведены к виду:

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} \leq \min(\alpha_0; \alpha_n; \alpha_{отк}), \quad (9)$$

где $\alpha_0 = \sqrt[3]{2 + 0,5B_1 + \sqrt{B_1^2 + 8B_1 + 20}} +$
 $+ \sqrt[3]{2 + 0,5B_1 - \sqrt{B_1^2 + 8B_1 + 20}} - 1;$
 $\alpha_n = \frac{1}{B_2} \left(1 + \sqrt[3]{3B_2^2 + 3B_2 + 1 + B_2 \sqrt{9B_2^2 + 10B_2 + 3}} + \right.$
 $\left. + \sqrt[3]{3B_2^2 + 3B_2 + 1 - B_2 \sqrt{9B_2^2 + 10B_2 + 3}} \right);$
 $\alpha_{отк} = \frac{1}{B_3} \left(1 + \sqrt[3]{3B_3^2 + 3B_3 + 1 + B_3 \sqrt{9B_3^2 + 10B_3 + 3}} + \right.$
 $\left. + \sqrt[3]{3B_3^2 + 3B_3 + 1 - B_3 \sqrt{9B_3^2 + 10B_3 + 3}} \right).$

Пример 4. Проектируется трехканальная ($n = 3$) СМО, в которую поступает три типа ($m = 3$) заявок с частотами λ_1, λ_2 и λ_3 . Требуется найти скорости

обслуживания μ_1, μ_2 и μ_3 , если заданы допустимые значения вероятностей $p_0^{\text{доп}} = 0,95, p_n^{\text{доп}} = 0,99$ и $p_{отк}^{\text{доп}} = 0,001$.

Находим: $B_1 = 0,3158; B_2 = 99; B_3 = 999$. Из (6)–(9) получаем:

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} \leq \min(0,051; 0,455; 0,194) = 0,051.$$

Это свидетельствует о критичности условия $p_0 > p_0^{\text{доп}} = 0,95$ и необходимости предъявления требований к скоростям обслуживания: $[\mu_1, \mu_2, \mu_3]^T > 19,6[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$.

Результаты и их обсуждение

Обобщая полученные результаты, для данного типа СМО можно вывести следующие универсальные выражения:

$$p_0 = \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{i!} \left(\sum_{j=1}^m \alpha_j \right)^i \right]^{-1}; \quad (10)$$

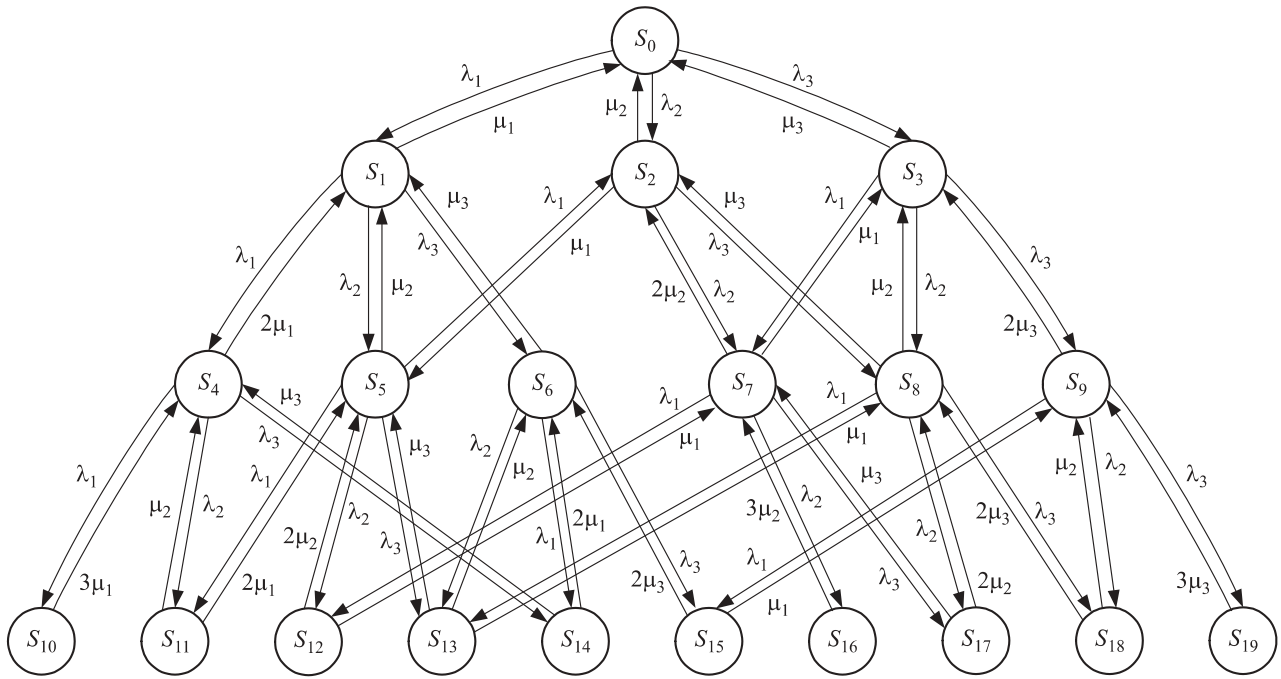


Рис. 5. Граф переходов трехканальной ($n = 3$) СМО с тремя типами ($m = 3$) заявок

Fig. 5. The transition graph a three-channel queuing ($n = 3$) system with three types ($m = 3$) of applications

$$p_n = p_0 \left[1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i!} \left(\sum_{j=1}^m \alpha_j \right)^i \right]; \quad (11)$$

$$p_{\text{отк}} = \sum_{k=N_1}^{N_2} p_k = \frac{p_0}{n!} \left(\sum_{j=1}^m \alpha_j \right)^n. \quad (12)$$

Это позволяет сформулировать следующую **теорему**: для n -канальной СМО без очереди при стандартных допущениях (процессы приема-обслуживания заявок установившиеся, потоки заявок простейшие, времена обслуживания заявок каждого типа подчинены экспоненциальным законам: $\varphi(t_j) = \mu_j \times \exp(-\mu_j t_j)$, каждый КО обслуживает заявку самостоятельно), в которую поступают заявки m типов с частотами $\lambda_1, \dots, \lambda_m$, обслуживаемые со скоростями $\mu_1, \dots, \mu_m$ соответственно, вероятности незанятости канала обслуживания, отказа в приеме заявки и приеме заявки к немедленному обслуживанию могут быть найдены по выражениям соответственно:

$$p_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_C^i}{i!} \right)^{-1}; \quad (13)$$

$$p_n = p_0 \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\alpha_C^i}{i!} \right); \quad (14)$$

$$p_{\text{отк}} = (p_0/n!) \alpha_C^n, \quad (15)$$

где α_C — общая приведенная нагрузка; $\alpha_C = \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_j}{\mu_j}$.

Доказательство теоремы для $m = 1$ (заявки одного типа) заключается в том очевидном факте, что выражения (10)–(12) приводятся к общеизвестному виду [5] для стандартных одно- и многоканальных СМО с отказами. Для $m = 2$ (заявки двух типов) доказательство представлено в табл. 2, для $m = 3$ (заявки трех типов) — в табл. 4. Подобным образом получены доказательства и для $m \geq 4$, но ввиду громоздкости выражений они здесь не приводятся.

Задача анализа рассматриваемой СМО может решаться непосредственным вычислением по выражениям (11)–(12) вероятностей p_0 , p_n и $p_{\text{отк}}$ при известных частотах поступления заявок $\lambda_1, \dots, \lambda_m$, скоростях их обслуживания $\mu_1, \dots, \mu_m$ и числе КО n .

Задача синтеза, как показано выше, сводится к тому, что по заданным допустимым значениям вероятностей $p_0^{\text{доп}}$, $p_n^{\text{доп}}$ и $p_{\text{отк}}^{\text{доп}}$ и известным частотам $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ подбираются необходимые значения числа КО n и/или скоростей обслуживания $\mu_1, \dots, \mu_m$.

Выводы

Таким образом, получены математические модели для систем безопасности объектов на основе n -канальных СМО, в которые поступают простейшие потоки разнотипных заявок. Данные математические модели могут быть использованы для решения задач анализа и синтеза таких СМО.

