

10-2017

ПОЖ Издательство
НАУКА

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



ЧИСЛЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА
В ВАГОНЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

УЧРЕДИТЕЛЬ –

ООО "Издательство "ПОЖНАУКА"

Журнал издаётся 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 16.10.2017.

Выход в свет 25.10.2017.

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

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

ИВАНОВ А. В., БОЕВА А. А., ИВАХНЮК Г. К.,
ТЕРЕХИН С. Н., ПРОРОК В. Я.
Исследование эксплуатационных характеристик нано-
модифицированных огнезащитных вспучивающихся
композиций в условиях углеводородного пожара
на объектах транспортировки нефтепродуктов

5

IVANOV A. V., BOEVA A. A., IVAKHNYUK G. K.,
TEREKHIN S. N., PROROK V. Ya.
Research of operational characteristics of nanomodified
fire-resistant intumescent compositions
in the conditions of hydrocarbon fire
at oil transportation facilities

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

КАМЕНЕЦКАЯ Н. В., МЕДВЕДЕВА О. М.,
ХИТОВ С. Б., ГРОМОВ В. Н.
Математическое моделирование сравнительного
анализа двух тактических приемов по тушению
пожаров и проведению аварийно-спасательных работ
подразделениями МЧС России

20

KAMENETSKAYA N. V., MEDVEDEVA O. M.,
KHITOV S. B., GROMOV V. N.
Comparative analysis of two tactical procedures
of fire exercise and carrying out emergency
rescue operations by the fire divisions
of the MES of Russia

ДАНИЛОВ А. И., МАСЛАК В. А.,
ВАГИН А. В., СИВАКОВ И. А.
Численное моделирование пожара в вагоне
метрополитена

27

DANILOV A. I., MASLAK V. A.,
VAGIN A. V., SIVAKOV I. A.
Numerical simulation of a subway
car fire

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

КОМАРОВ А. А., КОРОЛЬЧЕНКО Д. А., ГРОМОВ Н. В.
Особенности гидродинамических расчетов
при проведении технической экспертизы
аварийного взрыва

36

KOMAROV A. A., KOROLCHENKO D. A., GROMOV N. V.
Features of the hydrodynamic calculations
for technical expertise of accidental
explosion

ФИЛИППОВ В. Н., ПОПОВ В. Г., БЕСПАЛКО С. В.,
ШЕБЕКО Ю. Н., НАВЦЕНЯ В. Ю.
Результаты комплексных исследований
пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки
сжиженных углеводородных газов

43

FILIPPOV V. N., POPOV V. G., BESPALKO S. V.,
SHEBEKO Yu. N., NAVTSENYA V. Yu.
Results of complex researches of fire and explosion
safety of railway tanks for transportation
of liquefied petroleum gases

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

АСТАПОВ П. Е., ФЕДОРОВ А. В., ЧЛЕНОВ А. Н.,
ЛОМАЕВ Е. Н., ИЩЕНКО А. Д.
Технологические и структурные решения по созданию
системы мониторинга взрывопожароопасности
объектов добычи и транспорта нефти

50

ASTAPOV P. E., FEDOROV A. V., CHLENOV A. N.,
LOMAEV E. N., ISHCENKO A. D.
Technological and structural solutions for the creation
of the monitoring system of explosive fire-proof objects
of oil production and transport

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY

ШЛЕНКОВ А. В., МАЛЫГИНА Е. А., МОСКАЛЕНКО Г. В.
Влияние негативных факторов профессиональной
деятельности на индивидуально-личностные
особенности пожарных и спасателей

61

SHLENKOV A. V., MALYGINA E. A., MOSKALENKO G. V.
Influence of negative occupational factors
on individual personal characteristics
of fire and rescuers

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

АЛЕШКОВ М. В., ГУСЕВ И. А.
Определение рабочих параметров установок
пожаротушения с возможностями гидроабразивной
резки, применяемых на объектах энергетики

69

ALESHKOV M. V., GUSEV I. A.
Determination of working parameters of the installations
of fire extinguishing with opportunities of hydroabrasive
cutting applied on power objects

ВОПРОС – ОТВЕТ

QUESTION – ANSWER

ХАРЛАМЕНКОВ А. С.
Особенности выбора взрывозащищенного
электрооборудования с видом взрывозащиты «р»
для пылевых сред

77

KHARLAMENKOV A. S.
Features choice of explosion-proof electrical
equipment with the type of protection «p»
for dust environments



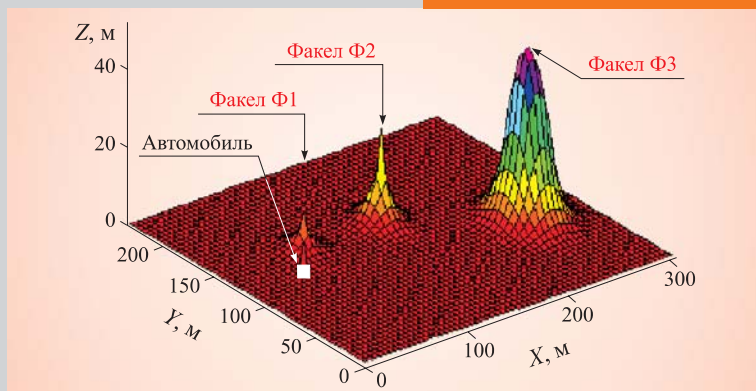
$t = 300 \text{ с, HRR} = 1,5 \text{ MBт}$



$t = 1400 \text{ с, HRR} = 12,3 \text{ MBт}$

Численное моделирование пожара в вагоне метрополитена

Стр. 27



Стр. 36

Гидродинамический расчет при экспертизе аварийного взрыва



Пожаровзрывобезопасность цистерн для перевозки СУГ

Стр. 43



Стр. 50

Системы мониторинга взрывопожароопасности объектов

Стр. 69



Установки пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки



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 16.10.2017.

Date of publication 25.10.2017.

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)

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. БОЕВА, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: silina.2015@mail.ru)

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

С. Н. ТЕРЕХИН, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: expert_terehin@inbox.ru)

В. Я. ПРОРОК, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: aist_ugps@mail.ru)

УДК 614.841.343:539.097

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ КОМПОЗИЦИЙ В УСЛОВИЯХ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПОЖАРА НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Представлены результаты исследований эксплуатационных характеристик огнезащитных вспучивающихся композиций (ОВК), модифицированных углеродным наноматериалом с многослойными углеродными нанотрубками (MWCNT) на лабораторной установке, моделирующей условия углеводородного горения. Показано, что модификация компонентов ОВК при депонировании MWCNT в сочетании с электрофизическим воздействием влечет за собой улучшение их технологических и эксплуатационных характеристик, в том числе снижение скорости роста температуры защищенного металла в условиях углеводородного горения, снижение коэффициента вспучивания и увеличение адгезионной прочности покрытия.

Ключевые слова: огнезащитное вспучивающееся покрытие; реагентная модификация; электрофизическая модификация; углеводородный пожар; переменный частотно-модулированный потенциал; транспортировка нефтепродуктов.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.5-19

Введение

Доставка нефтепродуктов потребителю осуществляется посредством морского, речного, железнодорожного, автомобильного и трубопроводного транспорта. Каждый вид транспорта используется исходя из экономической целесообразности и развития соответствующих коммуникаций. Наиболее распространенным оборудованием для всех видов транспорта нефтепродуктов являются резервуары, сливно-наливные эстакады, наносные станции и трубопроводы [1].

Объекты транспорта характеризуются повышенной опасностью вследствие наличия большого количества легковоспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих (ГЖ) жидкостей, значительной вероятностью

возникновения источников зажигания при различных операциях, в том числе сливе-наливке, перекачке нефтепродуктов. По данным [2] почти 50 % всех аварий на объектах с обращением нефтепродуктов приходится на технологические трубопроводы и насосно-компрессорное оборудование, причем свыше 30 % аварийных ситуаций возникает из-за неисправности таких элементов оборудования, как сальники, прокладки, фланцевые соединения и т. п. При наличии источников зажигания возможно возникновение факельного горения паров нефтепродуктов в элементах технологических аппаратов и трубопроводов, что может привести к деформации и обрушению металлоконструкций, подвергшихся высокотемпературному (до 1200 °С) и эрозионному воздействию.

© Иванов А. В., Боева А. А., Ивахнюк Г. К., Терехин С. Н., Пророк В. Я., 2017

Одним из способов обеспечения требуемой огнестойкости металлоконструкций является применение огнезащитных вспучивающихся композиций (ОВК). Эффективность ОВК зависит от их способности переходить во вспученное состояние, что позволяет значительно снизить их теплопроводность. Критическими эксплуатационными характеристиками огнезащитных составов являются кратность вспучивания, устойчивость к эрозии, температура активации, изменение массы при потере влаги и др. [3].

Модификация полимеров различными наноструктурами, в том числе составляющими лакокрасочных составов, позволяет улучшить их эксплуатационные характеристики для решения задач различного спектра. Вместе с тем задача выбора способа модификации веществ осложняется наличием большого спектра наночастиц и условий их использования, что не всегда дает возможность выбрать оптимальную технологию получения наноматериала в узком спектре необходимых характеристик. Решение данной проблемы возможно с помощью методов моделирования и прогнозирования свойств и характеристик наноматериалов. В настоящей работе представлены результаты исследования эксплуатационных характеристик наномодифицированных ОВК в условиях углеводородного горения для создания технологий производства и применения огнезащитных составов на основе углеродсодержащих нанокомпозитов при обеспечении тепловой защиты металлоконструкций объектов транспортировки нефтепродуктов [4].

Постановка задачи исследования

Основным условием образования вспененной карбонизованной массы при температуре порядка 360...430 °С является наличие компонентов, ответственных за образование вспененного углеродного каркаса. К ним относятся пенообразователи, пленкообразователи, пигментные наполнители и другие вещества [5, 6].

Моделирование физико-химических процессов разложения ОВК представляет собой сложную задачу с учетом детального механизма реакций, происходящих в условиях термического воздействия. Разработанные модели позволяют учитывать поглощение тепловой энергии и фильтрацию при пиролизе компонентов покрытий, конденсацию влаги, вспучивание и усадку прогретого слоя, химический и механический унос массы обугленного слоя [7].

Вспучивающиеся огнезащитные покрытия, применяемые для стальных конструкций, характеризуются своей теплоизолирующей способностью, основной характеристикой которых является коэффициент температуропроводности α , определяемый выражением

$$\alpha = \lambda_t / (c_t \rho_0), \quad (1)$$

где λ_t — теплопроводность;

c_t — теплоемкость;

ρ_0 — плотность [8].

Важной характеристикой огнезащитного состава является коэффициент вспучивания $k_{вс}$. Большая толщина вспученного покрытия позволяет уменьшить теплопроводность материала [3].

Коэффициент вспучивания определяется по формуле

$$k_{вс} = h_{всп} / h_0, \quad (2)$$

где $h_{всп}$ — толщина вспученного покрытия;

h_0 — начальная толщина.

Адгезия огнезащитных покрытий является одним из важнейших показателей, влияющих на огнезащитную эффективность вспучивающихся покрытий в условиях термического и эрозионного воздействия пламени. В качестве основного агента адгезионного взаимодействия используется полимерное связующее, которое в условиях высоких температур разрушается, в результате чего происходит отслаивание пенококса и быстрый разогрев металлоконструкций [9].

Потеря массы ОВК ΔM при нагревании оказывает непосредственное влияние на огнезащитную способность покрытия. Плотность покрытия в условиях теплового воздействия может быть определена по формуле

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{1 - \Delta M / M_0}{1 + (h_{всп} - h_0) / h_0}, \quad (3)$$

где M_0 — начальная масса огнезащитного покрытия [10].

В работе [11] приведены результаты испытаний огнезащитных покрытий в условиях углеводородного горения. Показано, что при реактивном воздействии пламени заявленные пределы огнестойкости металлоконструкций, защищенных исследуемыми ОВК, существенно снижаются за счет увеличения скорости термической деструкции полимерных покрытий.

Модификация полимеров и лакокрасочных покрытий наноструктурами позволяет получать материалы с улучшенными технологическими, адгезионными и физико-механическими характеристиками [12]. Сведения о результатах модификации некоторых видов полимеров и лакокрасочных материалов приведены в табл. 1.

Задача настоящего исследования заключается в определении оптимальных концентраций и условий модификации ОВК путем депонирования наноматериалов с MWCNT в базовый состав для обеспечения огнезащиты металлических конструкций объектов транспортировки нефтепродуктов в условиях

Таблица 1. Свойства полимеров, модифицированных углеродными наночастицами**Table 1.** Properties of polymers modified with carbon nanoparticles

Источник Source	Вид наночастиц + базовый материал Type of nanoparticles + base material	Концентрация наночастиц, % масс. Concentration of nanoparticles, % by mass	Наблюдаемый эффект The observed effect
[13]	MWCNT + эпоксидная смола E51 MWCNT + epoxy resin E51	0,01...0,5	Повышение температуры разложения с 361 до 387 °С; повышение предела прочности с 58,5 до 128,94 МПа; снижение температуры стеклования с 76 до 69 °С Increasing the decomposition temperature from 361 to 387 °C; increase in the tensile strength from 58.5 to 128.94 MPa; reduction of the glass transition temperature from 76 to 69 °C
[14]	DWCNT + эпоксидная смола SC-15 DWCNT + epoxy resin SC-15	0,05...1	Увеличение трещиностойкости с 0,65 до 0,8 МПа; уменьшение коэффициента теплового расширения на 40...70 %; повышение температуры стеклования с 85 до 105 °С; увеличение значения деформации разрушения на 50 % Increased crack resistance from 0.65 to 0.8 MPa; decrease in the coefficient of thermal expansion by 40...70 %; increase in the glass transition temperature from 85 to 105 °C; an improvement in the value of the fracture deformation by 50 %
[15]	MWCNT + полиметилакрилат (ПММА) MWCNT + polymethyl acrylate (PMMA)	4...26	Термическая деградация ПММА при 350...450 °С (без MWCNT при 320...450 °С) Thermal degradation of PMMA at 350...450 °C (without MWCNT at 320...450 °C)
[12]	УНТ* марки “Суспензия” + грунт алкидный “Agrohel” MWCNT brand “Suspension” + primer alkyd “Agrohel”	0,025...0,3	Увеличение адгезии на 53 %; увеличение ударной прочности в 2,5 раза; повышение прочности покрытия в 2,5 раза Increased adhesion by 53 %; increase the impact resistance in 2.5 times; increase of coating strength in 2.5 times
[12]	УНТ марки “Суспензия” + грунт алкидный ГФ-0119 MWCNT grade “Suspension” + primer alkyd GF-0119	0,025...0,3	Увеличение адгезии в 2...5 раз; ускорение формирования покрытия в 1,5 раза Increase adhesion in 2...5 times; acceleration of the formation of the coating in 1.5 times
[16]	MWCNT + эпоксидные связующие MWCNT + epoxy binders	1	Увеличение прочности при изгибе на 100 %; увеличение модуля упругости при растяжении на 24,6 %; уменьшение температуры стеклования со 170 до 159 °С Increase in bending strength by 100 %; an increase in the tensile modulus by 24.6 %; decrease in the glass transition temperature from 170 to 159 °C
[17]	MWCNT + жидкое натриевое стекло MWCNT + liquid sodium glass	0,01	Увеличение коэффициента вспучивания в 2,5...3,0 раза в сравнении с базовым материалом The increase in the coefficient of swelling in 2.5...3.0 times in comparison with the base material

* УНТ — углеродные нанотрубки.

факельного горения при непосредственном контакте пламени с поверхностью металла.

Материалы для исследований

В качестве объектов исследования были выбраны углеродные наноматериалы, содержащие MWCNT, которые были получены методом каталитического пиролиза на установке “CVDomna” [18]. Функционализация MWCNT проводилась в процессе отжи-

га в муфельной печи при температуре 250...300 °С. Функционализированные MWCNT представляют собой цилиндрические и шаровидные структуры ($d = 30$ нм, $l = 2...5$ мкм) (рис. 1) [19].

Основой для модифицированных ОВК являлась огнезащитная вспучивающаяся краска для стальных конструкций “Термобарьер” (по ТУ 2313-001-30642285–2011). Модификация огнезащитного состава проводилась путем депонирования MWCNT

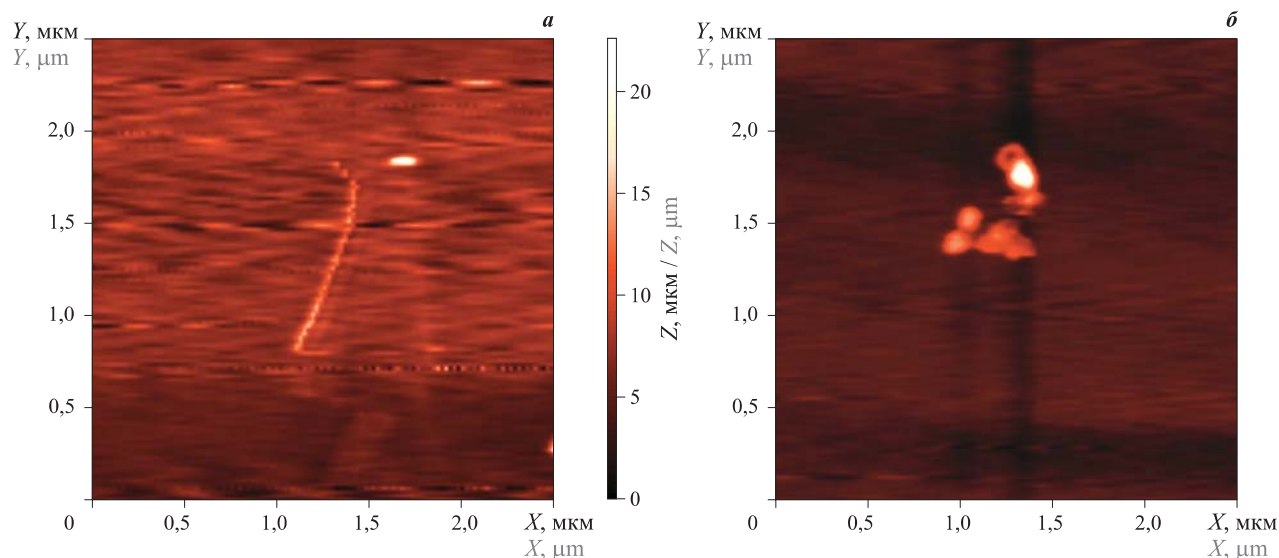


Рис. 1. Сканы ACM MWCNT на слюдяной подложке: *а* — цилиндрические УНТ; *б* — шаровидные наноструктуры
Fig. 1. The MWCNT ASM scans on a mica substrate: *a* — a cylindrical CNTs; *b* — globular nanostructures

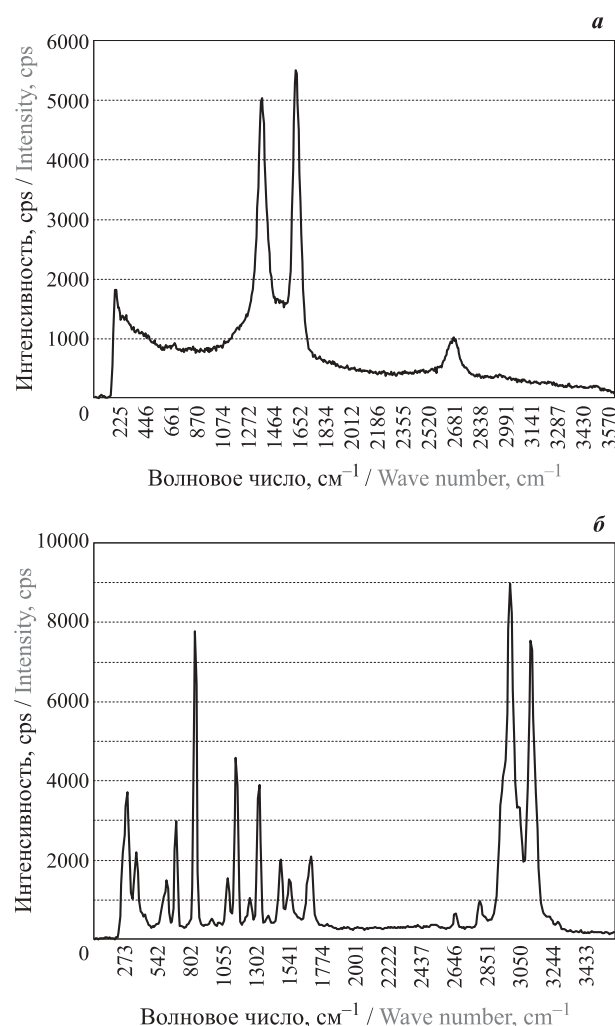


Рис. 2. Рамановский спектр MWCNT: *а* — исходный материал; *б* — в растворителе (о-ксилол), лазер 532 нм, экспозиция 5 с
Fig. 2. Raman spectrum of MWCNT: *a* — original material; *b* — in a solvent (o-xylene), laser 532 nm, exposure 5 s

в растворитель (о-ксилол) с дальнейшим перемешиванием в наполнителе в концентрации 0,1...1,25 % об.

Рамановский спектр MWCNT в растворителе представлен на рис. 2. Характерными для MWCNT являются пики в интервале 1200...1400 см^{-1} . Наблюдение данных пиков в рамановском спектре растворителя свидетельствует о наличии наноматериалов с MWCNT в приповерхностном слое жидкости.

В ходе экспериментов отдельные компоненты ОВК подвергались электрофизическому воздействию [20] с параметрами переменного частотно-модулированного потенциала (ПЧМП) 56 В, 50 Гц. В табл. 2 представлены образцы ОВК, участвующие в исследованиях.

Исследование огнезащитной эффективности наномодифицированных огнезащитных вспучивающихся покрытий

Исследование огнезащитной эффективности наномодифицированных ОВК проводили на лабораторной установке, моделирующей условия углеводородного горения (рис. 3) [21]. Образец пластины из углеродистой стали марки Ст. 5 толщиной 2 мм (ГОСТ 380–2005) помещали в испытательную камеру. Высокотемпературный газовый поток (температура около 1200 °С, давление 0,1 МПа) создавали с помощью пропан-бутановой горелки с массовым расходом горючего газа 50...60 г/ч. Температуру газового потока и тыльной стороны пластины контролировали двумя термопарами. Время обогрева пластины составляло 25 мин. За предельное состояние принимали достижение температуры металлической пластины 500 °С (по ГОСТ Р 53295–2009). Для каждого образца проводили не менее трех испытаний.

Практически для всех образцов модифицированных ОВК, содержащих MWCNT, наблюдается более

Таблица 2. Перечень образцов, участвующих в исследовании

Table 2. The list of samples involved in the study

№ п/п No.	Образец ОБК Sample OVK	Концентрация MWCNT, % об. Concentration of MWCNT, % by vol.		ПЧМП VFMP
		в грунте ГФ-021 in the primer GF-021	в огнезащитном составе in fire-resistant composition	
1	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0 % by vol.	0	0	–
2	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,1 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.1 % by vol.	0	0,10	–
3	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,5 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.5 % by vol.	0	0,50	–
4	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,75 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.75 % by vol.	0	0,75	–
5	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 1 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 1 % by vol.	0	1,00	–
6	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 1,25 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 1.25 % by vol.	0	1,25	–
7	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0 % by vol.	1,00	0	–
8	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,1 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.1 % by vol.	1,00	0,10	–
9	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,5 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.5 % by vol.	1,00	0,50	–
10	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,75 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.75 % by vol.	1,00	0,75	–
11	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 1 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 1 % by vol.	1,00	1,00	–
12	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 1,25 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 1.25 % by vol.	1,00	1,25	–
13	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0 % by vol. VFMP	0	0	+
14	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,1 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.1 % by vol. VFMP	0	0,10	+
15	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,5 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.5 % by vol. VFMP	0	0,50	+
16	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,75 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.75 % by vol. VFMP	0	0,75	+
17	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 1 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 1 % by vol. VFMP	0	1,00	+
18	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 1,25 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 1.25 % by vol. VFMP	0	1,25	+
19	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0 % by vol. VFMP	1,00	0	+
20	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,1 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.1 % by vol. VFMP	1,00	0,10	+
21	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,5 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.5 % by vol. VFMP	1,00	0,50	+
22	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,75 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.75 % by vol. VFMP	1,00	0,75	+
23	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 1 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 1 % by vol. VFMP	1,00	1,00	+
24	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 1,25 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 1.25 % by vol. VFMP	1,00	1,25	+

медленный (на 10...55 %) рост температуры объекта защиты в течение времени наблюдения в сравнении с немодифицированным покрытием ОВК (рис. 4).

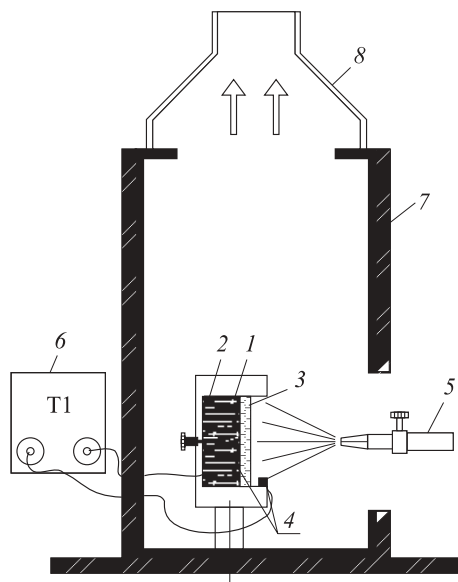


Рис. 3. Схема лабораторной установки для испытаний огнезащитных покрытий в условиях углеводородного горения: 1 — стальная пластина; 2 — теплоизоляция; 3 — огнезащитное покрытие; 4, 5 — термопары; 6 — регистратор температуры; 7 — корпус испытательной камеры; 8 — вытяжной зонт

Fig. 3. The scheme of laboratory setup for testing of fire protective coatings in hydrocarbon combustion: 1 — steel plate; 2 — thermal insulation; 3 — fire retardant coating; 4, 5 — thermocouples; 6 — temperature recorder; 7 — the body of the test chamber; 8 — exhaust hood

Наилучшие результаты (достижение максимальной температуры образца не выше 300 °С в течение 25 мин прямого воздействия горячей струи углеводородного газа) получены для образцов ОВК:

- с немодифицированным грунтом и огнезащитной краской (при воздействии ПЧМП);
- с немодифицированным грунтом, с содержанием MWCNT в огнезащитной краске 0,5 и 1,0 % об. (при воздействии ПЧМП);
- с модифицированным грунтом (содержание MWCNT 1,0 % об.), с содержанием MWCNT в огнезащитной краске 1,25 % об. (при воздействии ПЧМП).

Для образцов ОВК с грунтом ГФ-021 без MWCNT скорость роста температуры металла в основном обратно пропорциональна концентрации MWCNT в огнезащитном составе как без электрофизического воздействия, так и при воздействии ПЧМП (рис. 5,а и 6,а). Для образцов ОВК с грунтом ГФ-021 с MWCNT в концентрации 1,0 % об. скорость роста температуры металла не имеет четкой зависимости от концентрации MWCNT в огнезащитном составе (рис. 5,б и 6,б).

Вместе с тем следует отметить, что для всех образцов ОВК скорость роста температуры увеличивается при достижении металлом 350...450 °С, что может быть объяснено разрушением слоя пенококса в зоне пламенного воздействия и дальнейшим окислением углерода в интумесцентном слое.

На рис. 7 представлены фотографии образцов ОВК после испытаний на лабораторной установке

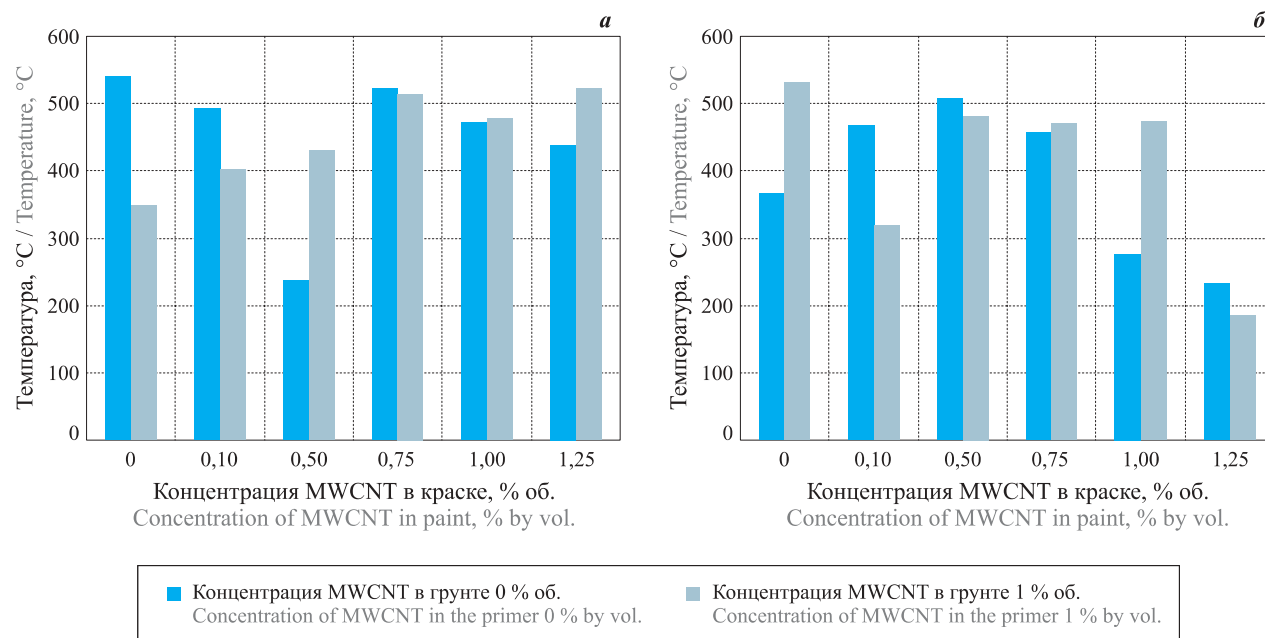


Рис. 4. Максимальная температура металла в зависимости от концентрации MWCNT в огнезащитном покрытии: а — без электрофизического воздействия; б — при воздействии ПЧМП

Fig. 4. The maximum temperature of the metal depending on the concentration of MWCNT in flame-retardant coating: а — without electrical effects; б — by influence of VFMP

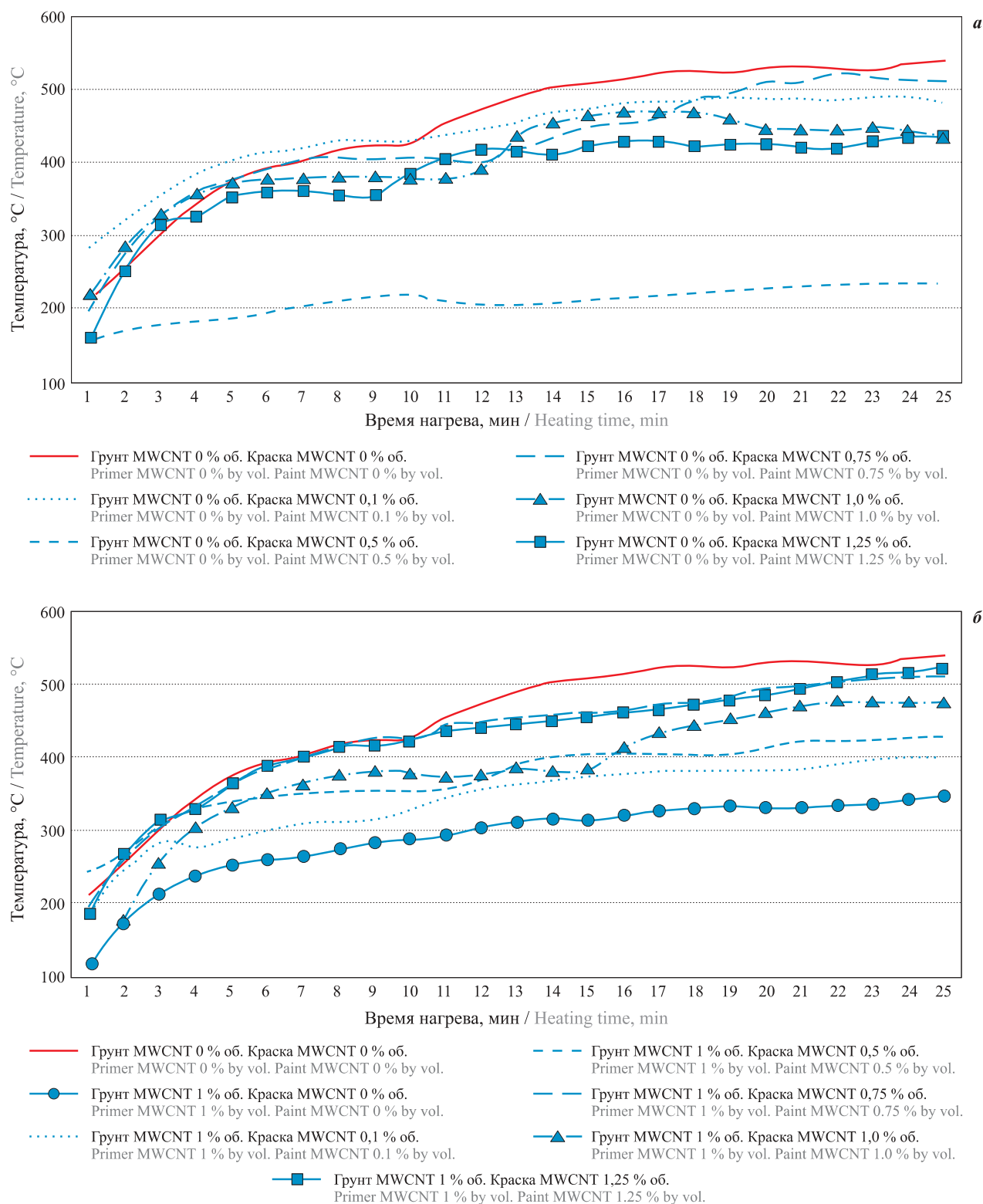


Рис. 5. Результаты лабораторных теплофизических испытаний огнезащитных покрытий, полученных без электрофизического воздействия: *а* — при отсутствии MWCNT в грунте ГФ-021; *б* — при концентрации MWCNT в грунте ГФ-021 1,0 % об.
Fig. 5. The results of lab thermal testing of fire resistant coatings obtained without the electro-physical effects: *a* — in the absence of MWCNT in the primer GF-021; *b* — when the concentration of MWCNT in the primer GF-021 1.0 % by vol.

в течение 25 мин. Для немодифицированного покрытия (см. рис. 7,а) наблюдается значительное уменьшение толщины слоя пенококса в зоне непосредственного контакта с пламенем горелки, в то время

как модифицированные покрытия (см. рис. 7,б и 7,в) преимущественно сохранили вспучившийся защитный слой, что может быть объяснено более низкой скоростью термической деструкции ОБК вследствие

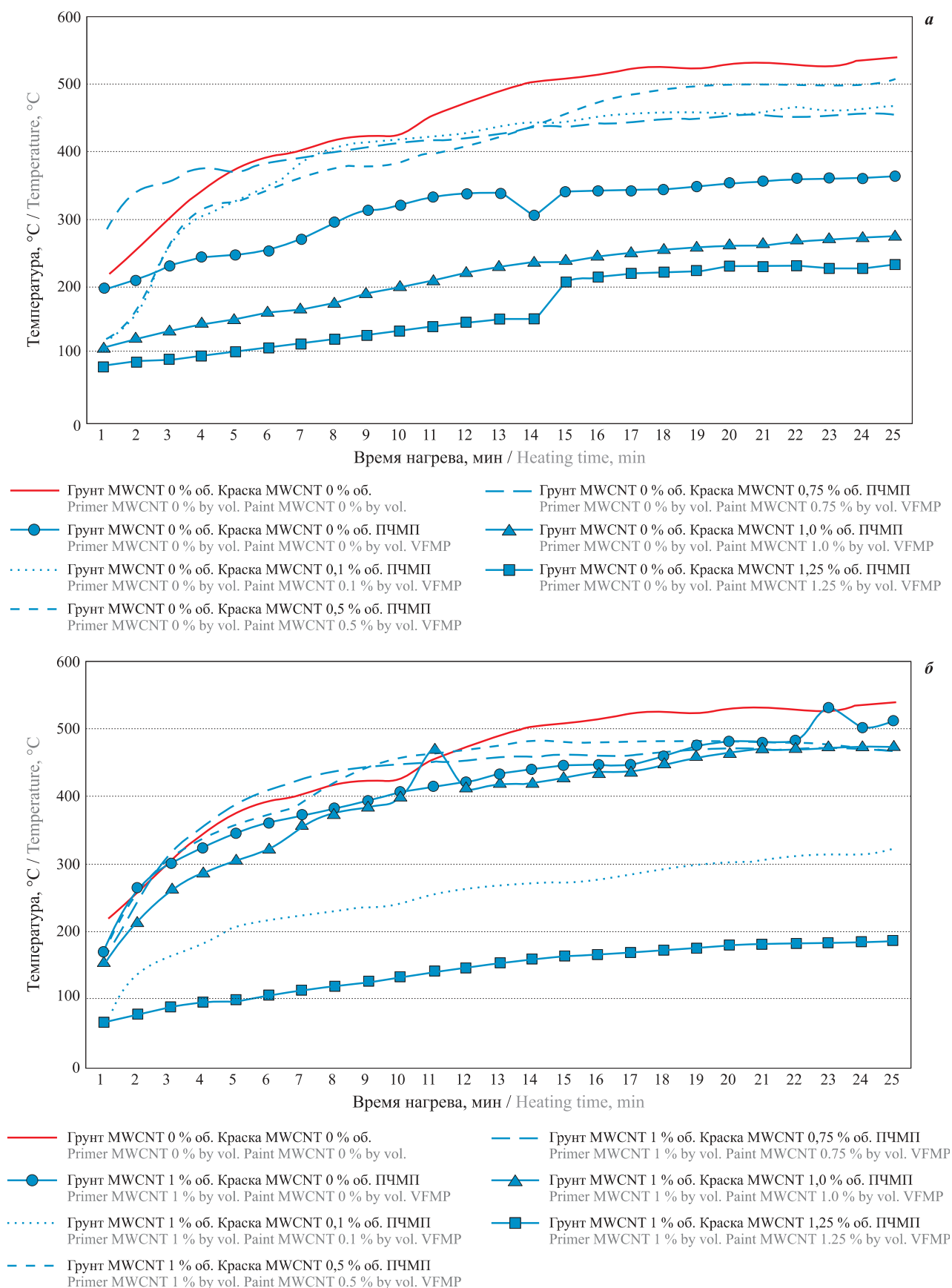


Рис. 6. Результаты лабораторных теплофизических испытаний огнезащитных покрытий, полученных в условиях воздействия ПЧМП: *а* — при отсутствии MWCNT в грунте ГФ-021; *б* — при концентрации MWCNT в грунте ГФ-021 1,0 % об.

Fig. 6. The results of lab thermal testing of fire resistant coatings obtained in the conditions of influence VFMP: *a* — in the absence of MWCNT in the primer GF-021; *b* — when the concentration of MWCNT in the primer GF-021 1.0 % by vol.

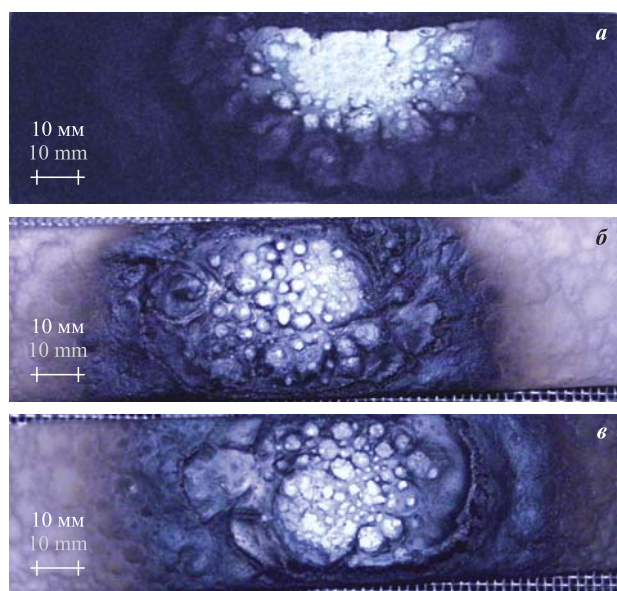


Рис. 7. Образцы с интумесцентным покрытием после огневых испытаний: *a* — немодифицированное покрытие; *b* — модифицированное покрытие (MWCNT); *v* — модифицированное покрытие (MWCNT), полученное при электрофизическом воздействии

Fig. 7. The samples with intumescent coating after fire tests: *a* — unmodified coating; *b* — modified coating (MWCNT); *v* — modified coating (MWCNT) obtained by electrophysical exposure

большей стойкости пенококса в условиях высокотемпературного воздействия. Следует также отметить, что для модифицированных ОБК отслаивание пенококса наблюдается в значительно меньшей степени в сравнении с контрольными образцами, что, очевидно, обуславливается более медленной потерей адгезионной прочности покрытия при высокотемпературном воздействии.

Сведения о коэффициенте вспучивания исследуемых модифицированных ОБК приведены на рис. 8. Внедрение в базовый огнезащитный состав MWCNT в целом приводит к снижению коэффициента вспучивания, что, безусловно, негативно влияет на общую эффективность модифицированных ОБК. Вместе с тем для ряда образцов ОБК без MWCNT в грунте наблюдается рост коэффициента вспучивания для концентраций MWCNT в огнезащитном составе 0,5...0,75 % об.

Исследование адгезионной прочности наномодифицированных огнезащитных вспучивающихся покрытий

Исследование адгезии модифицированных вспучивающихся огнезащитных составов проводилось методом отрыва по ГОСТ 32299–2013. Метод отрыва позволяет определить количественные показатели адгезионной прочности и основан на определении усилия отрыва предварительно приклеенных к поверхности покрытия образцов стандартного раз-

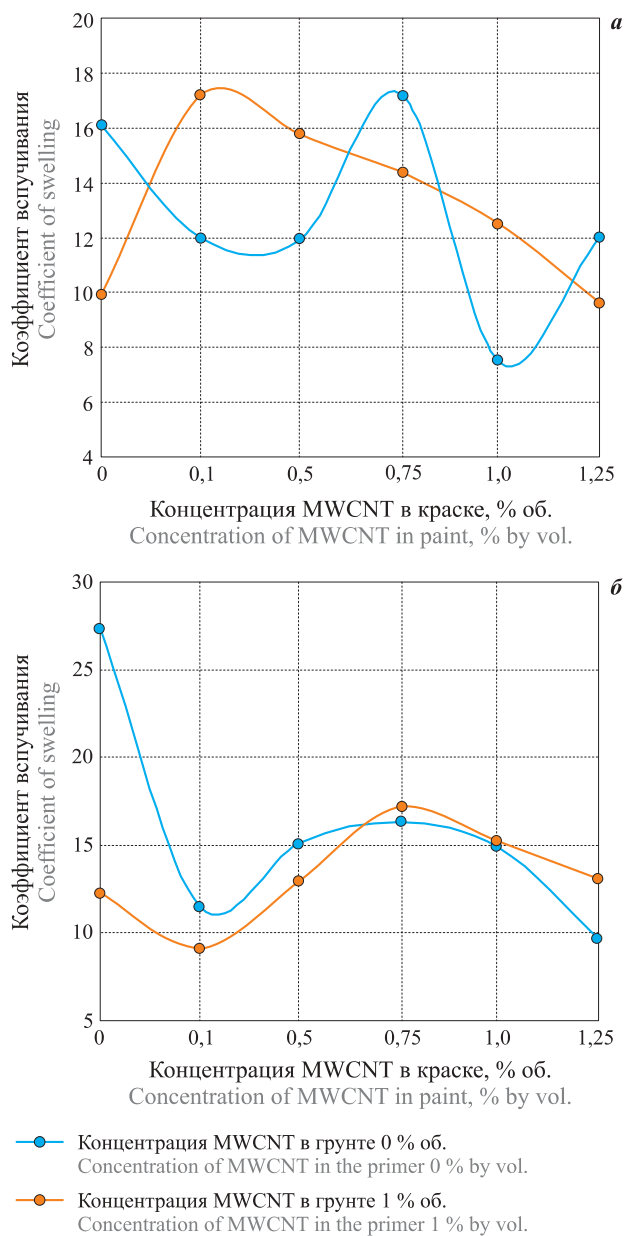


Рис. 8. Зависимость коэффициента вспучивания огнезащитных покрытий от концентрации MWCNT: *a* — без электрофизического воздействия; *б* — при воздействии ПЧМП

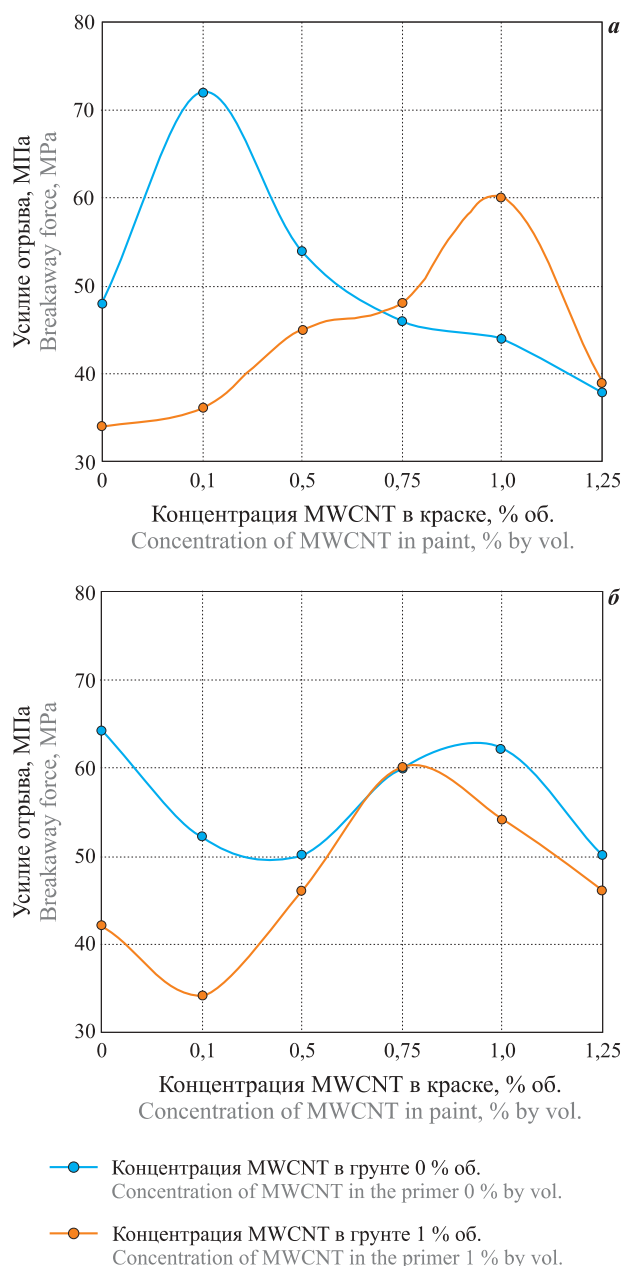
Fig. 8. The dependence of the coefficient of swelling fire protective coatings on the concentration of MWCNT: *a* — without electrical effects; *b* — by influence of VFMP

мера (“грибков”). После высыхания клея образцы отрывали от пластины с помощью специального приспособления, позволяющего определить усилие отрыва. Исходя из величины усилия отрыва и площади образца, определяли адгезионную прочность на отрыв. При обработке результатов учитывали как значение адгезионной прочности, так и характер разрушений, который может быть адгезионным (полный отрыв от металла или от слоя грунта), когезионным (разрыв по слою огнезащитного покрытия), отрыв по клеевому слою, и когезионно-адгезионным (смешанным) (табл. 3, рис. 9) [9].