Полученные результаты актуальны при рассмотрении систем безопасности автономных объектов (например, в северных районах или Арктической зоне), где могут возникать различные типы чрезвычай-

чайных ситуаций (отказы оборудования, аварии, пожары, утечки энергоносителей), для устранения ко-

торых создаются универсальные аварийно-наладочные и пожарно-спасательные бригады.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akimov V. A., Sokolov Yu. I. Risks of emergencies in Russia's Arctic zone // Issues of Risk Analysis. Scientific and Practical Journal. — 2010. — Vol. 7, No. 4. — 21 p. URL: https://www.dex.ru/par_en/abstracts_of_journal/pdf/PAR_7_4_en.pdf (дата обращения: 10.08.2017).
2. Алешков М. В., Безбородько М. Д. Применение мобильных средств пожаротушения для защиты объектов атомной энергетики от крупных пожаров в условиях экстремально низких температур // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2014. — № 3. — С. 37–45.
3. Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Fomin V. M. Designing machinery for the Arctic: A problem of socioeconomic development of Russia's eastern regions // Herald of the Russian Academy of Sciences. — 2015. — Vol. 85, No. 1 — P. 79–86. DOI: 10.1134/s1019331615010104.
4. Дагиров Ш. Ш., Алешков М. В., Иценко А. Д., Роевко В. В. Перспективы применения отдельных технических достижений для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в арктическом регионе // Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в арктическом регионе. Безопасный город в Арктике": материалы Международной научно-практической конференции, 6–8 апреля 2016 г., г. Звенигород. — М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. — С. 146–155.
5. Вентцель Е. С. Исследование операций. — М. : Советское радио, 1972. — 552 с.
6. Таранцев А. А. Инженерные методы теории массового обслуживания. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — СПб. : Наука, 2007. — 175 с.
7. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Алехин Е. М., Коломиец Ю. И., Вагнер П. Опыт применения компьютерных имитационных систем моделирования деятельности экстренных служб // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 8. — С. 6–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.6-16.
8. Алехин Е. М., Брушлинский Н. Н., Соколов С. В. О распределении Эрланга и некоторых его приложениях // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2014. — Т. 23, № 6. — С. 11–17.
9. Топольский Н. Г., Таранцев А. А., Чумаченко А. П. Экспресс-выбор параметров систем массового обслуживания в АСУ пожарной охраны // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2000. — Т. 9, № 1. — С. 7–11.
10. Таранцев А. А., Малышев Д. А. О возможности совершенствования ГОСТ Р 22.7.01–99 “Единая дежурно-диспетчерская служба” // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 11. — С. 77–81.
11. Таранцев А. А., Холостов А. Л., Иценко А. Д., Потапенко В. В. О задачах анализа и синтеза систем обслуживания заявок нескольких типов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 3. — С. 31–38. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.31-38.
12. Ancker C. J., Gafarian A. V. Queuing with multiple poisson inputs and exponential service times // Operations Research. — 1961. — Vol. 9, No. 3. — P. 321–327. DOI: 10.1287/opre.9.3.321.
13. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. — М. : Машиностроение, 1979. — 432 с.
14. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание. Теория и приложения / Пер. с франц. — М. : Мир, 1965. — 302 с.
15. Хинчин А. Я. Работы по математической теории массового обслуживания. — М. : Физматгиз, 1963. — 236 с.
16. Doig A. A bibliography on the theory of queues // Biometrika. — 1957. — Vol. 44, Issue 3-4. — P. 490–514. DOI: 10.1093/biomet/44.3-4.490.

Материал поступил в редакцию 21 августа 2017 г.

Для цитирования: Таранцев А. А., Холостов А. Л., Таранцев А. А. Анализ и синтез систем массового обслуживания с разнотипными заявками в задачах обеспечения безопасности объектов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 9. — С. 54–64. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.54-64.

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF QUEUING SYSTEMS WITH DIVERSE APPLICATIONS IN PROBLEMS THE SAFETY OF OBJECTS

TARANTSEV A. A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Organisation of the Fire Suppression and Rescue Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); Head of Laboratory of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (12-ya Liniya Vasilyevskogo Ostrova, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: t_54@mail.ru)

KHOLOSTOV A. L., Doctor of Technical Sciences, Docent, Deputy Head of the Department of Electrical Engineering, Automated Systems and Communication, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: holostov@mail.ru)

TARANTSEV A. A., Lecturer of Fire Tactics and Service Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: dask_cradle@mail.ru)

ABSTRACT

It was proposed to substantiate quantitative solutions in the design and operation of safety systems of autonomous objects on the basis of methods of the theory of queuing systems.

The article deals with the problems of analysis and synthesis of the queuing systems when solving the problems of ensuring the safety of objects (for example, fire-fighting or emergency protection systems of an autonomous remote object), which feature is the availability of different types of applications that require different maintenance time (for example, fire and rescue units or repair and recovery teams).

While solving problems of analysis the probability p of finding the system in key states determines. S_0 — there were no problematic situations, all the service channels are free; S_u — at least one service channel is available, capable of responding to the problem (service request); S_{ref} — all n service channels are busy, there is no possibility to react to the problem that has arisen (the application receives a denial of service).

While solving the synthesis problem, the necessary quantitative characteristics of the system, such as the number of service channels n , the number of queues and the speed of service $\{\lambda\}$, are selected from the given permissible values of probabilities p_0 , p_u and p_{ref} and known frequencies $\{\mu\}$.

Step by step systems are considered with applications of two types — one-channel and two-channel applications and a system with applications of three types — one-channel, two-channel and three-channel applications.

Graphs and equations describing the states of the system and analytical solutions for finding the probabilities of the ground states are given for each of the considered types of systems.

Universal expressions are obtained for finding the probabilities of key states for an n -channel queuing system without a queue under standard assumptions for m type applications. The justification of the obtained expressions is given.

Examples of characteristics calculation for one-channel, two-channel and three-channel queuing systems with two and three types of applications are given. In particular, the probability of finding a system in a state when no applications are received (p_0) is calculated, when the requests arrive and one service channel (p_u) is left and when all the service channels are occupied (p_{ref}).

Examples of solving problems of analysis and synthesis are given for each of the considered types of systems.

The article clearly demonstrates the possibility of applying the above methods to the problems of creating integrated security systems for remote autonomous objects, in particular, located in the Far North and in the Arctic zone.

This work is a logical continuation of the article Tarantsev A. A., Kholostov A. L., Ishchenko A. D., Potapenko V. V. Problems of analysis and synthesis of application service systems of several types. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 31–38.

Keywords: fires; emergency; diverse application; queuing system; security system of the object.

REFERENCES

1. Akimov V. A., Sokolov Yu. I. Risks of emergencies in Russia's Arctic zone. *Issues of Risk Analysis. Scientific and Practical Journal*, 2010, vol. 7, no. 4. 21 p. Available at: https://www.dex.ru/par_en/abstracts_of_journal/pdf/PAR_7_4_en.pdf (Accessed 10 August 2017).
2. Aleshkov M. V., Bezborodko M. D. Application of movable fire extinguishment means for protecting nuclear power plants from large fires under extremely low temperature conditions. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya / Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2014, no. 3, pp. 37–45 (in Russian).
3. Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Fomin V. M. Designing machinery for the Arctic: A problem of socioeconomic development of Russia's eastern regions. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 85, no. 1, pp. 79–86. DOI: 10.1134/s1019331615010104.
4. Dagirov Sh. Sh., Aleshkov M. V., Ishchenko A. D., Roenko V. V. Prospects of application of certain technical advances for the prevention and liquidation of emergency situations in the Arctic region. In: *Problemy preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy v arkticheskom regione. Bezopasnyy gorod v Arktike: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of prevention and liquidation of emergency situations in the Arctic region. Safe city in the Arctic. Proceedings of International Scientific and Practical Conference]. Moscow, FGBU VNII GOChS (FTs) Publ., 2016, pp. 146–155 (in Russian).
5. Ventsel E. S. *Issledovaniye operatsiy* [Operations research]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1972. 552 p. (in Russian).
6. Tarantsev A. A. *Inzhenernyye metody teorii massovogo obsluzhivaniya* [Engineering methods of theory of mass service]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2007. 175 p. (in Russian).
7. Brushlinskiy N. N., Sokolov S. V., Alekhin E. M., Kolomiets Yu. I., Wagner P. Computer systems simulating activities of municipal emergency services. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 8, pp. 6–16 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.6-16.
8. Alekhin E. M., Brushlinskiy N. N., Sokolov S. V. About Erlang's distribution and some its applications. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 11–17 (in Russian).
9. Topolskiy N. G., Tarantsev A. A., Chumachenko A. P. Express-selection of parameters of mass maintenance system in ACS of fire protection. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2000, vol. 9, no. 1, pp. 7–11 (in Russian).
10. Tarantsev A. A., Malyshev D. A. About possibility of perfection GOST R 22.7.01–99 “Single duty-controller's service”. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 11, pp. 77–81 (in Russian).
11. Tarantsev A. A., Kholostov A. L., Ishchenko A. D., Potapenko V. V. Problems of analysis and synthesis of application service systems of several types. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 31–38 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.31-38.
12. Ancker C. J., Gafarian A. V. Queuing with multiple poisson inputs and exponential service times. *Operations Research*, 1961, vol. 9, no. 3, pp. 321–327. DOI: 10.1287/opre.9.3.321.
13. Kleinrock L. *Queueing systems. Volume 1: Theory*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1975. 417 p. (Russ. ed.: Kleinrock L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979. 432 p.).
14. Kaufmann A., Cruon R. *Massovoye obsluzhivaniye. Teoriya i prilozheniya* [Mass service. Theory and applications]. Moscow, Mir Publ., 1965. 302 p. (in Russian).
15. Khinchin A. J. *Raboty po matematicheskoy teorii massovogo obsluzhivaniya* [Work on the mathematical theory of mass service]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 236 p. (in Russian).
16. Doig A. A bibliography on the theory of queues. *Biometrika*, 1957, vol. 44, issue 3-4, pp. 490–514. DOI: 10.1093/biomet/44.3-4.490.