Таблица 3. Результаты исследования характеристик исходных покрытий ОБК (адгезии методом нормального отрыва)**Table 3.** The results of the study of the characteristics of the original coating intumescent fire retardant paint (adhesion by means of normal separation)

№ п/п No.	Концентрация MWCNT, % об. Concentration of MWCNT, % by vol.		Наличие ПЧМП Availability VFMP	Адгезия, кг/см ² Adhesion, kg/cm ²	Характер отрыва Breakaway character
	в грунте ГФ-021 in the primer GF-021	в огнезащитном составе in fire retardant composition			
1	0	0	—	48	Коге- зи- онный Cohesive
2	0	0,10	—	72	
3	0	0,50	—	54	
4	0	0,75	—	46	
5	0	1,00	—	44	
6	0	1,25	—	38	
7	1,00	0	—	34	Смешан- ный Mixed
8	1,00	0,10	—	36	
9	1,00	0,50	—	45	
10	1,00	0,75	—	48	
11	1,00	1,00	—	60	Коге- зи- онный Cohesive
12	1,00	1,25	—	39	
13	0	0	+	64	
14	0	0,10	+	52	Смешан- ный Mixed
15	0	0,50	+	50	
16	0	0,75	+	60	Коге- зи- онный Cohesive
17	0	1,00	+	62	
18	0	1,25	+	50	
19	1,00	0	+	42	
20	1,00	0,10	+	34	Смешан- ный Mixed
21	1,00	0,50	+	46	
22	1,00	0,75	+	60	
23	1,00	1,00	+	54	
24	1,00	1,25	+	46	Коге- зи- онный Cohesive

В результате испытаний установлено, что депонирование MWCNT в грунт ГФ-021, как правило, уменьшает адгезионную прочность ОБК на 10...20 % при концентрации MWCNT в огнезащитном составе от

**Рис. 9.** Результаты исследования характеристик огнезащитных покрытий (адгезии методом отрыва), модифицированных MWCNT: а — без электрофизического воздействия; б — полученных при воздействии ПЧМП**Fig. 9.** The results of research of characteristics of fire-retardant coatings (adhesion method of separation), modified MWCNT: а — without electrical effects; б — by influence of VFMP

0 до 0,5 % об. При дальнейшем увеличении концентрации MWCNT в огнезащитном составе до 1,25 % об. адгезионная прочность ОБК с MWCNT, депонированными в грунт ГФ-021, оказывается несколько выше в сравнении с ОБК с немодифицированным грунтом и исходным образцом.

Для образцов ОБК, полученных при воздействии ПЧМП, наблюдается существенное (до 40 %) увеличение адгезионной прочности для покрытий с немодифицированным грунтом ГФ-021.

Влияние условий модификации на эксплуатационные характеристики огнезащитных вспучивающихся покрытий

ОВК, подверженные термическому воздействию при пожаре, обладают сложным составом исходных, промежуточных компонентов и конечных продуктов деструкции, пространственным распределением температуры, концентраций различных веществ в конденсированной и газовой фазах. Условия углеводородного пожара выдвигают более высокие требования к огнезащитной эффективности ОВК. Использование в технологии получения лакокрасочного покрытия наноматериалов с MWCNT, в том числе при электрофизическом воздействии, позволяет улучшить эксплуатационные характеристики ОВК на технологических стадиях подготовки, формирования, эксплуатации и огнезащитного действия.

Реагентная модификация (депонирование наноматериала с MWCNT) дает возможность изменять адгезионные и когезионные характеристики лакокрасочного материала (ЛКМ) в процессе формирования слоя ОВК [12, 22]. При электрофизическом воздействии наблюдается изменение давления насыщенного пара и поверхностного натяжения компонентов растворителя и, как следствие, переориентация углеродных наночастиц в структуре полимеров, снижение агрегации наночастиц в окрашиваемом слое. Уменьшение размера капель ЛКМ обеспечивает более равномерное распределение состава на окрашиваемой поверхности. Это позволяет улучшить прочностные характеристики слоя ОВК и обеспечить их достаточную адгезию при реактивном воздействии пламени [22].

По мнению авторов настоящей статьи, коэффициент вспучивания интумесцентных покрытий не может быть рассмотрен как решающий фактор повышения огнезащитной эффективности при данных условиях. Повышение стабильности пенококса, предположительно, связано с увеличением индукционного периода разложения составляющих модифицированной ОВК, при этом начало деструкции элементов композиции смещается в область более высоких температур [9, 13, 15].

Увеличение температуры разложения полимеров в слое ОВК, модифицированных наноматериалом с MWCNT, повышение адгезионной прочности

вспененного карбонизата, а также снижение горючести позволяют улучшить эксплуатационные характеристики огнезащитного покрытия [9]. При воздействии ПЧМП возможно изменение теплопроводности в слое ОВК за счет переориентации MWCNT в структуре *полимер – наноматериал* [19].

Выводы

1. Модификация компонентов ОВК путем депонирования MWCNT в сочетании с электрофизическим воздействием влечет за собой улучшение их технологических и эксплуатационных характеристик, в том числе снижение скорости роста температуры защищенного металла в условиях углеводородного горения, разностороннее изменение коэффициента вспучивания и увеличение адгезионной прочности покрытия.

2. Огнезащитное действие модифицированных ОВК, помимо известных механизмов действия применяющихся в настоящее время вспучивающихся огнезащитных покрытий, основано на увеличении термической стойкости и адгезионной прочности покрытий, а также возможности безреагентного управления упорядоченностью наноструктур для достижения требуемых параметров теплопроводности.

3. Оптимизация рецептуры и технологии нанесения модифицированных ОВК позволяет успешно применять их для защиты металлоконструкций установок на объектах транспортировки нефтепродуктов, характеризующихся высоким риском возникновения углеводородного пожара.

4. Область применения модифицированных ОВК должна определяться при проведении соответствующих сертификационных испытаний как при стандартном температурном режиме (по ГОСТ 30247.0–94), так и при альтернативных температурных режимах (по ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014). Вместе с тем полученные результаты позволяют говорить о возможности повышения эффективности огнезащитных покрытий за счет внедрения технологии электрофизической и реагентной модификации в процессы получения и формирования ОВК для решения задач обеспечения тепловой защиты объектов транспортировки нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коннова Г. В. Оборудование транспорта и хранения нефти и газа : учеб. пособие для вузов. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2006. — 128 с.
2. Абдрахманов Н. Х. Научно-методические основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов нефтегазового комплекса на основе управления системными рисками : дис. ... д-ра техн. наук. — Уфа, 2014. — 292 с.

3. Еремина Т. Ю. Моделирование и оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2003. — Т. 12, № 5. — С. 22–29.
4. Иванов С. А., Уколов Д. С., Нурутдинов Г. Н., Таров В. П., Баронин Г. С. Исследование структурно-механических свойств твердофазных углеродсодержащих ПЭВП-нанокмпозитов и прогнозирование результатов с помощью нейросетевых технологий // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. — 2013. — Т. 18, № 5. — С. 2366–2368.
5. Крупкин В. Г., Мохин Г. Н., Халтуринский Н. А. Моделирование образования многослойной структуры огнезащитными вспучивающимися составами при воздействии пожара // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 8(145). — С. 202–206.
6. Халтуринский Н. А., Крупкин В. Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2011. — Т. 20, № 10. — С. 33–36.
7. Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Кузнецов Г. В., Рудзинский В. П. Тепломассообмен в тепло- и огнезащите с учетом процессов термического разложения, испарения-конденсации, уноса массы и вспучивания-усадки // Математическое моделирование. — 2000. — Т. 12, № 5. — С. 107–113.
8. Голованов В. И. Прогнозирование огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2008. — 337 с.
9. Зыбина О. А. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов : дис. ... д-ра техн. наук. — СПб., 2015. — 260 с.
10. Пищулин В. П., Сваровский А. Я., Кузьменко В. П. Термическая деструкция и огнестойкость огнезащитных покрытий для объектов энергетики и химической промышленности // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 315, № 2. — С. 151–154.
11. Цой А. А., Демехин Ф. В. Испытание огнезащитных материалов в условиях углеводородного температурного режима // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2015. — № 4. — С. 20–24.
12. Николайчик А. В., Прокопчук Н. Р., Шпигель Т. А., Николайчик И. В. Новые грунтовочные лакокрасочные материалы, содержащие углеродные нанотрубки // Труды БГТУ. Серия 4: Химия, технология органических веществ и биотехнология. — 2010. — Т. 1, № 4. — С. 139–142.
13. Shen J., Huang W., Wu L., Hu Y., Ye M. The reinforcement role of different amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes in epoxy nanocomposites // Composites Science and Technology. — 2007. — Vol. 67, No. 15-16. — P. 3041–3050. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.04.025.
14. Ganguli S., Aglan H., Dennig P., Irvin G. Effect of loading and surface modification of MWCNTs on the fracture behavior of epoxy nanocomposites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. — 2006. — Vol. 25, No. 2. — P. 175–188. DOI: 10.1177/0731684405056425.
15. Jin Z., Pramoda K. P., Xu G., Goh S. H. Dynamic mechanical behavior of melt-processed multi-walled carbon nanotube/poly(methyl methacrylate) composites // Chemical Physics Letters. — 2001. — Vol. 337, No. 1-3. — P. 43–47. DOI: 10.1016/S0009-2614(01)00186-5.
16. Кондрашов С. В., Дьячкова Т. П., Богатов В. А., Мансурова И. А., Мараховский П. С., Мокрецова И. А., Фокин А. С. Использование углеродных нанотрубок для увеличения теплостойкости эпоксидных связующих // Перспективные материалы. — 2013. — № 2. — С. 17–23.
17. Яковлев Г. И., Михалкина Т. М., Багимов А. М., Евсягина А. В. Модификация огнезащитного силикатного покрытия углеродными нанотрубками // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2012. — № 8(163). — С. 44–45.
18. 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.
19. 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.
20. 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., Клячков В. А., Шевченко А. О., Князев А. С., Ивахнюк Г. К., 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: 10.08.2017).

21. Андрюшкин А. Ю., Цой А. А. О методике определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2016. — № 2. — С. 45–53.
22. Яковлев А. Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий : учебное пособие для вузов. — 4-е изд., испр. — СПб. : Химиздат, 2010. — 448 с.
23. Цой А. А. Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2017. — 134 с.

Материал поступил в редакцию 24 мая 2017 г.

Для цитирования: Иванов А. В., Боева А. А., Ивахнюк Г. К., Терехин С. Н., Пророк В. Я. Исследование эксплуатационных характеристик наномодифицированных огнезащитных вспучивающихся композиций в условиях углеводородного пожара на объектах транспортировки нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 5–19. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.5-19.

English

RESEARCH OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF NANOMODIFIED FIRE-RESISTANT INTUMESCENT COMPOSITIONS IN THE CONDITIONS OF HYDROCARBON FIRE AT OIL TRANSPORTATION FACILITIES

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

BOEVA A. A., Adjunct of Faculty of Training Personnel of Higher Qualification, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: silina.2015@mail.ru)

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

TEREKHIN S. N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Fire Safety of Buildings and Automated Fire Suppression Systems, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: expert_terehin@inbox.ru)

PROROK V. Ya., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Fire Safety of Buildings and Automated Fire Suppression Systems, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: aist_ugps@mail.ru)

ABSTRACT

One way to provide the required fire resistance of steel structures for oil and gas facilities is the use of intumescent compositions. With the flare burning of vapors of petroleum products, the deformation and collapse of structures subjected to high temperature (up to 1200 °C) and erosion.

As objects of study the carbon nanomaterials containing MWCNT with parameters $d = 30$ nm, $l = 2...5$ μ m were selected. The basis for the modified material was intumescent paint for steel structures "Thermal barrier", produced by TU 2313-001-30642285-2011. Modification of a flame retardant was conducted using the Deposit of MWCNT in solvent (o-xylene), with further stirring the filler at a concentration of 0.10...1.25 % by vol. Individual components of the intumescent compositions were subjected to electrophysical influence with the parameters of variable frequency-modulated potential (VFMP) 56 V, 50 Hz. Study of fire resistance performance of nano-modified intumescent compositions was conducted in a laboratory setting, simulating the conditions of hydrocarbon combustion. For almost all samples of modified intumescent compositions containing MWCNT, there is a slower (10...55 %) increase in the temperature of the object of protection within

the time of observation, in comparison with non-modified coating intumescent compositions. For samples with intumescent compositions with the primer GF-021 without MWCNT, the rate of temperature increase of metal in general, inversely proportional to the concentration of MWCNT in flame-retardant composition as no electrical influence, and when exposed to VFMP. For samples with intumescent compositions with the primer GF-021 with MWCNT at a concentration of 1.0 % by vol., the growth rate of metal temperature has a clear dependence on the concentration of MWCNT in flame-retardant composition.

Depositing in the basic fire retardant composition of MWCNT as a whole leads to a decrease in the coefficient of swelling, which certainly negatively affects the overall effectiveness of modified intumescent compositions. However, for a number of samples of the intumescent compositions without MWCNT in primer the rise of the coefficient of swelling for the concentrations of MWCNT in flame-retardant composition 0.50 to 0.75 % by vol.

It is also established that the deposition of MWCNT in the primer GF-021 as a rule, reduces the adhesion strength of the intumescent compositions for 10...20 % at the concentration of MWCNT in flame-retardant composition from 0 to 0.5 %. With a further increase in the concentration of MWCNT in flame-retardant composition to 1.25 % adhesive strength of the intumescent compositions with MWCNT deposited in the primer GF-021, slightly higher in comparison with the intumescent compositions with non-modified primer and the original sample. For samples intumescent compositions obtained with VFMP, there is a significant (40 %) increase in adhesion strength for coatings with unmodified primer GF-021.

Upon further study of modified intumescent flame retardant compositions, we plan to conduct a comprehensive thermal analysis of samples to determine the nature of a fire retardant effect of sample coverings from the nature of their modification.

Thus, optimization of the formulation and application technology of modified fire-resistant intumescent compositions allows applying them successfully to protect the metal installations on the transportation of petroleum products, characterized by a high risk of hydrocarbon fire.

Keywords: fire-retardant intumescent coating; reagent modification; electrophysical modification; hydrocarbon fire; variable frequency-modulated potential; transportation of petroleum products.

REFERENCES

1. Konnova G. V. *Oborudovaniye transporta i khraneniya nefi i gaza* [Equipment of transport and storage of oil and gas]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2006. 128 p. (in Russian).
2. Abdrakhmanov N. Kh. *Scientific and methodical bases of ensuring safe operation of hazardous production facilities of an oil and gas complex based on management of system risks*. Dr. tech. sci. diss. Ufa, 2014. 292 p. (in Russian).
3. Eremina T. Yu. Modelling and estimation of fire protection efficiency of bloating fireproof compounds. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, vol. 12, no. 5, pp. 22–29 (in Russian).
4. Ivanov S. A., Ukolov D. S., Nurutdinov G. N., Tarov V. P., Baronin G. S. Study of structural-mechanical properties of solid-phase carbonaceous HDPE-nanocomposites and results prediction using neural networks. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki / Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2013, vol. 18, no. 5, pp. 2366–2368 (in Russian).
5. Krupkin V. G., Mokhin G. N., Khalturinsky N. A. Modeling of the formation of multilayered structure by fire-retardant intumescent coatings under the influence of a fire. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki / Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2013, no. 8(145), pp. 202–206 (in Russian).
6. Khalturinskiy N. A., Krupkin V. G. On mechanism of fire retardant intumescent coating formation. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 10, pp. 33–36 (in Russian).
7. Strakhov V. L., Garashenko A. N., Kuznetsov G. V., Rudzinskii V. P. Heat and mass transfer in thermo- and fire protection, taking into account the processes of thermal decomposition, evaporation-condensation, mass transfer and swelling shrinkage. *Matematicheskoe modelirovanie / Mathematical Models and Computer Simulations*, 2000, vol. 12, no. 5, pp. 107–113 (in Russian).
8. Golovanov V. I. *The prediction of the fire resistance of steel structures fire protection*. Dr. tech. sci. diss. Moscow, 2008. 337 p. (in Russian).
9. Zyбина O. A. *Theoretical principles and technology of intumescent materials*. Dr. tech. sci. diss. Saint Petersburg, 2015. 260 p. (in Russian).

10. Pishchulin V. P., Svarovskiy A. Ya., Kuzmenko V. P. Thermal degradation and fire resistance fire protective coatings for power facilities and chemical industries. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta / Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 2, pp. 151–154 (in Russian).
11. Tsoy A. A., Demehin F. V. Testing of fire resistant materials in the conditions of the hydrocarbon temperature mode. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2015, no. 4, pp. 20–24 (in Russian).
12. Nikolaychik A. V., Prokopchuk N. R., Shpigel T. A., Nikolaychik I. V. New priming coating materials containing carbon nanotubes. *Trudy BGTU. Seriya 4: Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya / Proceedings of BSTU. Series 4: Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 139–142 (in Russian).
13. Shen J., Huang W., Wu L., Hu Y., Ye M. The reinforcement role of different amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes in epoxy nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 2007, vol. 67, no. 15–16, pp. 3041–3050. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.04.025.
14. Ganguli S., Aglan H., Dennig P., Irvin G. Effect of loading and surface modification of MWCNTs on the fracture behavior of epoxy nanocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2006, vol. 25, no. 2, pp. 175–188. DOI: 10.1177/0731684405056425.
15. Jin Z., Pramoda K. P., Xu G., Goh S. H. Dynamic mechanical behavior of melt-processed multi-walled carbon nanotube/poly(methyl methacrylate) composites. *Chemical Physics Letters*, 2001, vol. 337, no. 1–3, pp. 43–47. DOI: 10.1016/S0009-2614(01)00186-5.
16. Kondrashev S. V., Dyachkova N. P., Bogatov V. A., Mansurova I. A., Marakhovskii P. S., Mokretsova I. A., Fokin A. S. Use of carbon nanotubes for epoxy binders heat resistance increase. *Perspektivnyye materialy / Journal of Advanced Materials*, 2013, no. 2, pp. 17–23 (in Russian).
17. Yakovlev G. I., Mikhalkina T. M., Bagimov A. M., Evsyagina A. V. Modification of silicate coating fire protection by carbon nanotubes. *Stroitelnyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka / Construction Materials, Equipment, Technologies of XXI Century*, 2012, no. 8(163), pp. 44–45 (in Russian).
18. 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).
19. 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.
20. Ivakhnyuk G. K., Matjukhin V. N., Klachkov V. A., Shevchenko A. O., Knjazev A. S., Ivakhnyuk 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).
21. Andryushkin A. Yu., Tsoy A. A. The methods of definition of fire rating of flame-retardant coating for steel structures in hydrocarbon jet fire. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2016, no. 2, pp. 45–53 (in Russian).
22. Yakovlev A. D. *Khimiya i tekhnologiya lakokrasochnykh pokrytiy* [Chemistry and technology of paint coatings]. Saint Petersburg, Khimizdat, 2010. 448 p. (in Russian).
23. Tsoy A. A. *Method for determining the effectiveness of flame retardant coatings for steel structures under flare hydrocarbon combustion conditions*. Cand. tech. sci. diss. Saint Petersburg, 2017. 134 p. (in Russian).

For citation: Ivanov A. V., Boeva A. A., Ivakhnyuk G. K., Terekhin S. N., Prorok V. Ya. Research of operational characteristics of nanomodified fire-resistant intumescent compositions in the conditions of hydrocarbon fire at oil transportation facilities. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 5–19 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.5-19.

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

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

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

В. Н. ГРОМОВ, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29)

УДК 614.849

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ДВУХ ТАКТИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ПО ТУШЕНИЮ ПОЖАРОВ И ПРОВЕДЕНИЮ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ МЧС РОССИИ

Рассмотрена возможность математического моделирования процесса выработки решения о принятии на вооружение одного из двух новых тактических приемов по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ пожарно-спасательными подразделениями Федеральной противопожарной службы МЧС России в ходе сравнительной оценки их эффективности. Представлен метод формирования рекомендаций по результатам последовательного анализа двух исследуемых тактических приемов, эффективность каждого из которых определяется вероятностью выполнения поставленной задачи за установленное время, а вероятности эти неизвестны. Обоснован вывод формул, на которых базируется метод; приведен пример его практической реализации в двух формах — графической и табличной. Сформулирован круг задач оперативной деятельности МЧС России, решение которых можно осуществить с применением представленного метода.

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

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.20-26

Введение

Современное состояние природно-техногенной сферы России характеризуется ростом частоты и тяжести промышленных аварий, стихийных бедствий и катастроф, актов терроризма. Масштабы этих явлений становятся все более грозными для населения, природной среды и экономики страны. В этих условиях проблема совершенствования управления безопасностью обретает особое значение. Одной из наиболее важных задач, стоящих перед Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России), является изыскание новых нестандартных решений в деле повышения эффективности мероприятий как

по предотвращению чрезвычайных ситуаций (ЧС), так и по ведению оперативных действий в зонах стихийных бедствий, промышленных катастроф и пожаров, по ликвидации их последствий.

Разработка новых тактических приемов (далее — ТП) действий сил пожарно-спасательных подразделений (ПСП) ведется в МЧС России по разным направлениям, с привлечением научно-технических кадров, с применением современных достижений науки и мировых технологий. Возникает проблема выбора наиболее эффективного из нескольких возможных вариантов решения оперативной задачи (тушения пожара, проведения аварийно-спасательных работ (АСР), ликвидации последствий ЧС).

Цели и задачи исследования

Аварийно-спасательные работы, проводимые на особо опасных, технически сложных и уникальных объектах [1], требуют существенных материальных и временных затрат, несут определенную опасность для личного состава ПСП. Многократное проведение учений в целях накопления статистического материала, необходимого для определения наиболее эффективных приемов и способов действий ПСП на таких объектах, вряд ли можно считать целесообразным.

Использование математического моделирования [2–7] позволяет сократить затраты и риски, а также количество самих экспериментов, что особенно актуально при выборе наиболее эффективного из нескольких ТП.

Задача выбора оптимального в плане соответствия предъявляемым требованиям ТП [8] при условии, что есть возможность апробации нескольких различных приемов, может быть успешно решена с помощью метода последовательного анализа (МПА), разработанного венгерским математиком А. Вальдом [9]. Цель нашего исследования — продемонстрировать относительную простоту и доступность применения указанного метода, обеспечивающего достаточно высокую точность и надежность выводов при сравнительно небольшом числе испытаний.

Материалы и методы исследования

Сущность МПА [9] состоит в том, что при проведении испытаний их число заранее не прогнозируется, а выполняется анализ результатов после каждого эксперимента, начиная с первого. После очередного i -го опыта либо принимается одно из возможных решений и дальнейшее исследование прекращается, поскольку цель достигнута, либо решение не принимается и проводится $(i+1)$ -й опыт, исход которого с учетом всех предыдущих результатов подвергается такому же анализу.

Характерная особенность применения МПА заключается в существовании возможности описания исследуемого процесса с помощью случайной величины, принимающей только два возможных значения — 0 и 1.

В оперативной деятельности подразделений МЧС России МПА может быть применен для моделирования процессов выработки научно обоснованных решений, например:

- о кондиционности партии пожарно-технического вооружения (ПТВ), хранящейся на складе, по результатам ее проверки в ходе ограниченного числа испытаний на соответствие предъявленным требованиям [10];
- о целесообразности принятия на вооружение нового образца ПТВ или пожарной техники, огне-

тушителя, средства индивидуальной защиты или нового тактического приема выполнения боевой задачи на основе проверки их соответствия предъявляемым требованиям по эффективности [11];

- о выборе одного из двух действий или процессов, эффективность каждого из которых определяется вероятностью некоторого события, а вероятности эти неизвестны.

Примером такого исследования может служить сравнительный анализ двух тактических приемов действий сил подразделений МЧС России. Решению этой задачи и посвящена настоящая статья.

Формирование решения о выборе наиболее эффективного из двух новых тактических приемов с помощью метода последовательного анализа

Рассмотрим возможность математического моделирования процесса выработки научно обоснованного решения о принятии на вооружение наиболее эффективного из двух новых тактических приемов тушения пожаров и проведения АСР пожарно-спасательными подразделениями МЧС России.

Исследование с применением МПА проводится по результатам неоднократной сравнительной оценки эффективности двух мероприятий (учений), осуществляемых одновременно. Учитываются лишь те учения, в ходе которых задача была выполнена только посредством реализации одного (первого или второго) ТП. Специфика метода заключается в том, что из анализа исключаются все случаи, когда результаты использования двух ТП одинаковы, т. е. оба приема оказались либо успешными, либо неудачными в плане достижения цели учения.

Постановка задачи

Для выполнения пожарно-спасательным подразделением максимального объема действий по тушению пожара и проведению АСР в условиях ограничения времени разработаны два новых ТП действий сил — ТП1 и ТП2. Планируется проведение практических учений для выявления наиболее эффективного ТП. Как известно [12], среди основных временных характеристик процесса пожаротушения выделяют время боевой работы (время с момента прибытия ПСП до отъезда с места пожара), а также время тушения (занятости ПСП). Единого мнения специалистов по оценке нормативной продолжительности тушения пожаров, как и единой концепции в обосновании расчетной продолжительности боевой работы, нет. Однако такая концепция может быть сформирована экспертами пожарной безопасности на вероятностно-статистической основе.

Эффективность каждого тактического приема будем понимать как вероятность выполнения с его

помощью оперативной задачи за время, не превышающее установленного предельного значения [11]:

$$P(t_{\text{ТП}i} \leq t_{\text{уст}}) = W_i, \quad (1)$$

где $t_{\text{ТП}i}$ — время выполнения задачи при использовании исследуемого ТП1 ($i = 1$) или ТП2 ($i = 2$);

$t_{\text{уст}}$ — предельное время выполнения задачи, установленное экспертами [8, 13];

W_i — критерий эффективности ТП1 ($i = 1; 2$).

В ходе каждого учения применяется только один из исследуемых приемов.

По результатам анализа формируется рекомендация выбрать:

- ТП1, если в ходе учений окажется, что ТП2 уступает ему по эффективности не менее чем в u_0 раз;
- ТП2, если он эффективнее первого не менее чем в u_1 раз.

Допускаются ошибки первого и второго рода [9–11], вероятности совершения которых равны соответственно α и β . Цель действий сил пожарного подразделения на учении — выявление наиболее эффективного ТП. Цель математического моделирования — обоснование рекомендаций при выборе лучшего из двух ТП в ходе учений.

Разработка математической модели

Рассмотрим две гипотезы: H_0 — ТП1 лучше ТП2; H_1 — ТП2 лучше ТП1.

При этом если $W_1/W_2 \geq u_0$, то верна гипотеза H_0 , если $W_2/W_1 \geq u_1$, то верна гипотеза H_1 .

Обозначим неизвестные вероятности выполнения поставленной перед подразделением МЧС задачи при использовании ТП1 или ТП2 соответственно P_1 и P_2 .

В процессе учений считается, что оба ТП одинаковы по эффективности и невозможно отдать предпочтение ни одному из них, если задача в обоих случаях выполнена или не выполнена, чему соответствуют вероятности $P_1 \cdot P_2$ или $(1 - P_1) \cdot (1 - P_2)$ [14, 15].

Будем рассматривать только те случаи, когда поставленная задача успешно выполнена при применении ТП1 или ТП2 с вероятностями $P_1(1 - P_2)$ или $P_2(1 - P_1)$ соответственно.

Относительное превосходство ТП2 над ТП1 можно найти из соотношения

$$u = P_2(1 - P_1) / [P_1(1 - P_2)], \quad (2)$$

где $P_2(1 - P_1)$, $P_1(1 - P_2)$ — функции правдоподобия гипотез H_1 и H_0 соответственно.

Выражение (2) является коэффициентом правдоподобия. При $u = 1$ тактические приемы равнозначны. При $u > 1$ доминирует ТП2, и наоборот, при $u < 1$ доминирует ТП1.

Так как значения вероятностей P_1 и P_2 неизвестны, то при $u \approx 1$ невозможно отдать предпочтение

ни одному из ТП. В этом случае, как и в других вариантах решения задач с применением МПА [9–11], вокруг значения $u = 1$ создается нечувствительная зона, границы которой — нижняя граница зоны неопределенности u_0 и верхняя граница зоны неопределенности u_1 — устанавливаются начальником пожарного подразделения [8, 13].

Вероятность отклонения ТП1 при $u \leq u_0$ не должна превышать величины α , а вероятность его принятия при $u \geq u_1$ — величины β , с учетом того что всегда $u_0 < u_1$.

Если оба ТП одинаковы по сложности их отработки и применения, то выбираются $u_0 < 1$ и $u_1 > 1$. Эти границы могут быть как симметричными, так и несимметричными относительно единицы. Если же применение ТП2 требует дополнительных затрат материальных ресурсов или времени, то выбирается $u_0 \geq 1$.

Отметим еще раз: при проведении пар испытаний учитываются только те случаи, когда поставленную задачу по тушению пожара и проведению АСР при условии (1) удалось выполнить в случае применения только одного из тактических приемов.

Условная вероятность p выполнения задачи при использовании ТП2 при условии, что эта задача выполнена в результате применения одного из двух приемов, определяется выражением [10, 11, 14]:

$$p = \frac{P_2(1 - P_1)}{P_1(1 - P_2) + P_2(1 - P_1)}. \quad (3)$$

Преобразуем (3) к виду

$$p = \frac{P_2(1 - P_1)}{P_1(1 - P_2)} \left[1 + \frac{P_2(1 - P_1)}{P_1(1 - P_2)} \right]^{-1}.$$

С учетом (2) получим:

$$p = u / (1 + u).$$

В соответствии с принятыми значениями u_0 и u_1 обозначим:

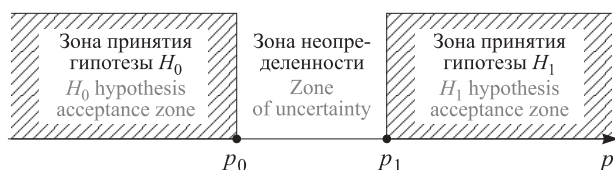
$$p_0 = u_0 / (1 + u_0); \quad p_1 = u_1 / (1 + u_1).$$

Таким образом, задача выбора одного из двух тактических приемов сводится к задаче о проверке на соответствие требованиям одного нового тактического приема [10, 11, 15]. Величина p_0 соответствует верхней границе зоны принятия гипотезы H_0 , p_1 — нижней границе зоны принятия гипотезы H_1 (рис. 1).

Итак, если верна гипотеза H_0 , предпочтение отдается первому тактическому приему, а если верна гипотеза H_1 — второму.

Границы критической области (области, в которой проверяемая гипотеза H_0 отвергается) рассчитываются в соответствии с неравенством [9–11]:

$$b + kn < m < a + kn, \quad (4)$$

Рис. 1. Зоны принятия гипотез H_0 и H_1 Fig. 1. H_0 , H_1 hypothesis acceptance zones

в котором

$$a = \frac{\ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \frac{u_1}{u_0}}; \quad b = \frac{\ln \frac{\beta}{1-\alpha}}{\ln \frac{u_1}{u_0}}; \quad k = \frac{\ln \frac{1+u_1}{1+u_0}}{\ln \frac{u_1}{u_0}}. \quad (5)$$

Для последовательной проверки в качестве величины m принимается число учений, в которых использование ТП2 приводит к выполнению задачи в соответствии с заданным критерием эффективности (1), а использование ТП1 — к ее невыполнению.

Практическая реализация метода проверки

Проверка выполняется с помощью либо графика, либо таблицы [10, 11, 14, 15]. Для этого организуют и проводят учения с применением и первого, и второго ТП, фиксируя результаты парами. Например, пара (1; 1) означает, что задача выполнена в обоих случаях, а пара (0; 1) — при проведении ТП2.

Учения могут проводиться одновременно или в разное время. При этом принимается во внимание не общее число учений, а только те n из них, в которых задача выполнена с проведением или ТП1, или ТП2 (исключая учения, в которых задача выполнена или не выполнена с применением одновременно ТП1 и ТП2). Расчет коэффициентов a , b , k и построение прямых $m_0 = b + kn$ и $m_1 = a + kn$ (в случае использования *графической формы* МПА) производятся по тому же принципу, что и при последовательном анализе одного нового тактического приема [9–11]. Испытания продолжаются до тех пор, пока ломаная, соединяющая точки $(n; m)$ (где n — число учений с удачным применением только одного из ТП; m — число пар (0; 1) с успешным результатом при применении ТП2), не пересечет прямую m_0 или m_1 . При этом рекомендуется принять ТП1, если пересечена прямая m_0 , и ТП2 — если пересечена прямая m_1 .

Реализация МПА с помощью графика представлена на рис. 2.

В случае последовательной проверки двух тактических приемов с помощью таблицы для каждого числа n рассчитываются значения $m_0 = b + kn$ и $m_1 = a + kn$, которые заносятся в графы 3 и 5. По результатам испытаний заполняются графы 2 и 4. В графу 3 помещаются только неотрицательные числа, так как значения m , которые есть смысл сравнивать с m_0 , всегда положительны.

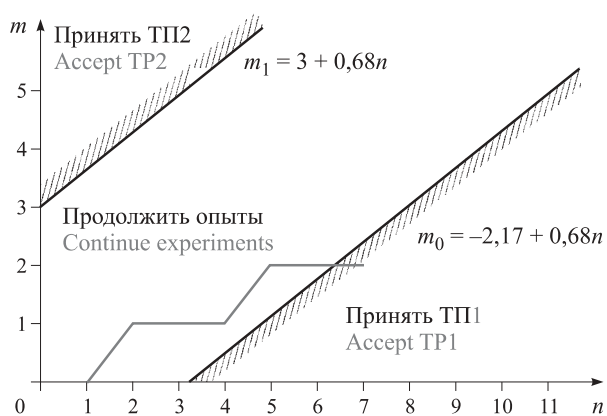


Рис. 2. График последовательного анализа для выбора одного из двух тактических приемов

Fig. 2. A sequential analysis chart for selecting one of two tactical procedures

Как и при использовании графического метода, проверка продолжается до тех пор, пока $m_0 < m < m_1$. При первом случае невыполнения указанного неравенства проверка прекращается и формируется решение:

- если $m \leq m_0$, то рекомендуется принять ТП1;
- если $m \geq m_1$, то рекомендуется принять ТП2.

В таблице приведены данные возможного варианта испытаний для примера, в котором $u_0 = 1,5$; $u_1 = 3,0$; $\alpha = 0,1$; $\beta = 0,2$.

Поясним выбор значений u_0 , u_1 , α и β исходя из заданного критерия эффективности.

Величина $u_0 = 1,5$ означает, что для формирования рекомендации о целесообразности выбора ТП1 его эффективность должна быть не менее чем в 1,5 раза выше эффективности ТП2. Величина $u_1 = 3,0$ означает, что для выбора ТП2 его эффективность должна не менее чем в 3 раза превосходить эффективность ТП1. Вероятность отклонения ТП1 при $u \leq u_0$ не должна превышать $\alpha = 0,1$, а вероятность его принятия при $u \geq u_1$ — значения $\beta = 0,2$.

Данные, полученные при возможном варианте испытаний
Data of a possible test option

Число испытаний n Number of tests n	Пары результатов испытаний (0; 1) и (1; 0) Pairs of results tests (0; 1) and (1; 0)	Число m_0 Number m_0	Число m пар (0; 1) с успешным результатом ТП2 The number m pairs (0; 1) with a successful TP2 result	Число m_1 Number m_1
1	2	3	4	5
1	(1; 0)	—	0	3,68
2	(0; 1)	—	1	4,36
3	(1; 0)	—	1	5,03
4	(1; 0)	0,54	1	5,71
5	(0; 1)	1,22	2	6,39
6	(1; 0)	1,84	2	7,06
7	(1; 0)	2,58	2	7,74

Параметры a , b и k из неравенства (4), вычисляемые по (5), при выбранных значениях u_0 , u_1 , α и β составляют: $a = 3$; $b = -2,17$; $k = 0,68$.

В данном случае сравнительную оценку двух тактических приемов следует прекратить после седьмого учения и рекомендовать пожарно-спасательному подразделению взять на вооружение первый тактический прием как наиболее эффективный.

Выводы

Применение метода последовательного анализа для выбора наиболее эффективного из двух новых

тактических приемов имеет особое значение, так как использование классических методов математической статистики для решения указанной задачи с достаточно высокой точностью и надежностью потребовало бы, по крайней мере, двукратного увеличения количества учений по сравнению с испытанием одного тактического приема. Метод последовательного анализа позволяет найти решение, отвечающее требованиям эффективности при выполнении поставленной задачи по тушению пожаров разных уровней сложности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации (ред. от 29.07.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/901919338> (дата обращения: 10.08.2017).
2. Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б. Математическое моделирование при решении задач обоснования структуры и организации функционирования мобильного госпиталя МЧС России // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2016. — № 1. — С. 62–67.
3. Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б. Применение методов математического моделирования при решении задачи выявления и оценки радиационной, химической и биологической обстановки в зоне чрезвычайной ситуации // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2016. — № 2(38). — С. 64–69.
4. Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б. Математическое моделирование при планировании мероприятий на проведение взрывных работ на реках в паводковый период // Современные тенденции развития науки и технологий. — 2016. — № 6-1. — С. 22–27.
5. Akbar N. S., Beg O. A. (eds.) Modeling and simulation in engineering sciences. — New York : iTexLi, 2016. — 289 p. DOI: 10.5772/62109.
6. Fitzgibbon W., Kuznetsov Yu. A., Neittaanmäki P., Pironneau O. (eds.) Modeling, simulation and optimization for science and technology. — Amsterdam : Springer, 2014. — 248 p. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3.
7. Siddiqi A. H., Manchanda P., Bhardwaj R. Mathematical models, methods and applications. — New York : Springer, 2015. — 309 p. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8.
8. Методические рекомендации по действиям подразделений федеральной противопожарной службы при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ : утв. указанием МЧС России от 26.05.2010 № 43-2007-18. URL: <http://lawru.info/dok/2010/05/26/n220225.htm> (дата обращения: 10.04.2017).
9. Вальд А. Последовательный анализ / Пер. с англ. — М. : Физматлит, 1960. — 328 с.
10. Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Щетка В. Ф., Хитов С. Б. Применение метода последовательного анализа для моделирования процесса выработки решения в оперативной деятельности МЧС России // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2016. — № 3(39). — С. 73–81.
11. Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б., Бардулин Е. Н. Обоснование выбора эффективных тактических приемов по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ методом последовательного анализа // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 5–12. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.5-12.
12. Тербнев В. В., Тербнев А. В. Управление силами и средствами на пожаре : учебное пособие / Под ред. Е. А. Мешалкина. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2003. — 261 с.
13. Родионов Е. Г. Продолжительность тушения пожаров на выездах определенных категорий // Материалы 12-й научно-технической конференции “Системы безопасности–2003”. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2003. URL: <http://agps-2006.narod.ru/konf/2003/sb-2003/sec-2/16.pdf> (дата обращения: 10.04.2017).
14. Волгин Н. С., Махров Н. В., Юровский В. А. Исследование операций. — Л. : ВМА, 1981. — 605 с.
15. Динер И. Я. Исследование операций. — Л. : ВМОЛУА, 1969. — 606 с.

Материал поступил в редакцию 29 августа 2017 г.

Для цитирования: Каменецкая Н. В., Медведева О. М., Хитов С. Б., Громов В. Н. Математическое моделирование сравнительного анализа двух тактических приемов по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ подразделениями МЧС России // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 20–26. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.20-26.

English

COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO TACTICAL PROCEDURES OF FIRE EXERCISE AND CARRYING OUT EMERGENCY RESCUE OPERATIONS BY THE FIRE DIVISIONS OF THE MES OF RUSSIA

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

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

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

GROMOV V. N., Doctor of Technical Sciences, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation)

ABSTRACT

One of the urgent tasks facing the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergency Situations and Elimination of Consequences of Natural Disasters (MES of Russia) is the development of new tactical procedure (TP) of the actions of the fire and rescue units. There is appeared the problem of choosing the most effective solutions to solve the operational task (fire extinguishing, rescue and salvage operations, emergency response (FEER), to eliminate the consequences of emergency situations (ES)).

In the context of the RSO, which requires significant material and time costs, as well as carrying a certain danger to the fighters of the units of the Ministry of Emergency Situations, repeated exercises to accumulate statistical material can not be considered efficient. Mathematical modeling makes it possible to reduce costs and risks during such experiments (exercises).

The purpose of this study is to demonstrate the relative simplicity, availability, rather high accuracy and reliability of the sequential analysis method (SAM) in applying to the decision of the task of choosing from two tactical techniques of one — having advantages over selected parameters.

The article substantiates the derivation of the formulas on which the method is based, gives an example of its practical implementation in two forms — in graphical and tabular format. The range of tasks of the operational activities of the Ministry of Emergencies (MES) of Russia is formulated, the solution of which can be implemented with the application of the presented method.

The study based on SAM data of a repeated comparative evaluation of the effectiveness of two exercises (exercises), are carried out simultaneously. The specificity of the method lies in the fact that all cases when the results of using two TPs are the same are excluded from the analysis, that is, both methods were either successful or unsuccessful in terms of achieving the goal of the exercise.

Upon completion of the sequence of actions envisaged by the SAM, a recommendation is made for choosing one of the two tested TPs.

The application of SAM to the selection of the most effective of the two new TPs is of particular importance, since the use of classical methods of mathematical statistics to solve this problem with a sufficiently high accuracy and reliability would require at least a twofold increase in the number of exercises conducted compared to the one-TP test.

Keywords: mathematical modeling; sequential analysis; checking statistical hypotheses; assessing the quality of tactical procedures of fire forces; fire-rescue units.

REFERENCES

1. *Urban Development Code of the Russian Federation* (ed. on 29.07.2017) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/901919338> (Accessed 10 August 2017).
2. Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Khitov S. B. Mathematical modeling in problem of solving situation of explanation of the structure and functioning of the field hospital of Emercom of Russia. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii. Nauchno-analiticheskiy zhurnal / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia. Scientific and Analytical Magazine*, 2016, no. 1, pp. 62–67 (in Russian).
3. Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Khitov S. B. Application of methods of mathematical modelling at the solution of the problem of identification and the assessment of radiation, chemical and biological situation in zone of emergency. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2016, no. 2(38), pp. 64–69 (in Russian).
4. Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Khitov S. B. Mathematical modeling in planning to conduct blasting operations on the rivers in the flood period. *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii / Modern Trends in the Development of Science and Technology*, 2016, no. 6-1, pp. 22–27 (in Russian).
5. Akbar N. S., Beg O. A. (eds.). *Modeling and simulation in engineering sciences*. New York, iTexLi, 2016. 289 p. DOI: 10.5772/62109.
6. Fitzgibbon W., Kuznetsov Yu. A., Neittaanmäki P., Pironneau O. (eds.). *Modeling, simulation and optimization for science and technology*. Amsterdam, Springer, 2014. 248 p. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3.
7. Siddiqi A. H., Manchanda P., Bhardwaj R. *Mathematical models, methods and applications*. New York, Springer, 2015. 309 p. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8.
8. *Methodical recommendations on the actions of units of the federal firefighting service for extinguishing fires and conducting emergency rescue operations*. Approved by the order of Emercom of Russia on 26.05.2010 No. 43-2007-18 (in Russian). Available at: <http://lawru.info/dok/2010/05/26/n220225.htm> (Accessed 10 April 2017).
9. Wald A. *Sequential analysis*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1947. 221 p. (Russ. ed.: Wald A. *Posledovatelnyy analiz*. Moscow, Fizmatlit Publ., 1960. 328 p.).
10. Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Shchetka V. Ph., Khitov S. B. Application of sequential analysis for simulation decision-making process in the operational activities of Emercom of Russia. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2016, no. 3(39), pp. 73–81 (in Russian).
11. Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Khitov S. B., Bardulin E. N. Justification of effective tactical procedure choice fire-fighting wrecking by means of sequential analysis method. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 5–12 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.5-12.
12. Terebnev V. V., Terebnev A. V. Ed. by Meshalkin E. A. *Upravleniye silami i sredstvami na pozhare. Uchebnoye posobiye* [Management of forces and means on a fire. Textbook]. Moscow, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia, 2003. 261 p. (in Russian).
13. Rodionov E. G. The duration of extinguishing fires on exits of certain categories. In: *Materialy 12-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sistemy bezopasnosti–2003"* [Proceedings of 12th Scientific-Technical Conference "Safety Systems–2003"]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2003 (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/konf/2003/sb-2003/sec-2/16.pdf> (Accessed 10 April 2017).
14. Volgin N. S., Makhrov N. V., Yurovskiy V. A. *Issledovaniye operatsiy* [Operations research]. Leningrad, Naval Academy Publ., 1981. 605 p. (in Russian).
15. Diner I. Ya. *Issledovaniye operatsiy* [Operations research]. Leningrad, VMOLUA Publ., 1969. 606 p. (in Russian).

For citation: Kamenetskaya N. V., Medvedeva O. M., Khitov S. B., Gromov V. N. Comparative analysis of two tactical procedures of fire exercise and carrying out emergency rescue operations by the fire divisions of the MES of Russia. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 20–26 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.20-26.

А. И. ДАНИЛОВ, аспирант кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: adanilov@Lmgt.ru)

В. А. МАСЛАК, канд. техн. наук, генеральный директор ОАО "НИПИИ "Ленметрогипротранс" (Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Московская, 2)

А. В. ВАГИН, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

И. А. СИВАКОВ, канд. техн. наук, ассистент кафедры физики, Университет ИТМО (Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49; e-mail: i_sivakov@niuitmo.ru)

УДК 614.841.48

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА В ВАГОНЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

Представлен краткий обзор и анализ существующих подходов к моделированию горения. Предложен метод определения мощности пожара, учитывающий особенности процесса горения в ограниченном объеме вагона подвижного состава. Проведено моделирование с использованием программного средства FDS, реализующего вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении. На основании результатов выполненных исследований проведено численное моделирование и получена зависимость мощности пожара от времени, которая для удобства проведения инженерных расчетов была аппроксимирована. Показано, что данная зависимость может найти применение в сфере проектирования систем обеспечения пожарной безопасности объектов метрополитена.

Ключевые слова: пожар в вагоне; тепловая мощность пожара; моделирование горения; полевая модель пожара; FDS.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.27-35

Введение

В последние годы наблюдается рост количества проектируемых и строящихся объектов метрополитена в Москве и Санкт-Петербурге с применением новых объемно-планировочных и технологических решений. Наряду с этим ужесточаются нормативные требования к системам противодымной защиты линий и станций метрополитена, усложняется топология и алгоритмы работы систем противодымной вентиляции и противопожарной автоматики.

Практика показывает, что выполнения минимальных нормативных требований зачастую недостаточно для создания полноценно функционирующей системы противодымной защиты. Во всем мире решение таких сложных инженерных задач выполняется с использованием современных технологий компьютерного моделирования физических процессов*. В России наметилась схожая тенденция: с по-

вышением сложности применяемых систем все больше возрастает роль моделирования при выборе, обосновании и подтверждении эффективности проектных решений.

Для учета особенностей сооружений метрополитена в части объемно-планировочных решений, воздухообмена на линии в целом и на станции в частности, влияния условий внешней среды и других значимых факторов необходимо проводить моделирование развития пожара и распространения опасных факторов пожара (ОФП) с последующим инженерным анализом условий безопасной эвакуации пассажиров и персонала из подземных сооружений.

В связи с этим все более актуальной становится задача обоснованного выбора сценария и параметров проектной аварии, в частности параметров пожара в вагоне подвижного состава. В соответствии с действующими нормативными документами пожар в вагоне является основным сценарием пожара для платформенных залов станций и именно он определяет структуру и параметры систем противодымной защиты станции и линий метрополитена.

* В качестве примера можно привести общепризнанные в мире и считающиеся эталонными американские стандарты NFPA 502 "Standard for road tunnels, bridges and other limited access highways" и NFPA 130 "Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems".

Обзор существующих методов моделирования горения

При моделировании пожаров используются различные математические модели и программные продукты. Наибольшую детализацию процесса и достоверность результатов позволяют получить полевые (вычислительные гидрогазодинамические) модели, в основе которых лежит решение уравнений Навье – Стокса с соответствующими замыканиями.

В среде специалистов по пожарной безопасности широкое распространение получил программный продукт Fire Dynamics Simulator (FDS) разработки NIST (National Institute of Standards and Technology, США), являющийся достаточно мощным и универсальным инструментом моделирования физических процессов при пожаре, который позволяет качественно и количественно оценить динамику развития пожара и распространения ОФП с учетом физико-химических свойств горящих веществ.