For citation: Tarantsev A. A., Kholostov A. L., Tarantsev A. A. Analysis and synthesis of queuing systems with diverse applications in problems the safety of objects. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 9, pp. 54–64 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.54-64.

А. Н. ФЕЩЕНКО, адъюнкт, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: saver32@mail.ru)

С. А. МАКАРОВ, канд. техн. наук, и. о. начальника кафедры общей и специальной химии, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

В. П. МОЛЧАНОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры общей и специальной химии, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

А. В. ТРЕТЬЯКОВ, генеральный директор ООО "Эгида ПТВ" (Россия, 127299, г. Москва, ул. Клары Цеткин, 18, корп. 4)

С. С. ВОЕВОДА, д-р техн. наук, профессор, вице-президент Национального союза организаций в области обеспечения пожарной безопасности (НСОПБ) (Россия, 129626, г. Москва, Графский пер., 14, корп. 1)

УДК 614.844.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРАТНОСТИ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩЕЙ ПЕНЫ ДЛЯ ПОДСЛОЙНОГО ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ

Проведен обзор работ, выявивший существенное влияние кратности пены на эффективность пенного пожаротушения. Установлено, что существующие способы определения кратности пленкообразующей пены для подслоного тушения не учитывают противодействие, создаваемое столбом горючей жидкости. Предложен вариант лабораторной установки и методика определения кратности, соответствующей ее реальному значению во время подслоной подачи в резервуар. Показано, что сущность методики основана на определении соотношения удельной электропроводности рабочего раствора пенообразователя и удельной электропроводности пены.

Ключевые слова: подслоное пожаротушение; кратность пены; тушение пожаров нефтепродуктов; удельная электропроводность пены; испытания высоконапорных пеногенераторов.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.65-73

Введение

Пожары нефтепродуктов признано считать одними из самых сложных. Как правило, если не удалось потушить загорание в начальной стадии, то пожар переходит в затяжную стадию и для его ликвидации потребуется большое количество людских и материальных ресурсов. Достаточно часто тушение таких пожаров не имеет успеха. Виной этому могут быть многие причины, одной из которых является отсутствие требуемой кратности воздушно-механической пены. Для систем подслоного пожаротушения контроль кратности пены наиболее актуален, так как отсутствует возможность визуального контроля структуры пены, получаемой с помощью высоконапорных пеногенераторов во время тушения. На кратность пены будут оказывать влияние такие параметры, как качество пенообразователя, жесткость используемой воды, правильное дозирование и работа самих высоконапорных пеногенераторов. Все модели генераторов имеют широкий диапазон напорно-расходных характеристик. В зависимости от

давления расход изменяется в пределах нескольких десятков процентов. Безусловно, в этом случае невозможно обеспечить стабилизацию кратности пены. Как правило, при проведении испытаний высоконапорных пеногенераторов об этом не задумываются, определяется лишь возможность обеспечения кратности пены по нижней границе, соответствующей 4. Исследованием механизма тушения горючих жидкостей пеной, полученной на основе пенообразователей различной природы, занимались многие ученые [1–6].

Еще в 70-х годах [1] классиками пенного пожаротушения была выявлена закономерность, согласно которой на критическую интенсивность тушения пламени нефтепродуктов влияет кратность пены. В одной из работ осуществлялось тушение бензина подачей сверху воздушно-механической пены различной кратности, полученной на основе углеводородного пенообразователя ПО-6. В ходе исследований было установлено, что при увеличении кратности пены значительно снижается критическая интенсивность ее подачи.

И. Ф. Безродный [3], анализируя причины безуспешного тушения пожаров нефтепродуктов воздушно-механической пеной, приходит к выводу, что одной из важных причин является неспособность пеногенерирующего устройства обеспечить и поддерживать на должном уровне требуемую кратность пены.

Влияние кратности фторсодержащей пленкообразующей пены на основные параметры подслоного пожаротушения широко обсуждается и в последнее время [7–9]. Так, Е. Н. Дегаев и Д. А. Корольченко в работе [7] исследуют влияние кратности пены на основные параметры подслоного пожаротушения при изменении кратности от 4 до 16. В ходе экспериментальных исследований была выявлена закономерность, согласно которой при увеличении кратности пены ее огнетушащая эффективность в отдельных случаях увеличивается до двух раз. Сделан вывод о существенном влиянии кратности пены на результаты пожаротушения.

Е. И. Хиль [8] исследовал влияние кратности фторированных пленкообразующих пенообразователей на минимальный удельный расход пенообразующего раствора и оптимальную интенсивность подачи пены в слой горючего. В качестве горючей жидкости использовался н-гептан. Для получения пены низкой кратности применялись следующие пенообразователи: Ansulite AFFF, Hydral AFFF, Shtamex AFFF, Ultraguard AFFF, Light Water FS 201, Multifoam AFFF. Установлено, что при увеличении кратности пены с 4 до 10 оптимальная интенсивность ее подачи снижается в два раза. Предложена также полуэмпирическая формула (1), которая показывает, что снижение минимального удельного расхода пены обратно пропорционально корню квадратному из кратности пены:

$$I_{\text{опт}} = 2,5I_{\text{кр}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{опт}}$ — оптимальная интенсивность подачи пены, кг/(м²·с);

$I_{\text{кр}}$ — критическая интенсивность подачи пены, определяемая скоростью термического и контактного разрушения пены при растекании по горячей поверхности жидкости, кг/(м²·с).

На основе комплексных исследований огнетушащей эффективности, проведенных с использованием большого количества различных фторированных пленкообразующих пенообразователей, выпускаемых в России и за рубежом, экспериментально доказано, что при подслоном пожаротушении увеличение кратности пены приводит к сокращению времени тушения. При кратности менее 3,5–4 при подслоном способе подачи воздушно-механической пены будет происходить отслоение раствора пенообразователя от пены, стремящейся вверх к поверхности горючей жидкости, поэтому контроль

кратности пены в течение всего времени тушения очень важен [9].

Проведенный анализ работ позволяет говорить о том, что влияние кратности подаваемой на пожаротушение пены весьма существенно.

Лабораторные исследования по тушению нефтепродуктов подслоным способом в большинстве случаев проводят на стандартизированной модельной установке согласно ГОСТ Р 53280.2–2010. Схема данной установки представлена на рис. 1.

Пену получают на электромеханическом устройстве 10 в течение 30 с. Затем определяют кратность, после чего перекадывают ее в емкость 6. Емкость взвешивают на весах, результат записывают в журнал, а емкость закручивают герметичной крышкой. Далее осуществляют подачу сжатого воздуха, выталкивающего из емкости 6 пену, которая по трубопроводу идет в модельный резервуар 1. Пена подается из нижней части емкости. С момента образования и до начала подачи пены проходит значительное время, за которое в процессе синерезиса обезвоживаются верхние слои пены, изменяется объем и, соответственно, кратность пены. За это время может вполне образоваться отсек. Таким образом, кратность пены, которую определяют на устройстве 10 в момент ее получения, и кратность пены, которой про-

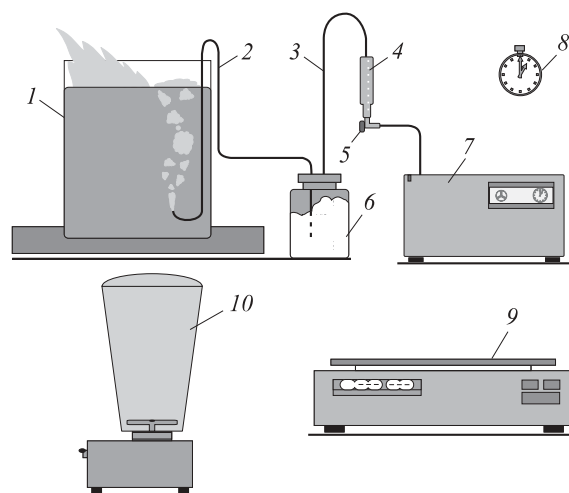


Рис. 1. Схема установки, используемой при проведении лабораторных испытаний по тушению нефтепродуктов подслоным способом: 1 — модель резервуара; 2 — трубопровод для подачи пены в резервуар; 3 — трубопровод для подачи воздуха в емкость с пеной; 4 — измеритель расхода воздуха (ротаметр); 5 — регулирующий клапан; 6 — промежуточная емкость с пеной; 7 — компрессор; 8 — секундомер; 9 — одночашечные весы; 10 — устройство для получения пены