По способу задания характеристик очага пожара существует несколько принципиально разных подходов к моделированию горения с помощью программного продукта FDS.

Самый простой способ, используемый в большинстве инженерных расчетов, заключается в задании скорости распространения, площади пожара и удельного тепловыделения (HRRPUA) с поверхности горения. При задании этих параметров используют усредненные, приведенные к единице площади экспериментальные данные, полученные при сжигании нескольких видов материалов, характеризующих тот или иной тип пожарной нагрузки (например, “типовое” жилое помещение или “типовой” зал кинотеатра). При этом не учитываются процессы, происходящие внутри материала, а моделируется только газофазное горение при заданных граничных условиях.

Преимущества данного способа заключаются в простоте задания исходной модели пожара, меньшей нелинейности модели, более высокой устойчивости и сходимости решения, более низких требованиях к разрешающей способности сетки и, как следствие, более высокой скорости выполнения расчета. Основные недостатки вытекают из особенностей способа: отсутствует связь между процессами в твердой и газообразной фазах; осреднение физико-химических и тепловых параметров пожарной нагрузки не позволяет адекватно учесть динамику распространения пожара по различным составляющим пожарной нагрузки; недостаточность справочных данных зачастую не позволяет моделировать выгорание или затухание пожара. При значительном отличии условий протекания модельного пожара от эксперимента, в котором получены осредненные данные (например, при существенно ограниченном

доступе окислителя), результаты моделирования могут количественно, а иногда и качественно не совпадать с реальностью. Еще одной проблемой является то, что для ряда видов пожарной нагрузки отсутствуют экспериментальные или справочные данные, на основании которых можно было бы принимать усредненные значения параметров пожара.

При отсутствии усредненных экспериментальных данных для конкретного вида пожарной нагрузки и наличии сведений о ее отдельных компонентах задача может быть решена путем совместного моделирования газофазного горения с учетом термодинамических процессов, происходящих внутри материала. Суть подхода заключается в задании скорости выгорания твердых горючих материалов, составляющих пожарную нагрузку. При этом распространение пламени по поверхности определяется температурой воспламенения и теплофизическими свойствами материалов и газовоздушной среды, что позволяет моделировать горение без сведений об усредненных значениях параметров тепловыделения очага пожара. В данном подходе для упрощения модели допустимо приводить гетерогенную пожарную нагрузку к одному веществу по теплотворной способности, хотя при этом следует помнить, что итоговая динамика развития пожара не будет в полной мере соответствовать реальному пожару. К недостаткам подхода можно отнести невозможность прямого учета различных химических реакций для нескольких материалов. Однако выход продуктов горения от различных материалов может быть учтен путем задания химической реакции с составным горючим и составными продуктами горения, в которой стехиометрические коэффициенты подбираются с учетом массовых долей материалов в пожарной нагрузке. К существенным недостаткам метода можно отнести его большую в сравнении с заданием усредненных характеристик нелинейность, более высокие требования к разрешающей способности сетки и, как следствие, более значительную длительность расчета.

Самым детализированным и комплексным, но при этом и наиболее сложным, является подход с одновременным моделированием газофазного горения и газификации твердого материала, которая заключается в пиролизе или испарении с выделением газообразного горючего, обусловленном термическим разложением. Скорость разложения твердой фазы и образования газообразного горючего определяется химической кинетикой процесса (уравнение Аррениуса), плотностью воспринимаемого поверхностью материала теплового потока и диффузионными процессами в газовой фазе. Основное преимущество подхода — возможность моделирования процесса горения, максимально приближен-

ного к реальному, наличие обратной тепловой связи между газовой и твердой фазами. К недостаткам следует отнести необходимость знать для каждого материала наряду с теплофизическими параметрами, определяющие химическую кинетику процесса (устанавливаемые экспериментально), а также подбирать источник зажигания, обеспечивающий зажигание и самоподдерживающееся горение. Введение дополнительных параметров усложняет модель, повышает ее нелинейность, снижает устойчивость и сходимость. Кроме того, решение, как правило, не является робастным, чувствительно к выбору метода расчета турбулентности и разрешающей способности сетки. Наиболее точные результаты получаются при использовании метода прямого численного моделирования (DNS). Все вышеперечисленное делает практически невозможным применение данного подхода для решения крупномасштабных инженерных задач, таких как моделирование пожара на станции метрополитена или в тоннеле.

Необходимо отметить, что основная сложность применения моделирования в России для обоснования проектных решений связана с тем, что отсутствуют официальные методики моделирования и анализа результатов, а для ряда объектов и видов пожарной нагрузки отсутствуют официально опубликованные и научно обоснованные исходные данные для проведения расчетов. В частности, для объектов подземной транспортной инфраструктуры (метрополитены и транспортные тоннели) отсутствуют данные по пожарам в основных видах вагонов.

Если параметры химической реакции, протекающей при горении пожарной нагрузки, можно получить путем осреднения с учетом массовой доли в общей пожарной нагрузке реакций по каждому материалу, применяемому при строительстве вагонов, то при задании мощности пожара возникают проблемы. В зарубежных странах существует практика использования стандартизованных расчетных зависимостей мощности пожара от времени для основных видов вагонов метрополитена, железнодорожных вагонов и локомотивов [1, 2], включенных в общеевропейские нормативные документы [3]. Эти данные получены на основании крупномасштабных экспериментальных исследований и результатов моделирования конкретных объектов. Последние крупномасштабные экспериментальные исследования в нашей стране проводились Санкт-Петербургским филиалом ВНИИПО МЧС России в 1988–1990 годах на вагонах, уже снятых с производства [4], поэтому результаты этих исследований имеют ограниченную практическую ценность и не могут быть применены при проектировании новых объектов. В настоящее время в официальных источниках имеются данные только по пожарной нагрузке эксплуатиру-

емых вагонов и отдельные сведения по параметрам горения материалов конструкций, применяемых в современных вагонах.

Цели и задачи

Цель проведения исследований — определение параметров пожара на основании численного моделирования с использованием имеющихся данных по характеристикам материалов, применяемых при строительстве современных вагонов метрополитена, сведений по пожарной нагрузке вагонов, приведенных в официальных источниках [5, 6], и справочных данных [7–9].

Анализ данных о горючих материалах, применяемых при строительстве современных вагонов моделей 81-557 и 81-558, позволил получить максимальное значение приведенной пожарной нагрузки — $28,17 \text{ кг/м}^2$ [6]. Диаграмма распределения видов материалов, используемых в конструкциях вагона, представлена на рис. 1. Задача исследования заключалась в оценке зависимости мощности пожара от времени при условии равномерного распределения эквивалентной пожарной нагрузки по площади вагона и полного выгорания всей массы пожарной нагрузки в пределах одного вагона.

Постановка задачи и граничные условия

Низшая теплота сгорания и удельная массовая скорость выгорания принимались равными: $Q_n^p = 16,74 \text{ МДж/кг}$, $m_{\text{уд}} = 0,024 \text{ кг/(с·м}^2\text{)}$ [6, 10, 11]. Суммарная пожарная нагрузка определялась по площади вагона при плотности условной древесины 500 кг/м^3 .

Для расчетной оценки динамики развития пожара принят следующий сценарий:

- рассматривается пожар в отдельном вагоне, расположенном в замкнутом объеме, ограниченном расчетной областью (вагон остановлен на станции или в перегонном тоннеле);
- пожар в подвагонном пространстве рассматривается как источник зажигания пожарной нагрузки вагона;
- пожарная нагрузка равномерно распределена по всей площади вагона;
- двери вагона открыты с одной стороны в связи с тем, что рассматривается ситуация, когда уже начался или завершился процесс эвакуации из вагона (при остановке на станции или в перегонном тоннеле эвакуация всегда осуществляется из одной группы дверей).

Численное моделирование проводилось с использованием программного средства FDS, реализующего вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении, основанную на численном решении уравнений Навье – Стокса.

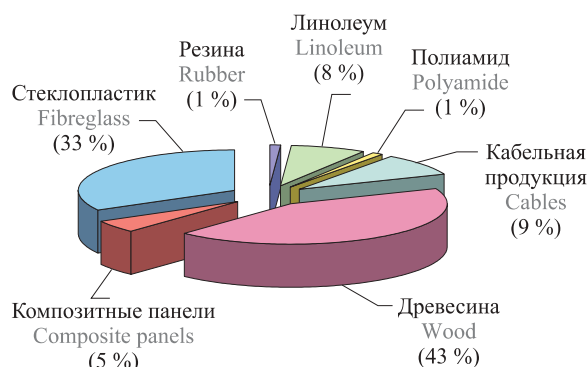


Рис. 1. Виды материалов в конструкции вагона метрополитена

Fig. 1. Types of materials in the construction of the subway car

В расчете учитывались все геометрические характеристики вагона.

При проведении расчетов принимались следующие начальные условия:

- начальная температура среды — 20 °C;
- источник воспламенения активируется в момент времени $t = 0$ с;
- мощность источника воспламенения составляет 1000 кВт/м²;
- длительность воздействия источника воспламенения — 60 с;
- двери вагона открыты с одной стороны;
- целостность остекления окон и закрытых дверей вагона в начальный момент времени сохраняется.

Граничными являлись следующие условия:

- материал ограждающих конструкций вагона — металл;
- вскрытие окон вагона происходит при температуре среды в зоне остекления более 300 °C;
- вагон расположен в объеме, ограниченном сетками, размером 40×12×6 м;
- нижняя и боковые поверхности объема ограничены сетками;
- верхняя горизонтальная поверхность объема — поверхность "Open".

Расчетная область составляла 40×12×6 м. Размер ячеек сеток в зоне поверхности горения — 0,025×0,025×0,025 м, а в зоне над очагом пожара и за пределами вагона — 0,25×0,25×0,25 м. Время расчета принималось с учетом полного выгорания пожарной нагрузки и составляло 2500 с.

Результаты расчета

Общее время проведения расчета на кластере с использованием 48 вычислительных потоков составило 396 ч. Общий вид расчетной модели приведен на рис. 2.

Зависимость мощности пожара от времени и вид расчетной модели в различные моменты времени

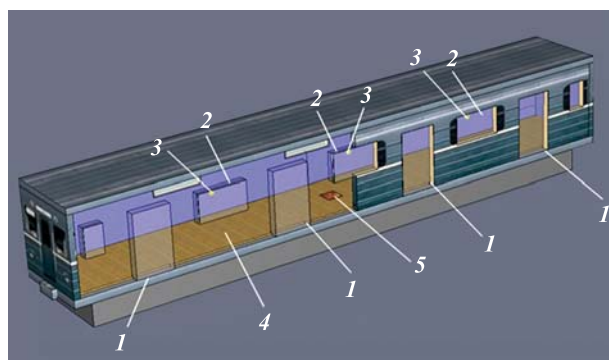


Рис. 2. Общий вид расчетной модели: 1 — двери вагона (4 двери открыты в начальный момент времени); 2 — окна вагона (в начальный момент времени все окна закрыты); 3 — датчики температуры (окна вагона вскрываются при достижении температуры на датчиках 300 °C); 4 — распределенная пожарная нагрузка; 5 — источник воспламенения

Fig. 2. Computational model view: 1 — car doors (4 doors are opened in a initial time); 2 — car windows (in a initial moment all windows are closed); 3 — temperature sensors (windows of the car are opened at achievement of temperature on sensors of 300 °C); 4 — distributed fire load; 5 — ignition source

представлены на рис. 3 и 4. Максимальная мощность пожара достигается на 1415-й секунде (23,6-й минуте) и составляет 12,3 МВт. При этом в центральной зоне вагона часть пожарной нагрузки выгорает, площадь поверхности горения максимальна для заданных условий. Вскрытие окон вагона происходит в диапазоне времени 250...280 с для окон, находящихся в непосредственной близости от источника воспламенения, и 750...790 с — для окон, расположенных в торцах вагона. Поля температур в продольном сечении вагона приведены на рис. 5. При пиковом значении мощности пожара локальные значения температуры достигают 700 °C. Средняя температура в зоне под потолком вагона находится в диапазоне 300...350 °C.

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с результатами зарубежных исследований, в соответствии с которыми мощность пожара в ваго-

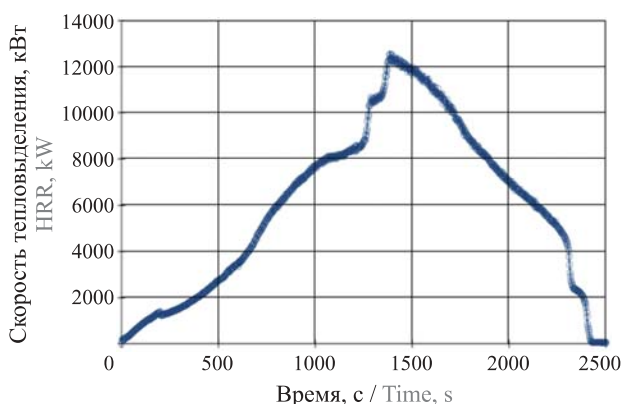
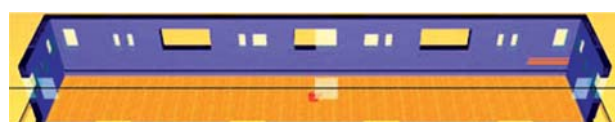


Рис. 3. Зависимость мощности пожара от времени
Fig. 3. Dependence of heat release rate of the fire on time



$t = 0$, HRR = 0



$t = 300$ с, HRR = 1,5 МВт
 $t = 300$ s, HRR = 1.5 MW



$t = 900$ с, HRR = 8,4 МВт
 $t = 900$ s, HRR = 8.4 MW



$t = 1400$ с, HRR = 12,3 МВт
 $t = 1400$ s, HRR = 12.3 MW



$t = 2200$ с, HRR = 5,8 МВт
 $t = 2200$ s, HRR = 5.8 MW

Рис. 4. Динамика развития пожара в вагоне подвижного состава метрополитена

Fig. 4. Fire development dynamics in the subway rolling stock car

не метро находится в пределах 10...15 МВт при времени достижения пиковой мощности 25...35 мин [12–14, 3].

Для сокращения времени расчета в реальных условиях проектирования систем противопожарной защиты метрополитена приведенная на рис. 3 кривая мощности пожара была аппроксимирована зависимостью, представленной на рис. 6.

Исходные данные для расчета в FDS задаются следующими параметрами:

- максимальная площадь очага пожара $F_{\text{п}} = 37 \text{ м}^2$;
- линейная скорость распространения пожара $v_{\text{л}} = 0,02 \text{ м/с}$;
- тепловыделение $\text{HRRPUA} = 380 \text{ кВт/м}^2$.

Зависимость коэффициента тепловыделения от времени (Ramp-UpTime в свойствах параметра “Поверхность”) приведена в таблице.

Параметры химической реакции при проведении расчетов динамики развития пожара в вагоне определяются на основании анализа количественного и качественного состава материалов, исполь-



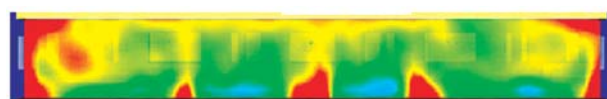
$t = 0$



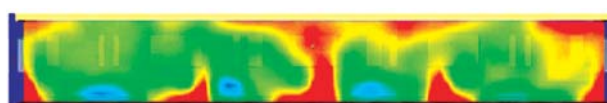
$t = 300$ с / $t = 300$ s



$t = 600$ с / $t = 600$ s

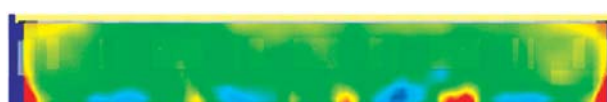


$t = 1200$ с / $t = 1200$ s



$t = 1415$ с / $t = 1415$ s

Максимальная скорость тепловыделения / HRR_{max}



$t = 1800$ с / $t = 1800$ s

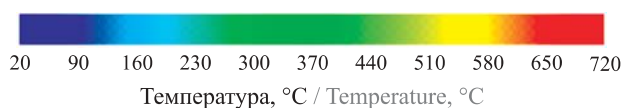


Рис. 5. Поля температур в продольном сечении вагона

Fig. 5. Fields of temperatures in a longitudinal section of the car

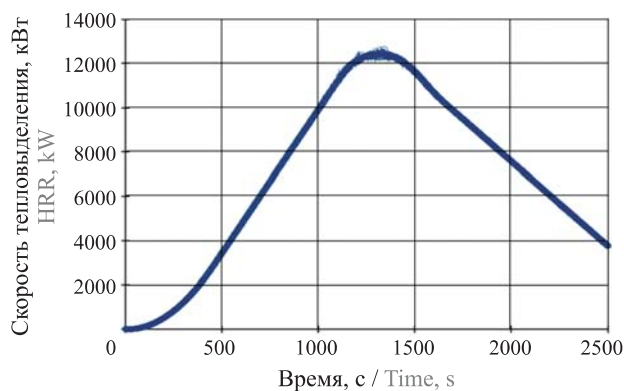


Рис. 6. Зависимость мощности пожара от времени

Fig. 6. Dependence of heat release rate of the fire on time

зуемых при изготовлении вагона. Диаграмма, отражающая процентное соотношение основных горючих материалов вагона, приведена на рис. 1. Средне-

Зависимость коэффициента тепловыделения от времени
Dependence of heat release parameter on time

Время, с Time, s	Коэффициент теповыделения Heat release parameter	Время, с Time, s	Коэффициент теповыделения Heat release parameter
0,0	0,0	1320,0	0,780864
60,0	0,055554	1427,0	0,7225704
120,0	0,111108	1520,0	0,671904
240,0	0,222216	1640,0	0,606528
360,0	0,333324	1760,0	0,541152
480,0	0,444432	1880,0	0,475776
600,0	0,55554	2000,0	0,4104
720,0	0,666648	2120,0	0,345024
840,0	0,777756	2240,0	0,279648
960,0	0,888864	2360,0	0,214272
1080,0	0,999972	2500,0	0,138
1200,0	0,84624		

взвешенные значения параметров определялись в соответствии с зависимостью

$$L_i^s = \frac{1}{\sum m_i} \sum L_i^j m_i,$$

где L_i^s — средневзвешенное значение i -го параметра суммарной пожарной нагрузки;

L_i^j — значение i -го параметра для j -го компонента пожарной нагрузки;

m_i — массовая доля i -го материала в пожарной нагрузке;

$L_{O_2}^s$ — удельный расход кислорода;

$L_{O_2}^s = 2,569$ кг/кг;

L_{CO}^s — удельный выход CO; $L_{CO}^s = 0,11$ кг/кг;

$L_{CO_2}^s$ — удельный выход CO₂; $L_{CO_2}^s = 0,574$ кг/кг;

L_{HCl}^s — удельный выход HCl;

$L_{HCl}^s = 0,00495$ кг/кг.

Средневзвешенный выход частиц углерода L_C^s определяется исходя из средневзвешенной дымообразующей способности материала:

$$L_C^s = D_m^s / K_m,$$

где D_m^s — средневзвешенная дымообразующая способность; $D_m^s = 250$ Нп·м²/кг;

K_m — коэффициент светового поглощения;

$K_m = 8700$ м²/кг.

В последующих формулах для упрощения записи верхний индекс s , обозначающий средневзвешенное значение величины, не указан.

Для газа α справедливо следующее выражение:

$$L_\alpha = \frac{v_\alpha M_f}{M_\alpha} \rightarrow v_\alpha = \frac{L_\alpha M_f}{M_\alpha},$$

где M_α — молярная масса отдельных компонентов пожарной нагрузки, г/моль;

M_f — молярная масса суммарной пожарной нагрузки.

Соответственно, для каждого газа получим:

$$v_{O_2} = \frac{L_{O_2} M_f}{M_{O_2}}; \quad v_{CO_2} = \frac{L_{CO_2} M_f}{M_{CO_2}};$$

$$v_{CO} = \frac{L_{CO} M_f}{M_{CO}}; \quad v_C = \frac{L_C M_f}{M_C} = \frac{D_m M_f}{K_m M_C};$$

$$v_{HCl} = \frac{L_{HCl} M_f}{M_{HCl}}.$$

Из закона сохранения массы находим:

$$L_{H_2O} = 1 + L_{O_2} - L_{CO_2} - L_{CO} - L_C - L_{HCl};$$

$$v_{H_2O} = \frac{(1 + L_{O_2} - L_{CO_2} - L_{CO} - L_C - L_{HCl}) M_f}{M_{H_2O}}.$$

В соответствии с рекомендациями [5] для расчета используются молярные массы условных “базовых” веществ, характерные для данного вида топлив.

Для большинства материалов используется два вида “базовых” веществ:

- дерево (C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5}, $M_f = 87$ г/моль) — для материалов на основе дерева, целлюлозы, тканей;
- стирол (C₆H₅—CH=CH₂, $M_f = 104$ г/моль) — для материалов с содержанием пластмасс, резины и других искусственных материалов.

Для расчета принимается второй вариант.

Вывод

На основании результатов численного моделирования получена зависимость мощности пожара от времени, основанная на данных по реальным параметрам пожарной нагрузки вагонов, эксплуатируемых в настоящее время. Полученная зависимость была аппроксимирована с учетом возможности дальнейшего использования ее при моделировании динамики развития ОФП с помощью программного средства FDS в условиях ограниченных сроков проектирования. Практический результат проведенных исследований заключается в том, что проектировщику предоставляются обоснованные исходные данные для моделирования процесса развития ОФП на объектах метрополитена, результаты которого являются основой для создания системы противопожарной защиты.

Правомерность подхода к решению поставленной задачи и результатов, полученных в ходе выполнения работы, подтверждается данными отечественных и зарубежных исследований в области обеспечения пожарной безопасности объектов метрополитена [1–4, 11–14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ergebnisbericht zur beurteilung von branden an schienenfahrzeugen als bemessungsbrände zur brand-schutztechnischen auslegung von oberirdischen personenverkehrsanlagen der Deutschen Bahn AG. — Frankfurt am Main : Deutsche Bahn AG, DB Station & Service, Fachstelle Brandschutz, September 2000.
2. Bemessungsbrände für s-bahnen und den gemischten reisezugverkehr : anwenderhandbuch. — Köln : STUVA, Juni 2010 [Design fires for urban commuter railway systems and the mixed passenger transport : manual. — Cologne : STUVA, June 2010].
3. Fire in Tunnels. Technical Report — Part 1. Design Fire Scenarios. — Brussels, Belgium, WTCB, 2006. — 161 p.
4. Провести исследования и определить требуемые пределы огнестойкости несущих конструкций станций и тоннелей на основании реального температурного режима : отчет о НИР (заключ.) / ЛФ ВНИИПО; руководитель В. П. Беязцкий. — П.Л2.Н.003.89 (разд. 4). — Л., 1990. — 87 с.
5. Оценка соответствия вагонов метрополитена моделей 81-556, 81-557 и 81-558 требованиям НПБ 109-96 “Вагоны метрополитена. Требования пожарной безопасности” : заключение № 014-03.13. — СПб. : Санкт-Петербургский филиал ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ, 2013. — 38 с.
6. Пособие по применению “Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности”. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : ВНИИПО, 2014. — 226 с.
7. *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. 1, 713 с.; Ч. 2, 774 с.
8. Программный комплекс Fire Cat. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim. — Екатеринбург : ИП Карькин И. Н., 2014. — 27 с.
9. *Бондарев В. Ф., Лесков А. А.* Определение интенсивности тепловыделения при пожаре подвижного состава метрополитена в тоннеле // Борьба с пожарами в метрополитенах : сб. науч. тр. — М. : ВНИИПО МВД РФ, 1992. — С. 62–70.
10. Surface transport master plan. Addendum 3 — Transit corridor safeguarding. Fire and life safety concept. — Abu Dhabi, UAE : Department of Transport, November 2008. URL: <https://www.scribd.com/document/320813316/Fire-and-Life-Safety-Concept> (дата обращения: 01.08.2017).
11. *Ingason H., Gustavsson S., Dahlberg M.* Heat release rate measurements in tunnel fires. SP Report 1994:08. — Borås : Swedish National Testing and Research Institute, 1994. — 64 p.
12. *Haack A.* Real fires and design fires // Proceedings of the Jornada Técnica sobre Fuego en Túneles. — Barcelona, Spain, 5 May 2011.
13. *Bo Si Zhang, Shou Xiang Lu.* Numerical simulation and analysis of compartment fire in subway train // Applied Mechanics and Materials. — 2012. — Vol. 166-169. — P. 2726–2730. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.2726.
14. *Li Y. Z., Ingason H.* A new methodology of design fires for train carriages based on exponential curve method // Fire Technology. — 2016. — Vol. 52, Issue 5. — P. 1449–1464. DOI: 10.1007/s10694-015-0464-3.

Материал поступил в редакцию 15 августа 2017 г.

Для цитирования: Данилов А. И., Маслак В. А., Вагин А. В., Сиваков И. А. Численное моделирование пожара в вагоне метрополитена // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 27–35. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.27-35.

English

NUMERICAL SIMULATION OF A SUBWAY CAR FIRE

DANILOV A. I., Postgraduate Student, Department of Buildings Fire Safety and Automated Extinguishing Systems, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: adanilov@lmgmt.ru)

MASLAK V. A., Candidate of Technical Sciences, General Director of OJSC "Scientific-and-Research Design-and-Survey Institute "Lenmetrogiprotrans" (Bolshaya Moskovskaya St., 2, Saint Petersburg, 191002, Russian Federation)

VAGIN A. V., Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Department of Buildings Fire Safety and Automated Extinguishing Systems, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

SIVAKOV I. A., Candidate of Technical Sciences, Assistant of Physics Department, ITMO University (Kronverkskiy Avenue, 49, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; e-mail: i_sivakov@niuitmo.ru)

ABSTRACT

This research thesis presents the simulation of fire growth and flame spread within a car in an underground trainway using Fire Dynamics Simulator (FDS) realizing Computational Fluid Dynamics (CFD) model. The motivation of the study is to predict the heat release rate (HRR) and specifically the peak value for emergency situations. The existing documents don't contain recommendations for defining these important parameters. Using of several methods of estimating the HRR for a metro train, it appears that the current methods cannot realistically predict the HRR because factors such as the burning behavior of materials; and the train and tunnel geometries that affect the HRR are not considered. This project attempts to incorporate these factors in the FDS model.

Modeling was realized on the base of such main research results as:

- fire load of subway car series 81-557 and 81-558 (wood equivalent);
- burning rate (full scale experiments).

A number of assumptions have been made so that to simplify the model. They were:

- passenger doors were opened from one side of car;
- fire load was spread on car area;
- window failure was simulated, at temperature 300 °C window began to fracture and fall off (temperature was controlled by detectors at center of windows);
- ignition of material was initiated by point source;
- upper plane of the computational domain is defined as "Open";
- calculation was carried out until the fire load was completely burned out.

The size of the computational domain was 40 m long by 12 m wide by 6 m high. Two grid sizes, 0.025×0.025×0.025 m (zone of fire load) and 0.25×0.25×0.25 m (zone above fire load) were used.

The simulation time specified for simulation was 2500 s.

Results of modeling:

- HRR-curve: approximation of HRR-curve for engineering calculations ("design fire");
- value of peak HRR — 12.3 MW;
- combustion reaction parameters.

The results of the study and the obtained dependence of the heat release rate can be applied in the development, justification of parameters, evaluation of the smoke protection systems efficiency and analysis of people safe evacuation conditions in case of fire.

Keywords: car fire; heat release rate; fire simulation; fire field model; fire dynamics simulator (FDS).

REFERENCES

1. *Ergebnisbericht zur beurteilung von branden an schienenfahrzeugen als bemessungsbrände zur brandschutztechnischen auslegung von oberirdischen personenverkehrsanlagen der Deutschen Bahn AG.* Frankfurt am Main, Deutsche Bahn AG, DB Station & Service, Fachstelle Brandschutz, September 2000.
2. *Bemessungsbrände für s-bahnen und den gemischten reisezugverkehr. Anwenderhandbuch.* Köln, STUVA, Juni 2010 [Design fires for urban commuter railway systems and the mixed passenger transport. Manual. Cologne, STUVA Publ., June 2010].

3. *Fire in Tunnels. Technical Report — Part 1. Design Fire Scenarios*. Brussels, Belgium, WTCB, 2006. 161 p.
4. *Researching and determination of required fire resistance limits for load-carrying structures of stations and tunnels based on the actual temperature regime*. Report on research work (final). Saint Petersburg, 1990. 87 p. (in Russian).
5. *The conformity assessment of subway cars of models 81-556, 81-557 and 81-558 to the requirements of NPB 109–96 “Underground vans. Fire safety requirements”*. The conclusion No. 014-03.13. Saint Petersburg, Saint Petersburg Branch of All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2013. 38 p. (in Russian).
6. *Manual on the application of “Methods for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire danger”*. 2nd edition. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2014. 226 p. (in Russian).
7. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik*. 2-e izd. [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004, part 1, 713 p.; part 2, 774 p. (in Russian).
8. *Fire Cat software. The library of reactions and combustion surfaces in PyroSim*. Yekaterinburg, IP Karkin I. N. Publ., 2014. 27 p. (in Russian).
9. Bondarev V. F., Leskov A. A. Determination of heat release in the fire of the subway rolling stock in the tunnel. In: *Borba s pozharemi v metropolitenakh: sb. nauch. tr.* [Fire safety in subways. Collected papers]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 1992, pp. 62–70 (in Russian).
10. Surface transport master plan. Addendum 3 — Transit corridor safeguarding. Fire and life safety concept. Abu Dhabi, UAE, Department of transport, November 2008. Available at: <https://www.scribd.com/document/320813316/Fire-and-Life-Safety-Concept> (Accessed 1 August 2017).
11. Ingason H., Gustavsson S., Dahlberg M.. *Heat release rate measurements in tunnel fires. SP Report 1994:08*. Borås, Swedish National Testing and Research Institute, 1994. 64 p.
12. Haack A. Real fires and design fires. In: *Proceedings of the Jornada Técnica sobre Fuego en Túneles*. Barcelona, Spain, 5 May 2011.
13. Bo Si Zhang, Shou Xiang Lu. Numerical simulation and analysis of compartment fire in subway train. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 166-169, pp. 2726–2730. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.2726.
14. Li Y. Z., Ingason H. A new methodology of design fires for train carriages based on exponential curve method. *Fire Technology*, 2016, vol. 52, issue 5, pp. 1449–1464. DOI: 10.1007/s10694-015-0464-3.

For citation: Danilov A. I., Maslak V. A., Vagin A. V., Sivakov I. A. Numerical simulation of a subway car fire. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 27–35 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.27-35.

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

Д. А. КОРОЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ikbs@mgsu.ru)

Н. В. ГРОМОВ, канд. техн. наук, заведующий лабораторией НТЦ "Взрывоустойчивость", Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: newdayru@bk.ru)

УДК 614.834

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ АВАРИЙНОГО ВЗРЫВА

На основании проведенной авторами экспертизы последствий аварийного взрыва описаны особенности расчета газодинамических параметров газозвушной смеси, формирующейся при аварии, что позволяет достаточно аргументированно восстановить сценарий развития аварии и установить меру ответственности участвующих в аварии сторон. На примере проведения экспертизы реальной взрывной аварии сделана попытка выделить некоторые особенности выполнения расчетов и определения значений в расчетах начальных исходных данных. Проведены численные расчеты процесса формирования взрывоопасного облака применительно к конкретной аварийной ситуации. На основании расчетов по определению расходов газа в различных областях горения через размеры областей горения сделан вывод, что именно при рассчитанных расходах картина взрывной аварии соответствует наблюдавшейся в действительности. Показана роль источника зажигания в формировании газозвушного облака и в развитии аварии на основании сравнительного анализа концентрационных полей, создаваемых различными источниками.

Ключевые слова: аварийный взрыв; техническая экспертиза; утечка газа; газозвушное облако; расчет полей концентраций.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.36-42

Введение

Аварийные взрывы достаточно часто сопровождаются человеческими жертвами. В связи с этим возбуждается уголовное дело, процедура ведения которого полностью регламентируется юридическими законами. С учетом того что следователи не обладают необходимыми знаниями в области процессов горения, они наделены полномочиями назначать технического эксперта, который помог бы разобраться в причинах аварии. Таким образом, существует определенная последовательность расследования аварийного взрыва, сопровождавшегося гибелью людей [1, 2]:

- ликвидация последствий взрыва;
- возбуждение уголовного дела;
- сбор следователем данных об аварии и при необходимости привлечение технического эксперта.

Указанная последовательность расследования обуславливает определенные особенности расчетов, на которые опирается привлеченный следователем эксперт в своих выводах [3]. В частности, эксперт в своем анализе может опираться только на данные, собранные следователем с соблюдением всех юридических норм. Поскольку следователи, как правило, впервые сталкиваются с подобными делами, часть необходимых для расчетов исходных данных ими не фиксируется и, наоборот, определенные малозначащие для восстановления сценария развития аварии данные фиксируются с особой тщательностью. Кроме того, следует отметить, что определенная часть исходных данных, необходимых для расчетов, может быть уничтожена в результате взрыва или при ликвидации его последствий, а часть имеет достаточно расплывчатый характер, так как они осно-

© Комаров А. А., Корольченко Д. А., Громов Н. В., 2017

ваны на показаниях очевидцев [4, 5]. С учетом того что взрывная авария достаточно скоротечна, многие показания очевидцев малоинформативны. Более того, часть свидетелей аварии умышленно искажает картину произошедшей аварии с целью отвести подозрения от себя или своей организации. Перечисленные особенности накладывают определенный отпечаток на весь процесс технической экспертизы [6, 7]. В настоящей работе мы ставим цель на примере проведения экспертизы реальной взрывной аварии попытаться выделить некоторые особенности выполнения расчетов и назначения в расчетах начальных исходных данных. Из этических соображений некоторые, не относящиеся к технической стороне дела, подробности об аварии приводиться не будут.

Анализ аварии, результаты расчетов

Аварийный взрыв произошел ночью в середине сентября в результате утечек из трубопроводов, принадлежащих двум различным организациям. При взрыве погибло четыре человека, приехавших к месту утечек на автомобиле. Автомобиль сгорел полностью. В момент аварии была безветренная, ясная погода (по метеосводкам — полный штиль).

На схеме места аварии (рис. 1) видны три области горения над аварийными свищами в трубопроводах. В дальнейшем будем обозначать их: Ф1 — над этанопроводом (Д219, принадлежит организации 1), Ф2 и Ф3 — над трубопроводом (Д325, принадлежит организации 2).

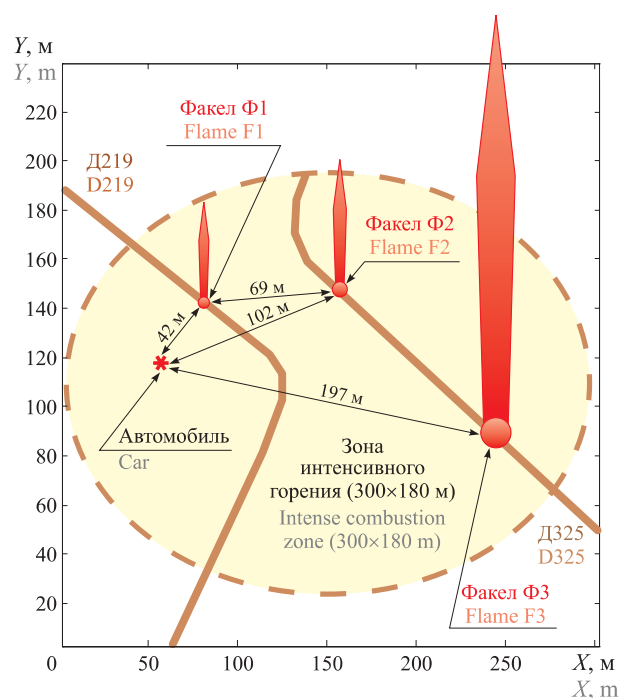


Рис. 1. Общая схема места аварии

Fig. 1. General diagram of the place of accident

Первоначальный вывод следователя заключался в том, что основной причиной аварии стала утечка газа из этанопровода. Такой вывод был мотивирован близостью факела Ф1 к месту сгоревшего автомобиля. Проведенная техническая экспертиза показала, что это не так: основной причиной аварийного взрыва послужили утечки с трубопровода (Д325), которые хотя и находились дальше, но имели большие расходы.

При численных расчетах процесса развития взрывной аварии принята расчетная область, приведенная на рис. 2. Перед проведением расчетов вероятного сценария развития взрывной аварии необходимо сделать следующие замечания. В связи с тем что достоверных данных по аварийным расходам над областями горения Ф1, Ф2 и Ф3, которые послужили причиной формирования взрывопожароопасного облака, нет, были проведены расчеты по имеющимся косвенным данным.

Для оценки аварийных расходов можно использовать два способа [8–10].

Первый способ основан на газодинамических соотношениях, описывающих процесс истечения газа из резервуара (трубы). Данный метод обладает тем недостатком, что не учитывает заглубления в грунт газопроводов и, соответственно, фильтрационных потерь давления и снижения расхода газа при его фильтрации через грунт на поверхность земли.

Второй способ основан на взаимосвязи площади фронта горения безнапорного факела с расходом газа. Другими словами, только при определенном расходе газа может сформироваться фронт горения заданной площади. При этом способе сложно точно определить площадь фронта горения на момент аварии и нормальную скорость горения смеси. Однако он позволяет с определенной точностью говорить о минимальных и максимальных расходах газа, необходимых для поддержания области горения определенных размеров [11, 12].

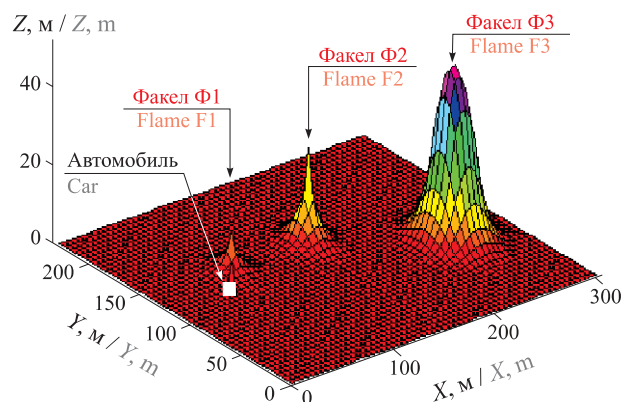


Рис. 2. Общий вид расчетной области с указанием мест расположения областей горения и поврежденного автомобиля
Fig. 2. General view of the calculated area indicated combustion zones and location of the damaged car

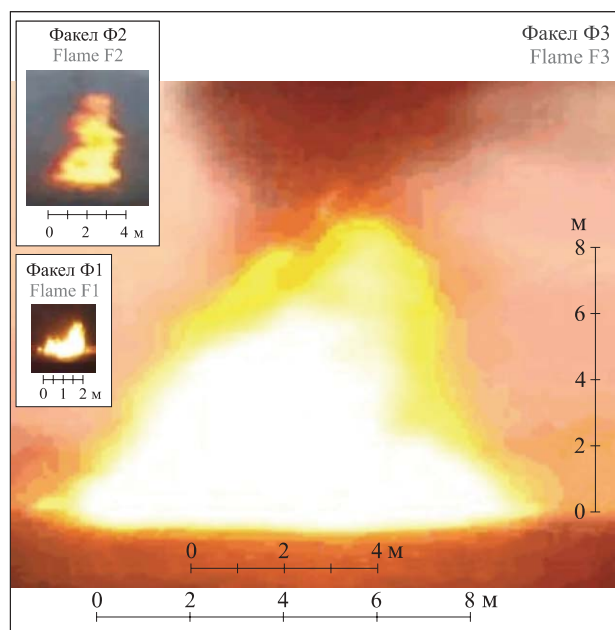


Рис. 3. Области горения Ф1, Ф2 и Ф3, приведенные к одному масштабу

Fig. 3. Combustion zones F1, F2 and F3 presented in the same scale

Приведем результаты расчетов, выполненных двумя указанными способами.

Фотографии трех областей горения, приведенных к одному масштабу, с указанием приблизительных размеров представлены на рис. 3.

Для области факельного горения Ф1 расходы газа Q_1 (л/с*), определенные по соотношениям для расхода газа из отверстия (первый способ), дают следующие результаты: $Q_1 = 4,6$ л/с при диаметре коррозионного отверстия $d_1 = 1,8$ мм и $Q_1 = 21,6$ л/с при $d_1 = 3,8$ мм (минимальный и максимальный диаметры аварийного коррозионного отверстия, фигурирующие в описаниях места осмотра).

Расчет расхода газа через размеры области горения Ф1 (второй способ) показал, что для формирования области горения с такими размерами необходим расход газа около 10 л/с.

Учитывая, что два различных способа определения расхода газа через свищ над областью горения Ф1 дали приблизительно одинаковые результаты, будем считать, что на момент аварии расход Q_1 составлял около 10 л/с.

Для областей горения Ф2 и Ф3 дело обстоит несколько сложнее. Считается, что на момент аварии трубопровод был отсечен заглушкой, в которой по неизвестной причине было отверстие диаметром 20 мм. По одной из версий по газопроводу транспортировались легкие углеводородные фракции

(этан, метан и т. д.). Исходя из этих данных, первым способом (с использованием формул, описывающих расход газа из отверстия в резервуаре) легко определить максимальный расход Q_2 (л/с), который мог попасть в атмосферу через 20-мм отверстие: он равен 99,6 л/с. Принимая площадь повреждения трубы над Ф2 $S_2 = 176,63$ мм², а площадь повреждения трубы над Ф3 — $S_3 = 936,26$ мм², получаем, что расход газа через свищ над областью горения Ф2 должен составлять $Q_2 = 15,8$ л/с, а над областью горения Ф3 — $Q_3 = 83,8$ л/с.

Размеры областей горения Ф2 и Ф3 (см. рис. 3) и их отношение к размеру факельного горения Ф1 никак не могут соответствовать полученным значениям расходов газа. Они должны быть существенно больше.

Определение расходов газа в областях горения Ф2 и Ф3, выполненные через размеры области горения (второй способ), показали, что зона горения Ф2 могла быть создана источником с расходом $Q_2 \geq 150$ л/с, а факела Ф3 — $Q_3 \geq 1500$ л/с. Данные расходы могут быть обеспечены двумя способами: 1) либо на момент аварии заглушка отсутствовала, а площадь коррозионного отверстия над факелом Ф2 составляла $S_2 \geq 550$ мм² (эквивалентный диаметр свища $d_2 \approx 26$ мм) и над факелом Ф3 — $S_3 \geq 5500$ мм² (эквивалентный диаметр свища $d_3 \approx 82$ мм); 2) либо в трубе присутствовали тяжелые углеводородные соединения в жидкой фазе. В пользу второго варианта говорит наличие значительного копчения на Ф3 и тот факт, что только тяжелые углеводороды создают стелющиеся взрывоопасные облака на значительных по площади территориях.

Опираясь на вышеизложенное, проведем численные расчеты процесса формирования взрывоопасного облака применительно к данной аварийной ситуации. В расчетах учитывалось наличие незначительного движения атмосферы ($W = 0,7$ см/с = 25 м/ч), на что указывает вытянутость области горения, которая имела место в результате аварии [10].

Был проведен расчет полей концентраций, которые образовались бы при утечке газа только из источника Ф1. Расход газа был принят $Q_1 = 10$ л/с (при $Q_1 = 10$ л/с эквивалентный диаметр свища $d_1 = 2,6$ мм). Это значение соответствует имевшим место при аварии размеру факела Ф1, параметрам свища (площади свища) и параметрам продукта в этанопроводе (давление, плотность и состав газовой смеси). Принятое в расчетах значение расхода из источника Ф1 $Q_1 = 10$ л/с можно считать достаточно обоснованным, так как оно было определено двумя независимыми способами (через соотношения для истечения газа из отверстия и через размеры области горения). Расчеты показали, что максимальная концентрация газа вблизи автомобиля при утечке газа

* В дальнейшем будем использовать объемный расход газа при нормальных условиях, так как именно он необходим при расчетах объемной концентрации газа в газозвушной смеси.

только из источника Ф1 составляет не более 0,22–0,24 % об. При подобных концентрациях воспламенение газовой смеси принципиально невозможно [11].

Был проведен расчет полей концентраций при утечке газа из всех трех источников (Ф1, Ф2 и Ф3). Уровни равных концентраций приведены на рис. 4.

Расход источников был принят из условия, что на момент аварии на трубопроводе (ДЗ25), который был причиной формирования двух факелов Ф2 и Ф3, была установлена заглушка с отверстием диаметром 20 мм, а по трубопроводу транспортировались легкие углеводороды. При таком сценарии расход из источника Ф2 составил бы $Q_2 = 15,8$ л/с, а над областью горения Ф3 — $Q_3 = 83,8$ л/с. Суммарный расход из двух источников при таком сценарии был бы равен 99,6 л/с.

Основной вывод, который следует из выполненных расчетов, заключается в следующем. Данный сценарий полностью исключается по трем основным причинам. Во-первых, создаваемые утечками из газопровода факелы Ф2 и Ф3 должны быть существенно меньше, чем наблюдались при аварии. Во-вторых, области возможного воспламенения облаков от источника Ф1 и источников Ф2 + Ф3 не пересекаются (существуют две независимые области,

см. рис. 4), поэтому возгорание одного из облаков не привело бы к распространению пламени на соседнее. В-третьих, зона возгорания, наблюдавшаяся при аварии, была существенно больше. Кроме того, воспламенение смеси (при данном сценарии развития аварии) полностью исключено при появлении источника зажигания внутри или вблизи автомобиля. Концентрация газа вблизи автомобиля не превысила бы 0,6 % об., что полностью исключает возможность его воспламенения.

Был проведен расчет формирования газовой смеси при условии, что расходы газа из источников Ф2 и Ф3 соответствовали бы размерам наблюдавшихся при аварии факелов. Расчеты по определению расходов газа в областях горения Ф2 и Ф3, выполненные ранее через размеры областей горения, показали, что источник Ф2 должен иметь расход $Q_2 \geq 150$ л/с, а источник Ф3 — $Q_3 \geq 1500$ л/с. Только при таких расходах (не меньше) размеры областей горения соответствовали бы имевшим место при аварии факелам.

На рис. 5 приведены уровни равных концентраций газа, которые образовались бы в атмосфере при принятой утечке газа.