Fig. 1. Installation diagram of the setup which is used in the laboratory during testing for extinguishing petroleum subsurface: 1 — tank model; 2 — pipeline for supplying foam to the tank; 3 — pipeline for supplying air to the vessel with foam; 4 — area flowmeter; 5 — regulating valve; 6 — intermediate tank with foam; 7 — compressor; 8 — stopwatch; 9 — libra; 10 — device for producing foam

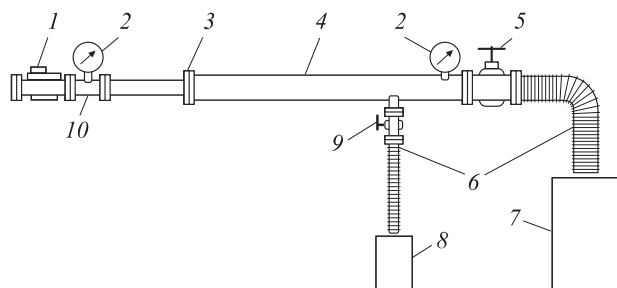


Рис. 2. Схема установки для испытания высоконапорных генераторов [6]: 1 — расходомер; 2 — манометры; 3 — пеногенератор; 4 — основной трубопровод; 5 — задвижка; 6 — эластичные рукава; 7 — емкость 200 л; 8 — емкость 8 л; 9 — шаровой кран; 10 — дополнительный трубопровод

Fig. 2. Diagram of the setup for testing high-pressure generators: 1 — flow fluid meter; 2 — pressure gauges; 3 — foam generator; 4 — main pipeline; 5 — valve; 6 — elastic hose; 7 — capacity 200 l; 8 — capacity 8 l; 9 — ball valve; 10 — additional pipeline

водят тушение, имеют разные значения. В связи с этим не совсем корректно использовать значения кратности, принятые в начале эксперимента, для получения различных зависимостей.

В настоящее время кратность пены определяют весовым способом. В ГОСТ Р 53290–2009 представлен именно такой способ, с помощью которого испытывают высоконапорные генераторы пены низкой кратности для подслоного пожаротушения. На рис. 2 приведена схема установки для испытания высоконапорных генераторов. Подробное описание данной установки представлено в ГОСТ Р 53290–2009.

Сущность метода измерения кратности пены заключается в следующем. Приготавливают раствор пенообразователя в заданной концентрации. Испытание для определения кратности пены начинают проводить только после создания перед генератором рабочего давления. За счет перекрытия трубопровода с помощью задвижки 5 в пенопроводе создают давление, составляющее 40 % рабочего давления раствора пенообразователя. Давление раствора пенообразователя и пены фиксируются по манометрам 2. После достижения необходимого давления в пенокамере открывается шаровой кран 9 и заполняется емкость объемом $(10,0 \pm 0,1)$ л. Затем путем взвешивания определяют массу пены m (кг). Кратность пены K рассчитывают по формуле

$$K = V_{\text{п}} / V_{\text{р}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{п}}$ — объем пены, л;

$V_{\text{р}}$ — объем раствора пенообразователя, численно равный массе пены, л.

Недостатком данного метода является существенное различие значений кратности пены внутри основного трубопровода и кратности пены в емкости. Задвижка 5 для имитации противодействия способствует дополнительному пенообразованию. При отборе пены в емкость происходит ее барботирование

воздухом. В данном способе не учитывается влияние высокого встречного давления, которое при подслоном пожаротушении создается слоем горючей жидкости. При высоте слоя жидкости в резервуаре 12 м оно приблизительно составляет 0,85 атм.

В работе [10] для решения проблемы барботирования воздуха при отборе пены в емкость предлагается применять узел отбора, в котором в выход пробоотборника вводят металлическую трубку. Трубка опущена в емкость до уровня 3 см выше дна. Этот способ частично предотвращает барботирование в момент отбора пены, но не учитывает влияния противодействия. Таким образом, кратность полученной пены будет отличаться от фактической кратности пены, подаваемой в резервуар.

Кроме того, методики не учитывают изменения кратности пены во время подачи и при нестабильном рабочем давлении. В лучшем случае весовой способ подразумевает определение средних значений кратности, в худшем определяется кратность на каком-либо участке рабочего диапазона давлений. Создаваемое при таких испытаниях противодействие является условным, так как пена в результате все равно попадает в мерную емкость, а пенные пузыри “окружает” давление, соответствующее атмосферному (т. е. противодействие столба жидкости отсутствует). В реальных условиях после получения пены на высоконапорном генераторе и при подаче ее в основание резервуара кратность пены будет иной, так как к атмосферному давлению добавляется давление столба горючей жидкости. В связи с этим возникла необходимость определения кратности пены, поступающей в основание резервуара во время подслоной подачи.

Цель данной работы — предложить устройство для измерения кратности пены при подслоном пожаротушении непрерывно, на протяжении всего времени подачи.

Для выполнения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выполнить анализ существующих методик определения кратности пены;
- 2) на основе сделанного анализа предложить способ определения кратности пены внутри трубопровода;
- 3) разработать конструкцию экспериментальной установки измерения кратности пены для подслоного пожаротушения.

Основная часть

Идея использования для определения кратности пены электрического сопротивления была выдвинута В. К. Тихомировым. Он предлагал определять среднюю кратность пены, используя устройство, в состав которого входит электрохимическая ячей-

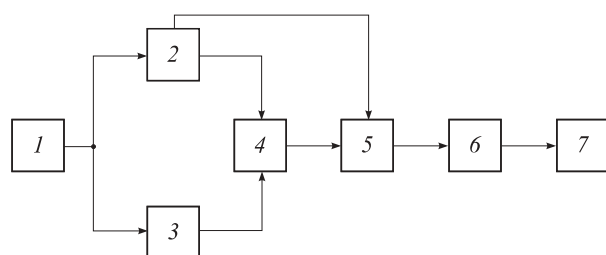


Рис. 3. Устройство для определения кратности: 1 — генератор гармонических колебаний; 2, 3 — датчики электропроводности пены; 4 — блок деления сигналов; 5 — блок коррекции; 6 — блок линейного выпрямителя; 7 — указатель кратности

Fig. 3. Device for the multiplicity determining: 1 — generator of harmonic oscillations; 2, 3 — foam conductivity sensors; 4 — block division of signals; 5 — correction unit; 6 — block linear rectifier; 7 — multiplicity pointer

ка, соединенная с измерителем электросопротивления, с помощью которого определяют кратность по следующему расчетному соотношению:

$$K = 0,67\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{р}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{р}}$ — удельное электросопротивление соответственно пены и исходного раствора [11].

Данный метод при увеличении кратности не учитывает изменения коэффициента пропорциональности.

А. Ф. Шароварниковым и Е. В. Кокоревым было предложено устройство для изучения пен высокой

кратности [12]. На рис. 3 изображена схема установки, которая работает следующим образом. Датчики 2 и 3 погружаются в раствор, и в этот момент на блоке 4 появляется сигнал, пропорциональный электросопротивлению исходного раствора. Далее этот сигнал поступает в блок коррекции 5, где совершается калибровка раствора по электросопротивлению исходного раствора. После того как проведена калибровка устройства, датчики 2 и 3 опускают в пену. Электросопротивление пены зависит от проводимости раствора в пенных пленках и от поверхностной проводимости, которая в свою очередь обусловлена наличием двойного электрического слоя в пене.

Кратность пены определяется по уравнению

$$K = (\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{р}})\beta, \quad (4)$$

где β — коэффициент, пропорциональный величине сопротивления раствора;

$$\beta = 0,22 + 0,087\rho_{\text{р}}. \quad (5)$$

Формула (4) учитывает коэффициент пропорциональности, который изменяется при измерении средней и высокой кратности пены.