Под областью горения (III на рис. 5) понимается область с концентрацией газа выше 5 % об. Для боль-

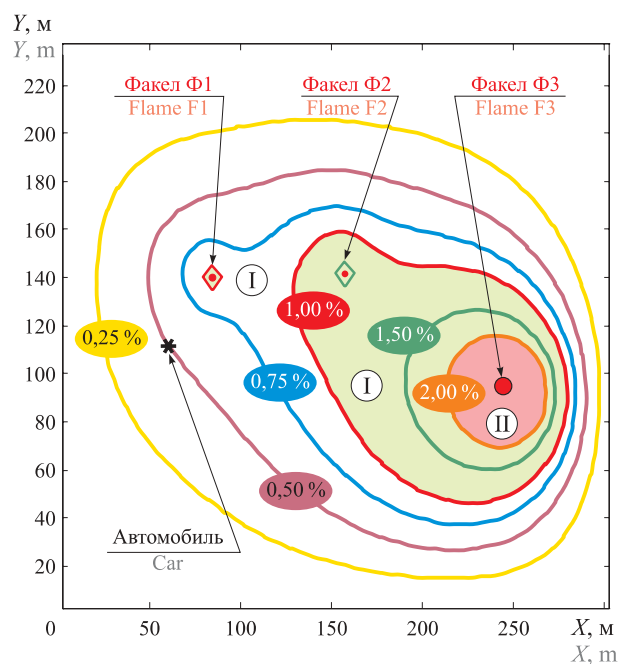


Рис. 4. Уровни равных концентраций при утечке газа из источников Ф1, Ф2 и Ф3 при $Q_1 = 10$ л/с, $Q_2 = 15,8$ л/с, $Q_3 = 83,8$ л/с и незначительном движении атмосферы в сторону автомобиля $W = 25$ м/ч: I — область возможного воспламенения смеси; II — область взрывного горения

Fig. 4. Levels of equivalent concentration of a gas leakage in F1, F2 and F3 zones, when $Q_1 = 10$ l/s, $Q_2 = 15,8$ l/s, $Q_3 = 83,8$ l/s and motion of the atmosphere towards the car is insignificant ($W = 25$ m/h): I — area of possible ignition; II — area of explosive burning

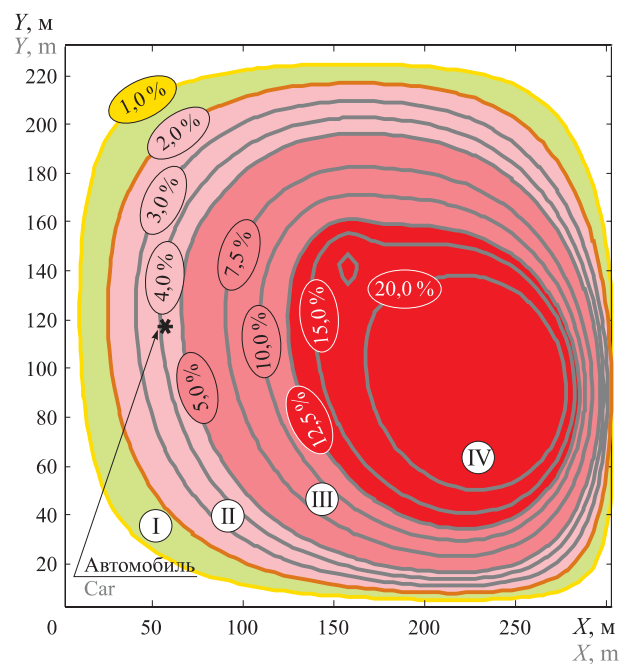


Рис. 5. Уровни равных концентраций при утечке газа из источников Ф1, Ф2 и Ф3 при $Q_1 = 10$ л/с, $Q_2 = 150$ л/с, $Q_3 = 1500$ л/с и $W = 25$ м/ч: I — область возможного воспламенения смеси; II — область взрывного горения; III — область горения; IV — область пожара

Fig. 5. Levels of equivalent concentration of a gas leakage in F1, F2 and F3 zones, when $Q_1 = 10$ l/s, $Q_2 = 150$ l/s, $Q_3 = 1500$ l/s and the motion of atmosphere is insignificant ($W = 25$ m/h): I — area of possible ignition; II — area of explosive burning; III — area of combustion; IV — fire

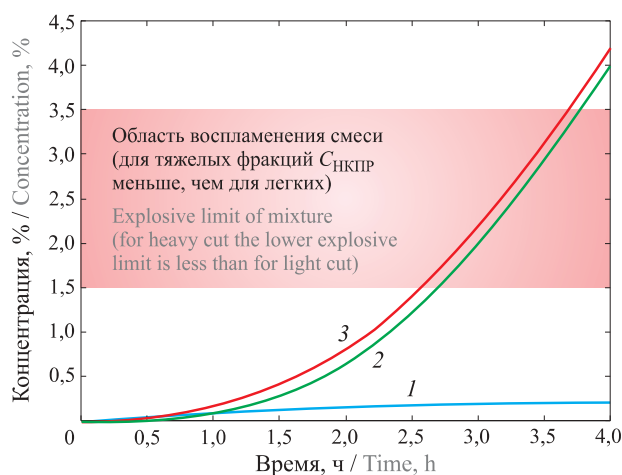


Рис. 6. Временная зависимость концентрации газа вблизи автомобиля при утечке: 1 — только из источника Ф1; 2 — из источников Ф2 и Ф3; 3 — из источников Ф1, Ф2 и Ф3; $Q_1 = 10$ л/с, $Q_2 = 150$ л/с, $Q_3 = 1500$ л/с

Fig. 6. Time-dependent change of concentration of the gas leakage occurred near the car: 1 — only from F1 source; 2 — from F2 and F3 sources; 3 — from F1, F2 and F3 sources; $Q_1 = 10$ l/s, $Q_2 = 150$ l/s, $Q_3 = 1500$ l/s

шинства углеводородов (особенно тяжелых) данная концентрация превышает верхний концентрационный предел распространения пламени (ВКПР) и горение смеси не носит явно выраженный взрывной характер, а растянуто по времени, так как оно происходит по мере поступления в область горения кислорода. Под областью пожара (IV на рис. 5) понимается область с концентрацией газа более 12,5 % об., которая выше ВКПР всех углеводородов. Горение носит характер “огневого шторма” или “огневого шара”. Время его существования достаточно велико, поэтому можно говорить о пожаре. Область горения при таком сценарии развития аварии соответствует области горения, наблюдавшейся в действительности.

Были проведены расчеты для определения роли источника Ф1 в формировании газовоздушного об-

лака. На рис. 6 представлена временная зависимость концентрации газа вблизи автомобиля для нескольких вариантов развития аварии — при утечке только из источника Ф1; из источников Ф2 и Ф3; из всех трех источников (Ф1, Ф2 и Ф3). Из расчетов следует, что влияние источника Ф1 на концентрационный состав газовоздушной смеси вблизи автомобиля крайне мало.

Выводы

На основании проведенных расчетов были сделаны следующие выводы.

1. Сценарий, который предполагает, что на газопроводе (Д325) была установлена заглушка с отверстием диаметром 20 мм, а по газопроводу транспортировались легкие углеводороды, полностью исключается. При данном сценарии развития аварии воспламенение смеси внутри или вблизи автомобиля невозможно.

2. Расчеты по определению расходов газа в областях горения показали, что источник Ф2 должен иметь расход $Q_2 \geq 150$ л/с, а источник Ф3 — $Q_3 = 1500$ л/с. Только при таких расходах (не меньше) размеры областей горения соответствовали бы имевшим место при аварии факелам.

3. Расчет формирования газовоздушного облака при условии, что расходы газа из источников Ф2 и Ф3 соответствовали бы размерам наблюдавшихся при аварии факелов ($Q_2 = 150$ л/с и $Q_3 = 1500$ л/с), показал, что при данных расходах расчетная картина взрывной аварии соответствует наблюдавшейся в действительности.

4. Сравнительный анализ концентрационных полей, создаваемых источниками Ф1, Ф2 и Ф3, показал, что роль источника Ф1 (Д219), имеющего относительно малый расход, практически не оказывает никакого влияния на формирование газовоздушного облака и на весь ход развития аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котляревский В. А. Прогнозирование последствий аварий на объектах нефтегазодобычи // Безопасность России. Безопасность строительного комплекса. — М.: Знание, 2012. — С. 739–750.
2. Таубкин С. И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. — М.: ВНИИПО, 1999. — 600 с.
3. Комаров А. А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения: дис. ... д-ра техн. наук. — М.: МГСУ, 2001. — 492 с.
4. Казеннов В. В. Динамические процессы дефлаграционного горения во взрывоопасных зданиях и помещениях: дис. ... д-ра техн. наук. — М.: МГСУ, 1997. — 445 с.
5. Герасев М. А., Григорьева Т. Ю. Оценка последствий аварийного взрыва на АЗС и определение зон поражения // Успехи современного естествознания. — 2012. — № 6. — С. 179.
6. Мишуев А. В., Комаров А. А., Хуснутдинов Д. З. Общие закономерности развития аварийных взрывов и методы снижения взрывных нагрузок до безопасного уровня // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2001. — Т. 10, № 6. — С. 8–19.

7. *Molkov V., Shentsov V.* Numerical and physical requirements to simulation of gas release and dispersion in an enclosure with one vent // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2014. — Vol. 39, Issue 25. — P. 13328–13345. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.154.
8. *Сулименко В. А., Комаров А. А., Васюков Г. В., Загуменников Р. А.* Особенности расчета параметров процесса возникновения взрывоопасных смесей при аварийных ситуациях // *Технологии техносферной безопасности : интернет-журнал*. — 2015. — № 4(62). — С. 109–116.
9. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. — 4-е изд. — М. : Наука, 1988. — 733 с.
10. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. Годунова С. К. — М. : Наука, 1976. — 400 с.
11. *Komarov A., Bazhina E., Bobrov Yu.* Relationship between gas-dynamic flows and impacts of emergency explosions indoors // *MATEC Web of Conferences*. 5th International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education”. — 2016. — Vol. 86. — Article No. 04048. DOI: 10.1051/mateconf/20168604048.
12. *Molkov V., Kashkarov S.* Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: Stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2015. — Vol. 40, Issue 36. — P. 12581–12603. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.001.

Материал поступил в редакцию 25 февраля 2017 г.

Для цитирования: *Комаров А. А., Корольченко Д. А., Громов Н. В.* Особенности гидродинамических расчетов при проведении технической экспертизы аварийного взрыва // *Пожаро-взрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 36–42. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.36-42.

English

FEATURES OF THE HYDRODYNAMIC CALCULATIONS FOR TECHNICAL EXPERTISE OF ACCIDENTAL EXPLOSION

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

KOROLCHENKO D. A., Candidate of Technical Sciences, Director of Institute of Complex Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: ikbs@mgsu.ru)

GROMOV N. V., Candidate of Technical Sciences, Chief of Laboratory STC “Vzryvoustoychivost” (Explosion stability), National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: newdayru@bk.ru)

ABSTRACT

This paper presents some features of calculations to analyze the accident and to determine the values for calculations of primary source data on the basis of technical expertise of accidental explosion on ethane supply pipeline. The accident development scenario is shown and the measures of responsibility for involved parties are established. Before numerical calculation of the probable scenario of the accidental explosion it have been estimated the emergency consumption of gases. Two methods of estimation of emergency consumption are presented. The first one is based on the gas-dynamic ratios describing its leakage from pipeline, and the second one is describing interrelation of the area of free-flow flame front with gas consumption value. The relevant calculation results are presented. Numerical calculations of explosive cloud formation in relation to particular accident are also presented. Calculation of concentration fields which could appear in case of gas leakage is shown. The conclusion is that modelled accidental explosion relevant to real one only if the values of gas consumption have been calculated for various combustion zones according to their dimensions.

It has been established that the flames generated by leakages from gas pipeline have to be significantly less than it were observed during accident, and areas of possible ignition of clouds formed by different sources do not overlap. It has been determined that ignition of one gas cloud couldn't lead to spreading of the flame on near-by cloud and the ignition area observed during accident could be significantly larger. It is shown that ignition of the air-gas mixture in such accident is completely excluded when the source of ignition inside or near the car because the concentration of gas near the car can't exceed 0.6 %. The time dependence of gas concentration near the car is given for several scenarios of the accident. The impact of ignition source on formation of air-gas clouds and on the accident development taking into account the data of comparative analysis of concentration fields formed by various sources is shown.

Keywords: accidental explosion; technical expertise; gas leakage; air-gas cloud; calculation of concentration fields.

REFERENCES

1. Kotlyarevskiy V. A. Prognosis of the accident consequences on objects of oil and gas production. In: *Bezopasnost Rossii. Bezopasnost stroitel'nogo kompleksa* [Safety of Russia. Safety of the construction complex]. Moscow, Znaniye Publ., 2012, pp. 739–750 (in Russian).
2. Taubkin S. I. *Pozhar i vzryv, osobennosti ikh ekspertizy* [Fire and explosion, special features of their expert examination]. Moscow, VNIPO Publ., 1999. 600 p. (in Russian).
3. Komarov A. A. *Prognosis of loadings of deflagration explosions and assessment of their consequences for buildings and constructions*. Dr. tech. sci. diss. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, 2001. 492 p. (in Russian).
4. Kazennov V. V. *Dynamic processes of deflagration burning inside explosive buildings and premises*. Dr. tech. sci. diss. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, 1997. 445 p. (in Russian).
5. Gerashev M. A., Grigoryeva T. Yu. Assessment of consequences of the emergency explosion occurred at fuel station and definition of exposure areas. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya / Advances in Current Natural Sciences*, 2012, no. 6, p. 179 (in Russian).
6. Mishuev A. V., Komarov A. A., Khusnutdinov D. Z. General regularities of development of accidental explosions and methods of reducing of explosion loadings to the safe level. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2001, vol. 10, no. 6, pp. 8–19 (in Russian).
7. Molokov V., Shentsov V. Numerical and physical requirements to simulation of gas release and dispersion in an enclosure with one vent. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, issue 25, pp. 13328–13345. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.154.
8. Sulimenko V. A., Komarov A. A., Vasjukov G. V., Zagumennikov R. A. Features of calculation of parameters the occurrence of explosive mixtures at emergency. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet-zhurnal / Technology of Technosphere Safety. Internet-Journal*, 2015, no. 4(62), pp. 109–116 (in Russian).
9. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika. Tom 6. Gidrodinamika* [Theoretical physics. Vol. 6. Hydrodynamics]. 4th ed. Moscow, Nauka Publ., 1988. 733 p. (in Russian).
10. Godunov S. K. (ed.). *Chislennoye resheniye mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 400 p. (in Russian).
11. Komarov A., Bazhina E., Bobrov Yu. Relationship between gas-dynamic flows and impacts of emergency explosions indoors. In: *MATEC Web of Conferences. 5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education"*, 2016, vol. 86, article No. 04048. DOI: 10.1051/mateconf/20168604048.
12. Molokov V., Kashkarov S. Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: Stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40, issue 36, pp. 12581–12603. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.001.

For citation: Komarov A. A., Korolchenko D. A., Gromov N. V. Features of the hydrodynamic calculations for technical expertise of accidental explosion. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 36–42 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.36-42.

В. Н. ФИЛИППОВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры "Вагоны и вагонное хозяйство", Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

В. Г. ПОПОВ, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой "Химия и инженерная экология", Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

С. В. БЕСПАЛЬКО, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры "Вагоны и вагонное хозяйство", Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; e-mail: besp-alco@yandex.ru)

Ю. Н. ШЕБЕКО, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела пожарной безопасности промышленных объектов, технологий и моделирования техногенных аварий, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

В. Ю. НАВЦЕНЯ, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры "Управление безопасностью в техносфере", Российский университет транспорта (МИИТ) (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

УДК 614.841.12

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ЦИСТЕРН ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ СЖИЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Представлены результаты многолетних исследований, проводившихся в Московском государственном университете путей сообщения совместно с ВНИИПО и другими организациями и посвященных обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн для сжиженных углеводородных газов. Исследования включали теоретические и экспериментальные исследования аварийных ситуаций, связанных с динамическими нагрузками и тепловыми воздействиями. Разработаны методики расчета с уточнением параметров расчетных схем по экспериментальным данным. Предложены средства защиты в виде предохранительных клапанов, огнезащитных покрытий, дуг безопасности, а также выбраны параметры контрольной, сливноналивной и предохранительной арматуры. Теоретически и экспериментально обоснована эффективность их применения. Спроектировано семейство цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов, которые были изготовлены на предприятиях России, Украины, Японии, Польши.

Ключевые слова: пожаровзрывобезопасность; железнодорожная цистерна; сжиженные углеводородные газы; аварийная ситуация; средства защиты; тепловые воздействия; предохранительный клапан; дуги безопасности; огнезащитное покрытие.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49

Введение

Вот уже более 30 лет МИИТ проводит исследования по обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн совместно с организациями атомной, оборонной промышленности и др. В качестве объекта исследований в первую очередь рассматриваются цистерны для сжиженных углеводородных газов (СУГ) как наиболее опасный вид подвижного состава. Результаты этих исследований были опубликованы в работах [1–22], а в настоящей работе изложены обобщенные результаты данных исследований.

При изучении многочисленных аварийных ситуаций было выявлено, что их главными причинами являются: несовершенство конструкции, в том

числе автосцепных устройств и арматуры; ошибки персонала и т. п. На основе статистических данных были определены сценарии аварийных ситуаций. Установлено, что аварийные ситуации могут происходить как в пределах станций, так и на перегонах, и в зависимости от места аварии были определены тепловые режимы. При этом в качестве критерия для оценки конструкций было принято время безопасного пребывания в очаге пожара до взрыва (разрушения), что призвано обеспечить необходимое время для развертывания формирований противопожарной службы.

При выработке мероприятий по минимизации аварийных ситуаций в части автосцепного устрой-

ства в качестве возможных технических средств защиты было установлено, что такие цистерны должны иметь эффективные поглощающие аппараты, а также предохранители от саморасцепа. Эффективность предложенных технических решений была доказана экспериментальным и расчетным путем.

Результаты исследований пожаровзрывобезопасности цистерн

В части непосредственной защиты от тепловых воздействий были предложены различные варианты технических средств защиты, в том числе предохранительные клапаны, огнезащитные покрытия и др. При этом для моделирования аварийных режимов и выбора рациональных параметров устройств были разработаны математические модели, реализованные в виде пакета программ для ЭВМ. При отработке методики расчета была проведена серия модельных экспериментов с применением теории подобия. По результатам экспериментов было установлено удовлетворительное соответствие результатов теоретических моделей и экспериментов.

В части состояния котлов цистерн для СУГ была обследована группа цистерн, находившихся длительное время (до 30 лет) в эксплуатации. Были оценены прочностные свойства котла как основного элемента. Выявлено отсутствие заметных коррозионных повреждений котла при перевозке углеводородных газов. В экспериментах были определены значения давления в котле, приводящие к его разрушению. Было установлено также, что наиболее опасными зонами являются поддон и место крепления лап со сливными выштамповками. По результатам ресурсных испытаний было сформулировано требование, в соответствии с которым при изготовлении цистерн для СУГ нового поколения необходимо обеспечивать 100 %-ный контроль качества сварных швов.

Проведенные испытания позволили конструктивно переработать наиболее нагруженные элементы котла, что обеспечило более рациональное распределение материала с точки зрения необходимой прочности при минимальном весе. В результате была принята к серийному производству конструкция котла без сливного поддона и с дифференцированной толщиной.

В рамках работ по обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки СУГ была предложена версия переработанной контрольной, сливноналивной и предохранительной арматуры с использованием конструктивных решений, принятых в атомном машиностроении. В частности, в контрольных вентилях, разрабатываемых «АтомАрм-Проектом» (г. Великий Новгород), предполагается использовать сильфонные запоры вместо традиционных сальниковых уплотнений. Кроме того, при-

менявшийся ранее классический вентиль с клапаном заменен на шаровой кран, при изготовлении которого использованы современные материалы, в том числе нержавеющая сталь. Применение нержавеющей стали и современных уплотнений в шарнирных кранах позволило повысить межремонтный ресурс с 1 до 2 лет безопасной эксплуатации, что резко снизило затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Для определения динамических режимов воздействия на сливноналивную арматуру были проведены специальные испытания. По их результатам была рекомендована новая компоновка сливноналивных труб, повернутых на 90° относительно продольной оси котла, с раскреплением двух сливных труб раскосами в виде фермы. Такое решение позволило существенно снизить вероятность обрыва элементов сливноналивной арматуры.

Важным фактором обеспечения безопасности в условиях теплового воздействия на котел являются конструкция и параметры предохранительных клапанов. По международным стандартам в правилах расчета и проектирования установлено, что диаметр проходного сечения предохранительного клапана должен зависеть от вместимости котла. Такой подход при переходе на выпуск цистерн с увеличенной вместимостью (до 95 м³), по существу, должен был привести к увеличению числа предохранительных клапанов. При этом было установлено, что существующий предохранительный клапан с проходным сечением типа ДУ 32 не обеспечивает пребывание котла в очаге пожара при расчетных аварийных тепловых воздействиях.

На основании результатов модельных экспериментов были разработаны теоретические модели, позволяющие учесть увеличение объема жидкой фазы при тепловых воздействиях на котел и обосновать режим сброса через предохранительный клапан не газовой, а жидкой фазы. Такой подход предъявляет принципиально иные требования к выбору рациональных параметров предохранительных клапанов.

С помощью реализованных на ЭВМ теоретических моделей были выполнены расчеты процесса пожара с учетом работы предохранительного клапана. При расчетах варьировались: вид сжиженного газа, параметры работы предохранительного клапана, толщины огнезащитного покрытия и теплоизоляции, а также степень аварии. Результаты расчета одного варианта показаны на рис. 1. При этом в соответствии с разработанными сценариями аварийных ситуаций [5] различаются:

- авария 1-й степени — огневое воздействие в течение 24 ч на верхнюю зону котла площадью 7 м² при тепловом потоке 100 кВт/м²;

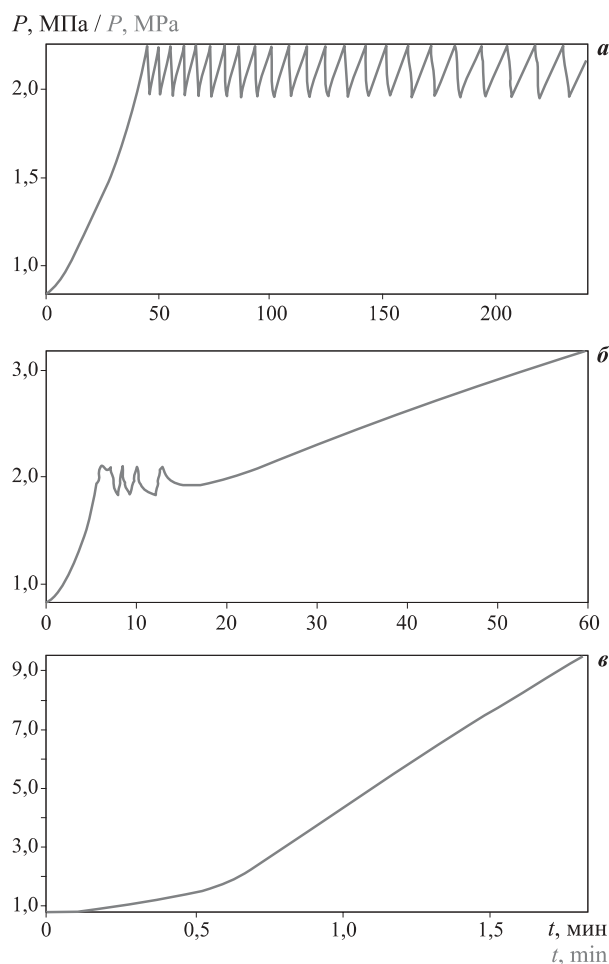


Рис. 1. Зависимость давления СУГ от времени при аварии 1 (а), 2 (б) и 3-й (в) степени

Fig. 1. Dependence of an LPG pressure on time at the accident of the 1st (a), 2nd (b) and 3rd (v) degree

- авария 2-й степени — огневое воздействие в течение 1 ч на нижнюю зону котла площадью 50 м² при тепловом потоке 100 кВт/м²;
- авария 3-й степени — огневое воздействие в течение 2 ч на всю поверхность котла при тепловом потоке 400 кВт/м².

По результатам расчетов были определены параметры нового варианта предохранительного клапана — с увеличенным диаметром проходного сечения. Такие клапаны были разработаны “Атом-АрмПроектом” и испытаны на стендовой базе “Атом-АрмПроекта” и в ЦКБА (г. Санкт-Петербург) (рис. 2). При испытаниях были учтены результаты проведенных ранее натурных экспериментов на цистернах. Было признано целесообразным рекомендовать установку двух предохранительных клапанов на цистерну вместимостью до 95 м³. Один из таких клапанов штатный, имеющий относительно малый диаметр проходного сечения и расположенный по штатной схеме на крышке люка-лаза. Он должен изготавливаться из современных материалов, включая нержавеющую сталь и пружины со стабильными



Рис. 2. Предохранительный клапан и дуги безопасности на цистерне

Fig. 2. Safety relief valve and safety arcs on the tank

жесткостными характеристиками в течение всего периода эксплуатации.

Предохранительный клапан увеличенного сечения разрабатывался и испытывался в двух вариантах, один из которых предусматривает применение разрывных мембран. Срабатывание клапана и мембран должно происходить при аварийном тепловом воздействии по достижению внутреннего давления 30 атм. Установка такого предохранительного клапана осуществляется в зоне расположения дуг безопасности новой конструкции.

Конструкция дуг безопасности (см. рис. 2) с вариантами их установки разрабатывалась для цистерн с котлами различного диаметра. Такой подход позволяет снизить вероятность повреждения котла в зоне сопряжения с дугами безопасности. На основе экспериментов со сходами цистерн с высокой насыпи были разработаны требования проектирования дуг и узлов для связи элементов дуг с оболочкой.