Материалы и методы исследования

Нами предлагается устройство, позволяющее в режиме реального времени контролировать крат-

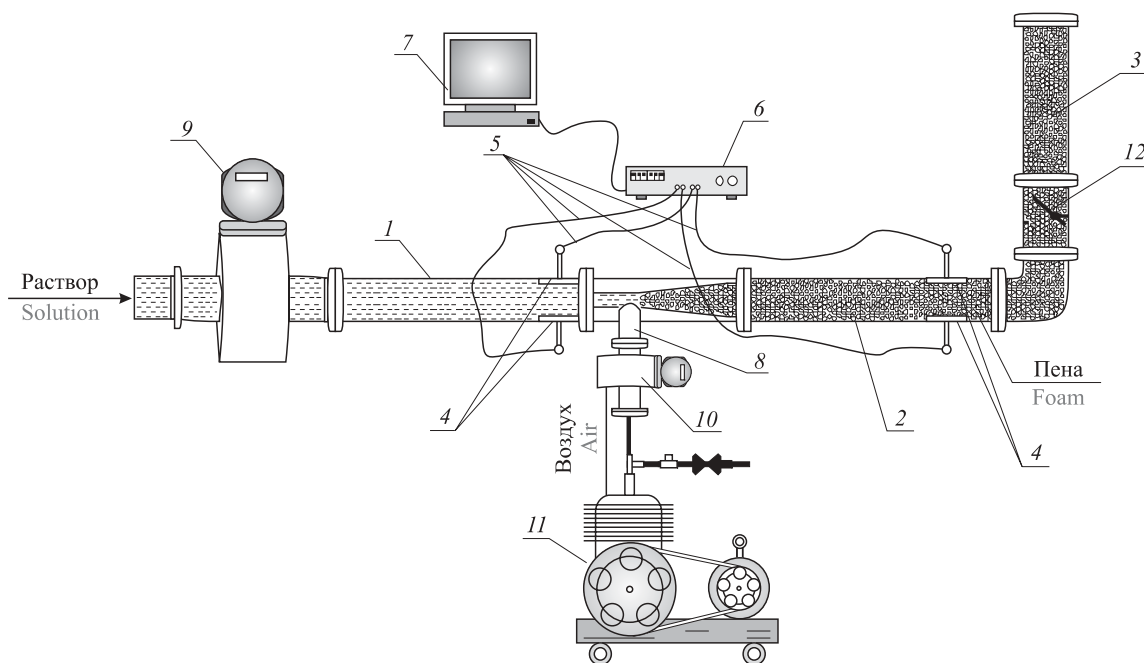


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для определения кратности в режиме реального времени: 1, 2 — труба из диэлектрического материала; 3 — труба с горючей жидкостью; 4 — металлические пластины; 5 — электроды; 6 — измеритель удельной электропроводности; 7 — компьютер; 8 — воздушный патрубок; 9 — расходомер по раствору; 10 — расходомер по воздуху; 11 — компрессор; 12 — обратный клапан

Fig. 4. Installation diagram of the experimental setup for determining the multiplicity of the foam in real time: 1, 2 — pipe of dielectric material; 3 — pipe with flammable liquid; 4 — metal plates; 5 — electrodes; 6 — meter conductivity; 7 — computer; 8 — air pipe; 9 — flow fluid meter (for the solution); 10 — area flowmeter for air; 11 — compressor; 12 — check valve

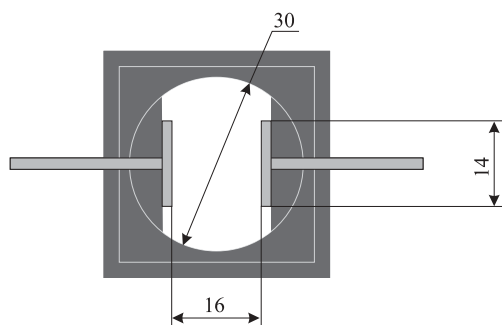


Рис. 5. Ячейка для определения удельной электропроводности

Fig. 5. The cell to determine of the specific resistance

ность пены внутри трубопровода при подслоном пожаротушении. В основе лежит известное свойство изменения электрического сопротивления пены в зависимости от ее кратности [11]. На рис. 4 представлена схема установки.

Установка состоит из двух труб 1 и 2, выполненных из диэлектрического материала, двух парных пластин 4 из нержавеющей стали, установленных внутри труб. Пластины площадью 25 см² каждая расположены друг напротив друга. Тыльные стороны пластин (расположенные возле трубы) покрыты диэлектрическим материалом. К каждой из пластин подключены электроды 5, которые соединены с измерителем электрического сопротивления 6. Данные выводятся на регистратор 7. На входе первой трубы установлен расходомер по раствору 9, на входе второй трубы — воздушный патрубок 8, в котором расположен расходомер по воздуху 10. Воздух подается компрессором 11 принудительно, что позволяет регулировать его количество. Объем подаваемого раствора пенообразователя контролируется водяным расходомером. В трубе за генератором 3 установлен обратный клапан 12.

Для корректной работы установки ее необходимо предварительно настроить. Для этого используют калиброванную ячейку, схема которой представлена на рис. 5. С помощью ячейки определяют удельную электропроводность раствора пенообразователя. Для этого применяют мост с частотой не менее 1000 Гц. В качестве моста используется прибор Е7-8, способный в автоматическом режиме разделять активную и реактивную составляющие. В качестве калибровочной жидкости применяется водный раствор KCl. Соль в заданной концентрации растворяется в дистиллированной воде и помещается в ячейку. Удельную электропроводность раствора хлорида калия KCl в данной концентрации определяют по таблицам справочника химика [13].

Табличные значения удельной электропроводности сравнивают с полученными значениями ее в ячейке. Находят коэффициент ячейки для различных значений сопротивлений раствора (отношение

истинного значения электропроводности к полученному в эксперименте). Математическая зависимость изменения коэффициента ячейки A (м⁻¹) выглядит следующим образом:

$$A = -0,0021R + 32,4, \quad (6)$$

где R — сопротивление между электродами, Ом.

Результаты и их обсуждение

На рис. 6 представлены фактические значения зависимости коэффициента ячейки от сопротивления водного раствора хлорида калия между электродами.

В ячейку заливают рабочий раствор пенообразователя заданной концентрации, которая варьируется от 0,5 до 10 % масс. Затем определяют удельную электропроводность рабочего раствора пенообразователя и строят градуировочную кривую № 1 соответствия сопротивления между электродами ячейки с раствором пенообразователя в заданной концентрации и фактической удельной электропроводности этого раствора. Градуировочная зависимость для раствора фторированного пенообразователя приведена на рис. 7.

После этого используют установку, представленную на рис. 4. При этом в трубе 3 отсутствует жидкость — в системе нет противодавления. В трубу 1 подают раствор пенообразователя заданной концентрации и проводят измерения электрического сопротивления раствора различной концентрации. Затем рассчитывают его удельное сопротивление. После этого, зная удельную электропроводность данного раствора, определяют коэффициент ячейки для участка установки в трубе 1.

Так как участок установки 1 и участок установки 2 (см. рис. 4) конструктивно выполнены одинаково, коэффициенты ячеек для этих участков будут

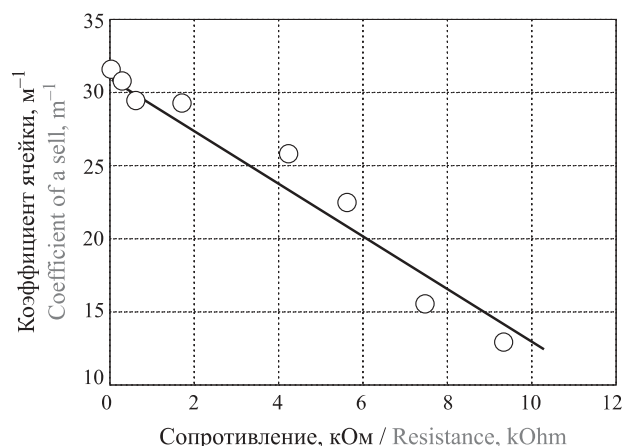


Рис. 6. Зависимость коэффициента ячейки от сопротивления водного раствора хлорида калия между электродами

Fig. 6. The dependence of a cell coefficient on resistance between electrodes of an aqueous solution of potassium chloride

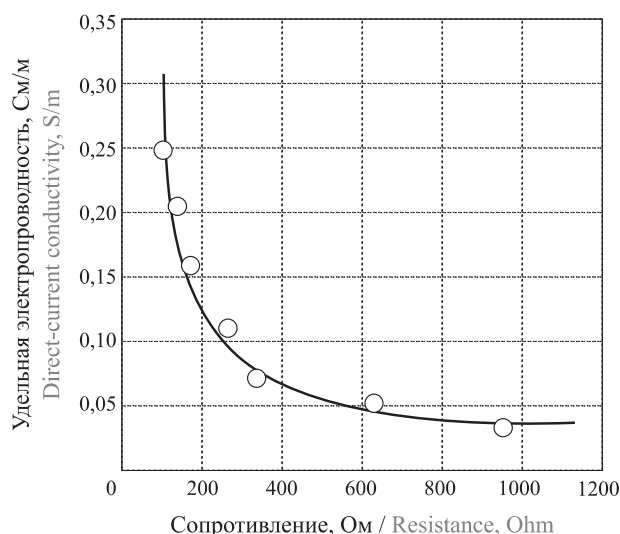


Рис. 7. Градуировочная кривая № 1 соответствия сопротивления между электродами ячейки с раствором фторированного пенообразователя и фактической удельной электропроводности этого раствора

Fig. 7. The calibration curve No. 1 of the matching resistance between the electrodes of a cell with working solution of the fluorinated film-forming foamer and the actual resistivity of this solution

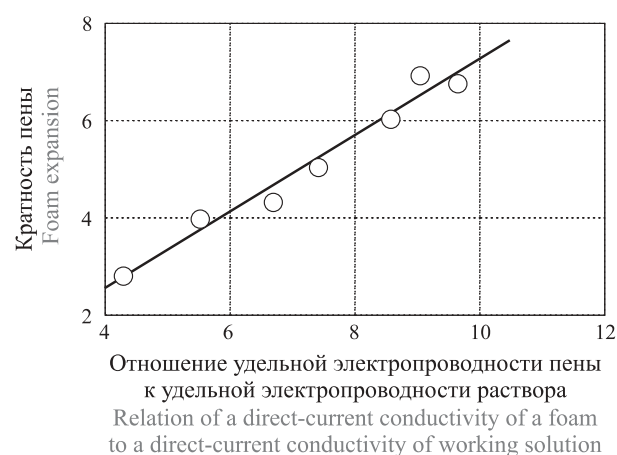


Рис. 8. Градуировочная кривая № 2 соответствия отношения удельной электропроводности раствора фторированного пенообразователя к пене и кратности

Fig. 8. The calibration curve No. 2 of the matching relationship of the specific conductivity of a solution of fluorinated foaming agent to foam and expansion

различаться в пределах погрешности измерений. Для определения удельной электропроводности пены, получаемой на участке трубы 2, можно будет воспользоваться математической зависимостью (3). Находим электросопротивление образовавшейся пены между электродами и ее кратность в трубе 2. Кратность рассчитывается как отношение объема пены к объему раствора пенообразователя. Значения объемов устанавливают по показателям расходомеров 9 и 10 (см. рис. 4). Определяют удельную электропроводность пены, используя коэффициенты ячейки, полученные при помощи уравнения (6). Строится градуировочная кривая № 2, иллюстрирующая изменение кратности пены от отношения удельной электропроводности пены к удельной электропроводности рабочего раствора (рис. 8).

Из графика рис. 8 видно, что кратность пены от соотношения удельных электропроводностей пены и раствора имеет линейную зависимость [11]. Математическое выражение имеет следующий вид:

$$K = 0,62(\rho_n / \rho_p). \quad (7)$$

Далее трубу 3 наполняют жидкостью и подают раствор в трубу 1. При этом нет необходимости присутствия в установке таких приборов, как расходомеры по воздуху, расходомер по раствору, компрессор для принудительной подачи воздуха. Определяют удельную электропроводность образовавшейся пены и по уравнению (7) рассчитывают ее кратность. Таким образом, полученное значение кратности учитывает влияние противодавления.

Закключение

Использование предложенного способа определения кратности пены при подслоном пожаротушении позволит:

- 1) улучшить точность измерения кратности внутри трубопровода;
- 2) контролировать кратность получаемой пены на протяжении всего времени подачи;
- 3) оценить влияние противодавления столба жидкости на параметры подслоного пенного пожаротушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котов А. А., Петров И. И., Реутт В. Ч. Применение высокократной пены при тушении пожаров. — М. : Стройиздат, 1972. — 113 с.
2. Bikerman J. J. Foams. — New York : Springer, 1973. DOI: 10.1007/978-3-642-86734-7.
3. Безродный И. Ф. Забытые имена — забытые знания... или “Почему не тушит пена?..” // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2011. — Т. 20, № 12. — С. 49–55.
4. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П., Воевода С. С., Шароварников С. А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. — М. : Калан, 2002. — 448 с.
5. Sharovarnikov A. F., Punchik G. I. Experimental determination of the strength of foams with high foam densities // Colloid Journal. — 1982. — Vol. 44, No. 1. — P. 180–182.

6. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Heat balance of extinguishing process of flammable liquid by sprayed water // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 1070-1072. — P. 1794–1798. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1070-1072.1794.
7. Дегаев Е. Н., Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Влияние кратности пен на основные параметры процесса тушения углеводородов // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов “Проблемы техносферной безопасности–2015”. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. — С. 24–28.
8. Хиль Е. И., Воевода С. С., Шароварников А. Ф., Макарова И. П. Экспериментальное определение минимального удельного расхода и оптимальной интенсивности подачи пенообразователя при тушении пламени нефтепродуктов // Пожарная безопасность. — 2015. — № 4. — С. 76–81.
9. Хиль Е. И., Макарова И. П., Шароварников А. Ф. Влияние кратности пены на эффективность тушения пламени нефтепродуктов подачей пены в основание резервуара // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. — 2016. — № 1. — С. 48–50.
10. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Факторы, снижающие огнетушащую эффективность подслоной системы при тушении пламени нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 4. — С. 56–67. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.04.56-67.
11. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. — 2-е изд., перераб. — М.: Химия, 1983. — 264 с.
12. А. с. 911288 СССР. Устройство для определения кратности пен. МПК G01N 27/02 / Шароварников А. Ф., Кокорев Е. В.; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт противопожарной обороны. — № 2813644/18-25; заявл. 03.09.79; опубл. 07.03.82, Бюл. № 9.
13. Справочник химика. Т. 3. Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы / Под ред. Б. П. Никольского. — 2-е изд. — М.–Л.: Химия, 1965. — 1008 с.

Материал поступил в редакцию 10 августа 2017 г.

Для цитирования: Фещенко А. Н., Макаров С. А., Молчанов В. П., Третьяков А. В., Воевода С. С. Определение кратности пленкообразующей пены для подслоного тушения пожаров горючих жидкостей // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 9. — С. 65–73. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.65-73.

English

DETERMINATION OF FREQUENCY RATE OF FILM FORMING FOAM FOR SUBLAYER SUPPRESSION OF THE FIRES OF COMBUSTIBLE LIQUIDS

FESHCHENKO A. N., Postgraduate Student of General and Special Chemistry Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: saver32@mail.ru)

MAKAROV S. A., Candidate of Technical Sciences, Care-Taker of the Head of General and Special Chemistry Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

MOLCHANOV V. P., Doctor of Technical Sciences, Professor of General and Special Chemistry Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

TRETYAKOV A. V., General Director ООО “Egida PTV” (Klary Tsetkin St., 18, build. 4, Moscow, 127299, Russian Federation)

VOEVODA S. S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice President, The National Union of Organizations of Ensuring the Fire Safety (Grafskiy Lane, 14, build. 1, Moscow, 129626, Russian Federation)

ABSTRACT

This work contains the review of the literature about influence of frequency rate of foam on effectiveness of fire extinguishing. It is known that the frequency rate of foam significantly influences key parameters of fire extinguishing. Foam generators do not allow to maintain up-to-the-mark frequency rate of foam with changing pressure. As a result the frequency rate changes during time of its giving,

and for its monitoring when carrying out tests it requires the device which is capable to measure frequency rate in real time.

Some ways of determination of frequency rate of foam in laboratory, and in the conditions of carrying out actual tests are analysed. In the main way is weighted one. Its weak spot consists in inaccuracy of determination of values of frequency rate of foam. At suppression with ready foam in laboratory a key indicator is its stability. During actual tests with application of high-head foam generators the essential error arises because of air barbotage. Earlier methods of determination of frequency rate on a direct-current conductivity of foam were used. However, despite accuracy of these methods, they did not find application in the standardized techniques. Common weak spot of the existing ways of determination of frequency rate of foam is that they do not consider a counter pressure in system which arises at sublayer fire extinguishing.

The purpose of this work — to offer the device, which is able to measured of frequency rate of foam at sublayer fire extinguishing uninterrupted, throughout all time of giving.

There were two steps of researches. At the first stage the calibration cell was used. The dependence of coefficient of a cell on resistance between electrodes is established, using an aqueous solution of chloride of a potassium with the known direct-current conductivity was fixed. Then the specific resistance of working solution of the fluorinated film-forming foamer was defined.

At the second stage a set-up which allowed to reveal dependence of frequency rate of foam on the size of the relation of a direct-current conductivity of foam to a direct-current conductivity of working solution was piked up.

As a result of the conducted researches the mathematical dependence allowing to determine values of frequency rate of foam by the relation of a direct-current conductivity of foam to a direct-current conductivity of working solution was offered. The constant of proportionality for determination of low frequency rate of foam is established. The technique allowing to define frequency rate of the given foam at sublayer fire extinguishing is offered, throughout all time of giving taking into account a counterpressure at the exit of a high-head foam generator.

Keywords: sublayer fire extinguishing; frequency rate of foam; fire extinguishing of oil products; direct-current conductivity of foam; test of high-head foam generators.

REFERENCES

1. Kotov A. A., Petrov I. I., Reutt V. Ch. *Primeneniye vysokokratnoy peny pri tushenii pozharov* [The use of high multiplicity foam to extinguish fires]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972. 113 p. (in Russian).
2. Bikerman J. J. *Foams*. New York, Springer, 1973. DOI: 10.1007/978-3-642-86734-7.
3. Bezrodnyi I. F. Forgotten names — the forgotten knowledge or... “Why do not extinguish the foam?..”. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 12, pp. 49–55 (in Russian).
4. Sharovarnikov A. F., Molchanov V. P., Voevoda S. S., Sharovarnikov S. A. *Tusheniye pozharov nefiti i nefteproduktov* [Fire extinguishing of oil and oil products]. Moscow, Kalan Publ., 2002. 448 p. (in Russian).
5. Sharovarnikov A. F., Punchik G. I. Experimental determination of the strength of foams with high foam densities. *Colloid Journal*, 1982, vol. 44, no. 1, pp. 180–182.
6. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Heat balance of extinguishing process of flammable liquid by sprayed water. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1070-1072, pp. 1794–1798. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1070-1072.1794.
7. Degaev E. N., Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Influence of multiplicity foams on the basic parameters quenching processes hydrocarbons. In: *Materialy 4-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov “Problemy tekhnosfernoy bezopasnosti–2015”* [Proceedings of the 4th International scientific and practical conference of young scientists and specialists “Technospheric Safety Problems–2015”]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russian Publ., 2015, pp. 24–28 (in Russian).
8. Hil’ E. I., Voevoda S. S., Sharovarnikov A. F., Makarova I. P. Experimental determination of minimum discharge intensity and optimum rate of foaming agent input during suppression of oil products flame. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2015, no. 4, pp. 76–81 (in Russian).
9. Khil E. I., Makarova I. P., Sharovarnikov A. F. The influence of the multiplicity of foam on the efficiency of extinguishing the flames of oil products supply foam to the base of the tank. *Upravleniye kachestvom v neftegazovom komplekse / Quality Management in Oil and Gas Industry*, 2016, no. 1, pp 48–50 (in Russian).

10. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Factors which reduce fire extinguishing efficiency of sublayer system during suppression of the flame of oil products. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 4, pp. 56–67 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.04.56-67.
11. Tikhomirov V. K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya*. 2-ye izd. [Foam. Theory and practice of their production and destruction. 2nd ed.]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 264 p. (in Russian).
12. Sharovarnikov A. F., Kokorev E. V. *A device for determining the multiplicity of foams*. Inventor's Certificate no. 911288 SSSR, publ. date 07.03.82 (in Russian).
13. Nikolskiy B. P. (ed.). *Spravochnik khimika. T. 3. Khimicheskoye ravnovesiye i kinetika. Svoystva rastvorov. Elektrodnyye protsessy*. 2-ye izd. [Reference book of chemist. Vol. 3. Chemical equilibrium and kinetics. Properties of solutions. Electrode processes. 2nd ed.]. Moscow, Leningrad, Khimiya Publ., 1965. 1008 p. (in Russian).

For citation: Feshchenko A. N., Makarov S. A., Molchanov V. P., Tretyakov A. V., Voevoda S. S. Determination of frequency rate of film forming foam for sublayer suppression of the fires of combustible liquids. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 9, pp. 65–73 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.65-73.



ООО “Издательство “ПОЖНАУКА”

предлагает Вашему вниманию

Учебное пособие



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

ЭВАКУАЦИЯ ЗРИТЕЛЕЙ ИЗ СПОРТИВНО-ЗРЕЛИЩНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНУТРЕННЕГО ТРАНСПОРТА

М. : Изд-во “ПОЖНАУКА”, 2016. — 88 с.

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

Для заказа книги пишите нам по адресу:

121352, г. Москва, а/я 43,

или звоните по телефону

8 (495) 228-09-03.

Вы можете также оформить заказ через электронную почту:

mail@firepress.ru.



ВОПРОС:

С введением в законную силу Федерального закона “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” (ФЗ-123) изменилась система оценки взрывоопасных зон, в то же время классификация пожароопасных зон практически не претерпела изменений. Маркировка взрывоопасных зон классов В-II и В-IIa по Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) была заменена на классы зон 21 и 22 по ФЗ-123. В ПУЭ отмечено, что для класса зоны В-IIa в отношении электрических машин, аппаратов и стационарных светильников допускается применение оборудования без средств взрывозащиты со степенью защиты соответственно IP44(54), IP54 и IP53.

Возможно ли применение электрооборудования без средств взрывозащиты в зоне класса 22?

ОТВЕТ:

В ФЗ-123 [1] в п. 1 ст. 82 указано, что электрооборудование должно соответствовать классу пожаро- или взрывоопасной зоны, категории и группе горючей смеси. Из этого следует, что для помещений с наличием взрывоопасных пылевых сред должно применяться взрывозащищенное оборудование (Ex-оборудование), имеющее соответствующую маркировку. Порядок ее выполнения представлен в ст. 23 ФЗ-123 [1]. В данной статье отсутствует информация о маркировке оборудования, предназначенного для работы во взрывоопасных пылевых средах.

В Техническом регламенте Таможенного Союза (ТР ТС 012/2011) [2] представлены сведения по оборудованию группы III, применяемому во взрывоопасных пылевых средах. Для обеспечения безопасной работы в таких условиях допускается применять следующие виды взрывозащиты:

- *t* (*ta*, *tb*, *tc*) — защита оболочкой;
- *i* (*ia*, *ib*) — искробезопасность (искробезопасная электрическая цепь);
- *m* (*ma*, *mb*, *mc*) — герметизация компаундом;
- *p* — заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением;
- *s* — специальный вид взрывозащиты.

Каждый вид взрывозащиты имеет собственные стандарты по его применению, испытаниям, конструированию и т. д. В стандартах на виды взрывозащиты *i*, *m*, *p*, *s* изложены требования к защите оборудования от пыли и влаги с кодом *IP* в качестве дополнения к основной защите. В первую очередь это касается кабельных вводов, соединений, уплотнений, где требуется обеспечение герметичности соединения отдельных компонентов электроустановки. Требования к маркировке взрывозащиты с дополни-

тельным кодом *IP* предъявляются и к вращающимся электрическим машинам с учетом ГОСТ IEC 60034-5 [3]. Указанные виды взрывозащиты (*i*, *m*, *p*, *s*) могут использоваться совместно с защитой по коду *IP* в конструкции Ex-оборудования для применения во взрывоопасных пылевых средах, что исключает возможность использования оборудования без средств взрывозащиты во взрывоопасных зонах класса 22 (по аналогии с классом В-II по ПУЭ).

Иная ситуация складывается для вида *t* (защита оболочкой). По требованиям ТР ТС 012/2011 [2] *t* — это вид взрывозащиты, при котором оборудование защищено оболочкой, обеспечивающей защиту от проникновения пыли, и средствами по ограничению температуры поверхности. При этом в оборудовании группы III, включая кабельные вводы и соединения, пыль не должна образовывать взрывоопасные смеси с воздухом или опасные скопления внутри оборудования. Требования для вида взрывозащиты *t* представлены в ГОСТ IEC 60079-31 [4]. В качестве взрывозащиты в стандарте [4] рассматриваются оболочки с кодом *IP* в зависимости от уровня взрывозащиты и подгруппы оборудования III (см. таблицу)

Из таблицы видно, что оборудование с защитой *IP* может использоваться для любого уровня взрывозащиты, а значит, и для любого класса зон (20, 21, 22). Необходимо учитывать, что степень защиты оболочек (*IP*) от внешних воздействий считается достаточной и выполняет функцию взрывобезопасности только при соблюдении дополнительных требований стандарта [4] к конструкции, максимальной температуре поверхности и внутреннему давлению, а также ограничений по току короткого замыкания и т. д. Поэтому оборудование с видом взрывозащиты *t* аналогично другим видам будет иметь маркировку взрывозащиты по ГОСТ 31610.0–2014 [5] с дополнительной маркировкой *IP*, которая в стандарте [4] называется основным способом защиты.

Из вышепредставленной информации следует, что оборудование с защитой *IP* запрещено применять во взрывоопасной зоне для любого электрооборудования без дополнительных способов взрывозащиты, которые должны быть указаны в маркировочной таблице.

Соответствие уровня взрывозащиты, группы электрооборудования и степени защиты оболочки от внешних воздействий

Уровень взрывозащиты	Вид взрывозащиты	Подгруппа Ex-оборудования		
		IIIC	IIIB	IIIA
Da	ta	IP6X	IP6X	IP6X
Db	tb	IP6X	IP6X	IP5X
Dc	tc	IP6X	IP5X	IP5X

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (в ред. от 29.07.2017) : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ; принят Гос. Думой 04.07.2008; одобр. Сов. Федерации 11.07.2008 // Собр. законодательства РФ. — 2008. — № 30 (ч. I), ст. 3579.
2. ТР ТС 012/2011. Технический регламент Таможенного союза. О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах (в ред. от 13.05.2014) : утв. решением Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 825; введ. 15.02.2013. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902307910> (дата обращения: 15.08.2017).
3. ГОСТ ИЕС 60034-5-2011. Машины электрические вращающиеся. Часть 5. Классификация степеней защиты, обеспечиваемых оболочками вращающихся электрических машин (Код IP). — Введ. 01.01.2013. — М. : Стандартинформ, 2013.

4. ГОСТ ИЕС 60079-31-2013. Взрывоопасные среды. Часть 31. Оборудование с защитой от воспламенения пыли оболочками “t”. — Введ. 01.12.2016. — М. : Стандартинформ, 2015.

5. ГОСТ 31610.0-2014 (ИЕС 60079-0:2011). Взрывоопасные среды. Часть 0. Оборудование. Общие требования. — Введ. 01.07.2015. — М. : Стандартинформ, 2014.

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



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

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал “ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ” статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т. п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены в редакцию в электронном виде по адресу info@fire-smi.ru.

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 неперебиваемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также неперебиваемый 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!

Владимир Николаевич ЧЕРКАСОВ

12.07.1923 – 01.08.2017

1 августа 2017 г. на 94-м году жизни скончался кандидат технических наук, профессор, академик НАНПБ **Владимир Николаевич ЧЕРКАСОВ**.

Владимир Николаевич родился 12 июля 1923 г. в селе Чухур-Юрд Шемахинского района Азербайджанской ССР. В 1941 г. был зачислен в Высшее военно-морское Ордена Ленина Краснознаменное училище им. Фрунзе в г. Ленинграде, а в сентябре–декабре принимал участие в обороне Ленинграда в составе истребительного батальона военно-морского пограничного училища НКВД СССР. Указом ПВС СССР от 22 декабря 1941 г. награжден медалью “За оборону Ленинграда”.

В октябре 1942 г. Владимиру Николаевичу было присвоено звание лейтенанта, после чего он был назначен командиром стрелкового взвода офицерского запасного полка 28-й армии. В ноябре Черкасов был направлен на Сталинградский фронт в 169-ю стрелковую дивизию 556-го стрелкового полка 64-й армии и назначен командиром автоматчиков.

В конце января 1943 г. Владимир Николаевич был тяжело ранен и оказался в госпитале в г. Сталинске Кемеровской области. После выздоровления он был отправлен в г. Баку и зачислен на факультет инженеров противопожарной обороны МВД СССР.

С 1948 по 1962 гг. Черкасов являлся преподавателем пожарной профилактики в Харьковском ПТУ МВД СССР, а далее — в Высшей школе МВД СССР (г. Москва).

В 1964 г. Владимир Николаевич защитил кандидатскую диссертацию по теме “Исследование некоторых вопросов молниезащиты взрывоопасных зданий и наружных взрывоопасных установок”.

Приступив после защиты диссертации к работе на кафедре техники безопасности и противопожарной техники ВИПТШ МВД СССР, он разработал научную основу новой дисциплины “Пожарная профилактика электроустановок”, подготовил программу дисциплины, написал учебник “Пожарная профилактика электроустановок”, подготовил задачник и лабораторный практикум, создал лабораторию.

С 1985 по 1988 гг. Владимир Николаевич являлся членом Советской части Технического комитета Международной электротехнической комиссии по разработке международного стандарта по молниезащите, а также членом межведомственной комис-



сии по переработке и улучшению правил устройства электроустановок.

В 2000 г. решением ВАК Владимир Николаевич утвержден в звании “профессор”. В 2003 г. В. Н. Черкасову присвоено звание академика Национальной академии наук пожарной безопасности (НАНПБ).

Владимир Николаевич является соавтором в изобретении устройства заземления автоцистерн (УЗА), которое в обязательном порядке применяется на всех АЗС России для защиты от накопления зарядов статического

электричества при сливе-наливе нефтепродуктов в железнодорожные и автоцистерны.

В. Н. Черкасовым написано и опубликовано более 80 научных и учебно-методических работ, в том числе 4 учебника, 1 монография, 22 учебных пособия, 1 справочное пособие, 33 статьи, 18 учебно-методических пособий по обеспечению пожарной безопасности электроустановок, защите от статического электричества и молниезащите.

Владимир Николаевич внес огромный вклад в совершенствование нормативной базы в области пожарной профилактики электроустановок и молниезащиты зданий и сооружений. За свою долгую жизнь он подготовил большое количество высококвалифицированных инженеров, специалистов и бакалавров по специальностям “пожарная и техносферная безопасность”. В. Н. Черкасов пользовался авторитетом и уважением у коллег и обучающихся. Он оставил яркий след в истории кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи Академии ГПС МЧС России.

Редакция журнала “Пожаровзрывобезопасность” часто обращалась к Владимиру Николаевичу с просьбой о рецензировании статей и всегда получала детальный анализ рукописей. Кроме того, В. Н. Черкасов являлся резидентом журнала и рубрики “Вопрос – Ответ” с 2012 г., которая будет публиковаться и далее.

Своим усердием, целеустремленностью, отзывчивостью и неиссякаемым оптимизмом Владимир Николаевич воспитал отличных преемников своего дела, которые высоко несут знамя знаний для будущих поколений.

Светлая память о Владимире Николаевиче ЧЕРКАСОВЕ навсегда сохранится в сердцах его коллег, друзей, учеников и всех, кто его знал.

ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПОЖНАУКА»

ПРЕДЛАГАЕТ ВАШЕМУ ВНИМАНИЮ

Г. И. Смелков, В. Н. Черкасов,
В. Н. Веревкин, В. А. Пехотилов, А. И. Рябиков

ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ

во взрывопожароопасных зонах

Справочное пособие

М.: ООО «Издательство «Пожнаука», 2012. – 222 с.



Приводятся новые, отвечающие современной нормативной базе, требования по классификации горючих смесей и пожаровзрывоопасных зон; рекомендации по выбору и использованию оборудования, включая кабельные изделия во взрывопожароопасных зонах.

Издание предназначено для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и монтажом электроустановок, работников пожарной охраны и специалистов широкого профиля в качестве учебного пособия для подготовки и повышения квалификации в области пожаровзрывобезопасности электроустановок.

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

**Начинается
подписка
на журнал**

2018

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 1-е полугодие 2018 г. (6 номеров) — 6840 руб.
- Стоимость годовой подписки (12 номеров) — 12960 руб.

ЭЛЕКТРОННАЯ ВЕРСИЯ:

- Стоимость подписки на 1-е полугодие 2018 г. (6 номеров) — 4920 руб.
- Стоимость годовой подписки (12 номеров) — 9360 руб.

ПОДПИСКА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ:

- через ООО “Издательство “Пожнаука”;
- ЧЕРЕЗ ПОДПИСНЫЕ АГЕНТСТВА:
- ООО “Урал-Пресс”, индекс 83647 (полугодовой), 70753 (годовой);
- ООО “Агенство “Книга Сервис”, индекс 83647 (полугодовой), 70753 (годовой);
- ЗАО “ПРЕССИНФОРМ”, индекс 83647 (полугодовой), 70753 (годовой)



ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет

Научно-
исследовательские
и сертификационные
испытания:

- ♦ железобетонных конструкций
- ♦ противопожарных преград
- ♦ легкобрасываемых конструкций
- ♦ фасадных систем
- ♦ палуб, переборок

Контакты:

Тел.: 8 (495) 109-05-58

e-mail: ikbs@mgsu.ru,

mail@ikbs-mgsu.com

www.ikbs-mgsu.com

Свидетельство о признании
Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21AM09 от 24.06.2014 г.
испытательной лаборатории РМРС № 16.00385.120 от 28.12.2016 г.