На основе результатов расчетов и модельных испытаний по определению времени пребывания цистерны в очаге пожара были разработаны, испытаны на моделях и запущены в серийное производство огнезащитные покрытия, обеспечивающие увеличение в 2,5–3,5 раза времени безаварийного пребывания цистерны в очаге пожара. Эти исследования проводились при участии специалистов Московского института теплотехники. В качестве огнезащитного покрытия использовались покрытия типа СГК. В испытаниях применялись опытные модели в виде заземленных пластин с различными вариантами огнезащитного покрытия и воздействия тепла. Полученные результаты позволили уточнить параметры расчетных схем для теоретической оценки поведения котла в очаге пожара.

На основе всего комплекса проведенных испытаний было разработано семейство цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов, изготов-



Рис. 3. Цистерна нового поколения для перевозки СУГ
Fig. 3. New type of the railway tank for the LPG transportation

ление которых осуществлялось на предприятиях России, Украины, Японии, Польши. В наиболее полном объеме все предложения по обеспечению пожаровзрывобезопасности были реализованы в цистернах модели 15-9503-АВП, изготовленных в г. Мариуполе (рис. 3).

Выводы

Таким образом, результаты многолетних экспериментальных и теоретических исследований, которые проводили МИИТ, ВНИИПО совместно с другими организациями, позволили решить важную проблему по обеспечению пожаровзрывобезопасности цистерн для сжиженных углеводородных газов.

Для этого были разработаны и внедрены новые конструкторские решения и технические средства, а именно: предохранительные клапаны, огнезащитные покрытия, модернизированные варианты контрольной, сливоналивной и предохранительной арматуры, новая компоновка сливоналивных труб, конструкция дуг безопасности и узлов их крепления. Это нашло применение в новом семействе цистерн для перевозки СУГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смольянинов А. В., Филиппов В. Н. Транспортировка опасных грузов // Железнодорожный транспорт. — 1990. — № 7. — С. 31–33.
2. Дмитриев В. В., Филиппов В. Н., Канивец Р. Ф., Смольянинов А. В. Совершенствование цистерн для сжиженного газа // Железнодорожный транспорт. — 1991. — № 8. — С. 46–48.
3. Filippow W. N., Stanislaw K. Badania prototypowych urzadzen, ochraniajacych armature i dennice wagonow-cystern w awaryjnych sytuacjach // Przegląd Kolesowy. — 1993. — No. 8. — P. 31–33 (in Polish).
4. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов : справоч. пособие / Под ред. Котуранова В. Н., Филиппова В. Н. — М. : Изд-во стандартов, 1993. — 214 с.
5. Шебеко Ю. Н., Шевчук А. П., Смолин И. М., Филиппов В. Н., Черноплеков А. Н., Бородкин А. Н., Симонов О. А., Гуринович Л. В. Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом. 1. Постановка задачи и рассмотрение типовых сценариев аварии // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 1992. — Т. 1, № 4. — С. 46–51.
6. Шевчук А. П., Присадов В. И., Косачев А. А., Филиппов В. Н., Иванов В. А. Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом. 3. Снижение пожаровзрывоопасности железнодорожных цистерн со сжиженным углеводородным газом // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 1993. — Т. 2, № 3. — С. 35–38.
7. Корольченко А. Я., Горшков В. И., Земский Г. Т., Филиппов В. Н., Шебеко Ю. Н. Правила пожарной безопасности при перевозке в железнодорожных цистернах сжиженных углеводородных газов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 1993. — Т. 2, № 3. — С. 39–42.
8. Филиппов В. Н., Радзиховский Е. А. Исследование поведения вагонов при аварийном соударении // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 1994. — № 3. — С. 9–12.
9. Филиппов В. Н., Канивец Р. Ф., Шмыров Ю. А., Дмитриев В. В., Скуратов А. Е. Повышение эксплуатационной надежности цистерн для сжиженных газов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 1995. — № 6–8.
10. Смольянинов А. В., Филиппов В. Н. Методика расчета и проектирования дуг безопасности котлов цистерн // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта : труды II Международной научно-технической конференции. — М. : МИИТ, 1996. — Т. I. — С. 86.
11. Корольченко А. Я., Шебеко Ю. Н., Филиппов В. Н. О влиянии огнезащитного покрытия на поведение резервуаров со сжиженными углеводородными газами в очаге пожара // Пожарная безопасность. История, состояние, перспективы : материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции. — М. : ВНИИПО МВД РФ, 1997. — Ч. 2. — С. 271–273.
12. Шебеко Ю. Н., Филиппов В. Н., Горшков В. И. Исследование влияния вспучивающегося огнезащитного покрытия на поведение резервуаров со сжиженными углеводородными газами в очаге пожара // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 1998. — Т. 7, № 1. — С. 24–32.
13. Шебеко Ю. Н., Филиппов В. Н., Навзена В. Ю., Костюхин А. К., Токарев П. М., Замышевский Э. Д. Способы противопожарной защиты резервуаров со сжиженными углеводородными газами // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 1999. — Т. 8, № 4. — С. 33–42.

14. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N., Navzenya V. Yu., Kostyuhin A. K., Tokarev P. M., Zamishhevski E. D. An investigation of some methods for fire protection of LPG vessels // Conference Proceedings of Interflame'99, 8th International Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, UK, 29 June – 1 July, 1999. — London : Interscience Communications Ltd., 1999. — P. 1141–1146.
15. Шебеко Ю. Н., Филиппов В. Н., Болодьян И. А. Исследование различных способов противопожарной защиты резервуаров со сжиженными углеводородными газами // Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков : материалы XV научно-практической конференции. — М., 1999. — С. 132–133.
16. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N., Navzenya V. Yu., Kostyuhin A. K., Tokarev P. M., Zamishhevski E. D. Explosion prevention of LPG vessels using fire retardant coatings and safety valves // 5th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Shanghai, October 24–29, 1999. — International Academic Publishers, 1999. — P. 215–226.
17. Шебеко Ю. Н., Филиппов В. Н., Токарев П. М. Исследование способов защиты железнодорожных цистерн для перевозки СУГ от воздействия тепловых нагрузок в условиях пожара // Безопасность движения поездов : сб. тр. — М. : МПС МИИТ, 1999. — С. IV-17–IV-18.
18. Филиппов В. Н., Недорчук Б. Л., Козлова Д. И., Скуратов А. Е. Повышение экологической безопасности перевозок жидких опасных грузов в железнодорожных цистернах за счет предотвращения утечек // Безопасность движения поездов : сб. тр. — М. : МПС МИИТ, 2000. — Книга II. — С. V-19.
19. Nedorchuk B. L., Filippow V. N., Shebeko Yu. N. General technical requirements for safety of railway tanks for transportation of hazardous materials // Pojazdy szynowe na przelomie wikow. — Krakow : Arlamow, 2000. — Vol. 1. — P. 197–203 (in Polish).
20. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N. Investigations of methods for fire protection of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases // Pojazdy szynowe na przelomie wikow. — Krakow : Arlamow, 2000. — Vol. 3. — P. 109–118 (in Polish).
21. Шебеко Ю. Н., Назаренко В. А., Филиппов В. Н., Навценя В. Ю., Костюхин А. К., Замышевский Э. Д., Головин В. В., Беспалько С. В. Экспериментальное исследование поведения тонкостенной оболочки в очаге пламени // Пожарная безопасность. — 2004. — № 2. — С. 71–73.
22. Страхов В. П., Крутов В. М., Шебеко Ю. Н. О возможности использования конструктивной огнезащиты для перевозки грузов в железнодорожных цистернах // Безопасность движения поездов : сб. тр. — М. : МИИТ, 2005. — С. VII-24–VII-25.

Материал поступил в редакцию 13 сентября 2017 г.

Для цитирования: Филиппов В. Н., Попов В. Г., Беспалько С. В., Шебеко Ю. Н., Навценя В. Ю. Результаты комплексных исследований пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 43–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49.

English

RESULTS OF COMPLEX RESEARCHES OF FIRE AND EXPLOSION SAFETY OF RAILWAY TANKS FOR TRANSPORTATION OF LIQUEFIED PETROLEUM GASES

FILIPPOV V. N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation)

POPOV V. G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Chemistry and Engineering Ecology Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation)

BESPALKO S. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Cars and Carriage Economy Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation; e-mail: besp-alco@yandex.ru)

SHEBEKO Yu. N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Department of Fire Safety of Industrial Facilities, Technologies and Modeling of Technogenic Accidents, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

NAVTSENYA V. Yu., Doctor of Technical Sciences, Senior Research Associate, Professor of Management of Safety in a Technosphere Department, Russian University of Transport (MIIT) (Obraztsova St., 9, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation)

ABSTRACT

This study is dedicated to a description of results of complex investigations on fire and explosion safety of railway tanks for a transportation of liquefied petroleum gases (LPG) carried out by Moscow state railway university together with organizations of various branches of industry.

The main types of accidents were determined on a basis of statistical data.

There were carried out experimental and theoretical investigations of a railway tanks behavior at various accidental regimes connected with various dynamical and thermal actions on these tanks. Numerous experiments were carried out on large scale facilities and on small scale facilities with an application of the theory of similarity. Experimental results were used both for a verification of the theoretical models and for more accurate definition of parameters of numerical schemes.

Mathematical models created at the theoretical investigations were used for a software and a following determination of tools for the railway tanks protection.

Measures for a risk reduction and a diminishing of consequences were proposed on the basis of the investigations. Safety relief valves, fire retardant coatings and special controle valves were used for a thermal protection. It was shown that the SGK fire retardant coating can increase a critical time of an action of the fire on the railway tank on 2.5–3.5 times.

A new configuration of loading pipelines was proposed which allowed to decrease substantially a probability of a rupture of the loading facilities. A new configuration of safety arcs was proposed which decreases remarkably a probability of a destruction of the loading valves at accidents with an overturning of the tank.

New safety types of the railways for the LPG transportation were created which are now built in Russia, Ukraine, Japan, Poland.

Keywords: fire and explosion safety; railway tank; liquefied petroleum gases; emergency; means of protection; thermal influences; safety valve; safety arcs; fireproofing coating.

REFERENCES

1. Smolyaninov A. V., Filippov V. N. Transportation of hazardous goods. *Zheleznodorozhnyy transport / Railway Transport*, 1990, no. 7, pp. 31–33 (in Russian).
2. Dmitriev V. V., Filippov V. N., Kanivets R. F., Smolyaninov A. V. An improvement of railway tanks for liquefied petroleum gases. *Zheleznodorozhnyy transport / Railway Transport*, 1991, no. 8, pp. 46–48 (in Russian).
3. Filippow W. N., Stanislaw K. Badania prototypowych urzadzen, ochraniajacych armature i dennice wagonow-cystern w awaryjnych sytuacjach. *Przegląd Kolesowy*, 1993, no. 8, pp. 31–33 (in Polish).
4. Koturanov V. N., Filippov V. N. (eds.). *Spetsializirovannyye tsisterny dlya perevozki opasnykh gruzov: spravochnik. posobiye* [Special railway tanks for transportation of hazardous goods. Reference book]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1993. 214 p. (in Russian).
5. Shebeko Yu. N., Shevchuk A. P., Smolin I. M., Filippov V. N., Chernoplekov A. N., Borodkin A. N., Simonov O. A., Gurinovich L. V. Fire and explosion safety of LPG transportation by a railway. 1. Preliminary consideration and typical accident scenarios. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 1992, vol. 1, no. 4, pp. 46–51 (in Russian).
6. Shevchuk A. P., Prisdakov V. I., Kosachev A. A., Filippov V. N., Ivanov V. A. Fire and explosion safety of LPG transportation by a railway. 3. A reduction of a fire and explosion hazard of railway tanks for an LPG transportation. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 1993, vol. 2, no. 3, pp. 35–38 (in Russian).
7. Korolchenko A. Ya., Gorshkov V. I., Zemskiy G. T., Filippov V. N., Shebeko Yu. N. Fire safety rules at a transportation of LPG by railway tanks. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 1993, vol. 2, no. 3, pp. 39–42 (in Russian).
8. Filippov V. N., Radzikhovskiy E. A. An investigation of a railway tanks behavior at an accidental collision. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta / Vestnik of the All-Russian Railway Research Institute*, 1994, no. 3, pp. 9–12 (in Russian).

9. Filippov V. N., Kanivets R. F., Shmirov Yu. A., Dmitriev V. V., Skuratov A. E. An elevation of an operational reliability of railway tanks for a LPG transportation. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta / Vestnik of the All-Russian Railway Research Institute*, 1995, no. 6–8 (in Russian).
10. Smolyaninov A. V., Filippov V. N. A method for calculation and design of safety arcs for railway tanks. In: *Aktualnyye problemy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta: trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Actual problems of railway transport. Proceedings of 2nd International Scientific and Technical Conference]. Moscow, MIIT Publ., 1996, vol. 1, p. 86 (in Russian).
11. Korolochenko A. Ya., Shebeko Yu. N., Filippov V. N. An influence of a fire retardant coating on a behavior of LPG vessel in a fire. In: *Pozharnaya bezopasnost. Istoriya, sostoyaniye, perspektivy: materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Fire Safety. History, state of art, perspectives. Proceedings of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference]. Moscow, VNIPO Publ., 1997, part 2, pp. 271–273 (in Russian).
12. Shebeko Yu. N., Filippov V. N., Gorshkov V. I. An investigation of an influence of a fire retardant coating on a behavior of a LPG vessel in a fire. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 1998, vol. 7, no. 1, pp. 24–32 (in Russian).
13. Shebeko Yu. N., Filippov V. N., Navzenya V. Yu., Kostyukhin A. K., Tokarev P. M., Zamishevsky E. D. An investigation of some methods for fire protection of LPG vessels. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 1999, vol. 8, no. 4, pp. 33–42 (in Russian).
14. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N., Navzenya V. Yu., Kostyukhin A. K., Tokarev P. M., Zamishevsky E. D. An investigation of some methods for fire protection of LPG vessels. In: *Conference Proceedings of Interflame '99, 8th International Fire Science & Engineering Conference*, Edinburgh, UK, 29 June – 1 July, 1999. London, Interscience Communications Ltd., 1999, pp. 1141–1146.
15. Shebeko Yu. N., Filippov V. N., Bolodian I. A. An investigation of methods of a fire protection of LPG vessels. In: *Problemy goreniya i tusheniya pozharov na rubezhe vekov. Materialy XV nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 15th scientific conference “Combustion problems and a fire extinguishing on a boundary of centuries”]. Moscow, VNIPO Publ., 1999, pp. 132–133 (in Russian).
16. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N., Navzenya V. Yu., Kostyukhin A. K., Tokarev P. M., Zamishevsky E. D. Explosion prevention of LPG vessels using fire retardant coatings and safety valves. In: *5th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization*, Shanghai, October 24–29, 1999. International Academic Publishers, 1999, pp. 215–226.
17. Shebeko Yu. N., Filippov V. N., Tokarev P. M. An investigation of methods for a protection of LPG railway tanks at a thermal load from a fire. In: *Bezopasnost dvizheniya poyezdov. Sbornik trudov* [Safety of Railways. Proceedings]. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 1999, pp. IV/17–IV/18 (in Russian).
18. Filippov V. N., Nedorchuk B. L., Kozlova D. I., Skuratov A. E. An elevation of an ecological safety of liquid hazardous goods transportation in railway tanks. In: *Bezopasnost dvizheniya poyezdov. Sbornik trudov* [Safety of Railways. Proceedings]. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 2000, part 2, p. V/19 (in Russian).
19. Nedorchuk B. L., Filippov V. N., Shebeko Yu. N. General technical requirements for safety of railway tanks for transportation of hazardous materials. *Pojazdy szynowe na przelomie wikow*. Krakow, Arlamow, 2000, vol. 1, pp. 197–203 (in Polish).
20. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N. Investigations of methods for fire protection of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases. *Pojazdy szynowe na przelomie wikow*. Krakow, Arlamow, 2000, vol. 3, pp. 109–118 (in Polish).
21. Shebeko Yu. N., Nazarenko V. A., Filippov V. N., Navtsenya V. Yu., Kostyukhin A. K., Zamyshesky E. D., Golovin V. V., Bepalko S. V. Experimental research of thin-walled envelope behavior in test flame. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2004, no. 2, pp. 71–73 (in Russian).
22. Strakhov V. P., Krutov V. M., Shebeko Yu. N. A possibility of an application of a constructive fire protection for railway tanks. In: *Bezopasnost dvizheniya poyezdov. Sbornik trudov* [Safety of Railways. Proceedings]. Moscow, Moscow State Railway University Publ., 2005, pp. VII/24–VII/25 (in Russian).

For citation: Filippov V. N., Popov V. G., Bepalko S. V., Shebeko Yu. N., Navtsenya V. Yu. Results of complex researches of fire and explosion safety of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 43–49 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49.

П. Е. АСТАПОВ, адъюнкт, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: as101086@gmail.com)

А. В. ФЕДОРОВ, д-р техн. наук, профессор, заведующий сектором пожарной безопасности, НИИ "Транснефть" (Россия, 117186, г. Москва, ул. Севастопольский просп., 47А; e-mail: FedorovAV@niitnn.transneft.ru)

А. Н. ЧЛЕНОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной автоматики, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: chlenov@mail.ru)

Е. Н. ЛОМАЕВ, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной автоматики, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: lomaeff@mail.ru)

А. Д. ИЩЕНКО, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник сектора пожарной безопасности, НИИ "Транснефть" (Россия, 117186, г. Москва, ул. Севастопольский просп., 47А; e-mail: IschenkoAD@niitnn.transneft.ru)

УДК 699.8(083.7)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ДОБЫЧИ И ТРАНСПОРТА НЕФТИ

Проведен анализ существующих систем мониторинга на потенциально опасных производственных объектах. Предложены современные технологические и структурно-логические решения по созданию системы мониторинга взрывопожароопасности объектов добычи и транспорта нефти для повышения эффективности и безопасности нефтегазодобывающего производства и транспорта нефти. Решения базируются на применении программно-технических средств, осуществляющих автоматический мониторинг дестабилизирующих факторов природного и техногенного характера и обеспечивающих передачу информации в органы повседневного управления РСЧС об угрозе и возникновении аварии, ЧС, в том числе вызванных террористическими актами. Предложена нормативная база обеспечения взаимодействия с органами повседневного управления РСЧС. Предложены принципы применения оборудования инженерных систем со встроенными функциями мониторинга и обеспечения управления с целью упростить создание систем мониторинга и управления.

Ключевые слова: система мониторинга; объекты добычи и транспорта нефти; взрывопожароопасность; мониторинг инженерных конструкций и сооружений; пожары и ЧС; пожарная безопасность.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.50-60

Введение

Под мониторингом (от англ. *monitor* — контролировать) понимают специально организованное, систематическое наблюдение за состоянием объектов, явлений, процессов в целях их оценки, контроля, прогноза.

Системы мониторинга технологических процессов добычи и транспорта нефти — территориально распределенные информационные системы контроля, диагностики и обеспечения управления аварийно-спасательными подразделениями, основной целью применения которых является повышение эффективности и безопасности нефтегазодобывающего производства и транспорта нефти благодаря следующим факторам [1]:

- непрерывному мониторингу распределенных технологических объектов;
- мониторингу процессов управления объектов добычи, транспорта и учета готовой продукции;
- замене физически и морально устаревших средств автоматизации и систем управления;
- повышению безопасности производства за счет средств диагностики и улучшения экологической обстановки в нефтедобывающем регионе;
- снижению трудоемкости управления технологическими процессами добычи и транспортировки нефти.

Современная система мониторинга объектов нефтедобычи (СМОН) состоит из подсистемы мониторинга взрывопожароопасных параметров в ав-

томатизированной системе управления технологическими процессами (АСУ ТП) и системы поддержки принятия решений (СППР). СППР — автоматизированная система, целью которой является оказание помощи ответственному персоналу объекта, принимающему решение в условиях, отличных от нормальных, для полного и объективного анализа ситуации, формирования альтернативных решений и выбора из них наиболее приемлемых. СППР использует правила принятия решений и соответствующие модели и алгоритмы с базами данных, а также интерактивный компьютерный процесс моделирования, поддерживающий принятие самостоятельных и неструктурированных решений ответственного персонала.

Для решения задачи разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений масштаба корпоративного предприятия наиболее приемлемым является подход, основанный на интеграции двух связанных между собой информационных технологий — построения информационных хранилищ и интеллектуального анализа данных.

В последние десять лет была проведена работа по созданию и внедрению ряда систем мониторинга [2]:

- 1) система мониторинга АСУ транспортного контроля приема-сдачи нефти нефтегазодобывающего управления. В основу положена сеть измерения параметров потоков жидкости в узлах инженерной сети гидродинамической системы добычи и закачки в совокупности с выходными формами программного обеспечения (ПО) “Баланс жидкости”;
- 2) система мониторинга АСУ ТП нефтегазодобычи на базе ПО “Баланс жидкости” и “АРМ Метролога”;
- 3) система мониторинга АСУ ТП нефтеперекачивающей станции, линейной телемеханики магистрального нефтепровода в режиме реального времени (2008 г.). Это максимально проработанное решение, которое автор взял за основу построения СППР при создании системы мониторинга объектов нефтедобычи.

Кроме того, разработаны и предложены для внедрения подходы к построению структуры комплексного мониторинга состояния основных производственных фондов критически важных объектов в Арктической зоне Российской Федерации [3], концептуальные основы и критерии оперативного мониторинга и управления безопасностью опасных производственных объектов нефтегазового комплекса с использованием технологии минимизации синергетического риска [4].

Наряду с этим возникает необходимость рассмотреть технологические и структурные решения

по созданию системы мониторинга взрывопожароопасности [5] объектов добычи и транспорта нефти в условиях стремительного развития программно-технических средств, осуществляющих автоматический мониторинг дестабилизирующих факторов природного и техногенного характера, технологий процессов добычи и транспорта нефти, возрастающих требований к обеспечению безопасности населения и территорий от ЧС техногенного характера.

В настоящей работе предлагаются современные технологические решения по созданию СМОН, которые разработаны на основе требований, определенных в ГОСТ Р 22.1.12–2005, технологических принципов комплексной безопасности потенциально опасных объектов и объектов капитального строительства и технологии построения автоматизированных систем управления с учетом комплексного подхода к решению задач обеспечения безопасности и антитеррористической защищенности объектов.

Технологические решения по созданию СМОН

Предлагаемые технологические решения реализуют следующие основные требования к функционированию и структуре СМОН [6]:

- обеспечение автоматического, осуществляемого независимо от службы эксплуатации объекта, мониторинга в режиме реального времени дестабилизирующих факторов для предупреждения и ликвидации ЧС, в том числе вызванных террористическими актами;
- наличие модульной структуры и возможность использования открытых и стандартных протоколов цифровой периферии и технологии для получения данных;
- обеспечение возможности сопряжения с другими автоматизированными системами.

Технология функционирования СМОН базируется на реализации следующих процессов:

- обеспечение непрерывного процесса сбора, передачи и обработки информации о значениях параметров производственных процессов и процессов обеспечения функционирования зданий и сооружений;
- прогнозирование и предупреждение аварийных ситуаций путем контроля за параметрами производственных процессов и процессов обеспечения функционирования зданий и сооружений и определения отклонений их текущих значений от нормативных;
- формирование и передача формализованной оперативной информации о состоянии технологических систем и об изменении состояния инженерно-технических конструкций объектов в дежурно-диспетчерские службы (ДДС) объекта;

- формирование и передача формализованного сообщения о ЧС на объектах, в том числе вызванных террористическими актами, в органы повседневного управления РСЧС;
- автоматизированное оповещение о произошедшей аварии, чрезвычайной ситуации и необходимых действиях по эвакуации;
- автоматизированное оповещение соответствующих специалистов, отвечающих за безопасность объектов;
- документирование и регистрация аварийных ситуаций, а также действий дежурных и диспетчерских служб объектов.

Технология построения СМОН базируется на программно-технических средствах, осуществля-

ющих автоматический мониторинг дестабилизирующих факторов природного и техногенного характера и обеспечивающих передачу информации в органы повседневного управления РСЧС об угрозе и возникновении аварий, ЧС, в том числе вызванных террористическими актами [7].

На рис. 1 показана структура, основные взаимосвязи СМОН с инженерными системами объекта и технологические решения по передаче информации в органы повседневного управления РСЧС.

Структурно система мониторинга включает три подсистемы:

- сбора данных и передачи сообщений (ССП);
- связи и управления в кризисных ситуациях (СУКС);

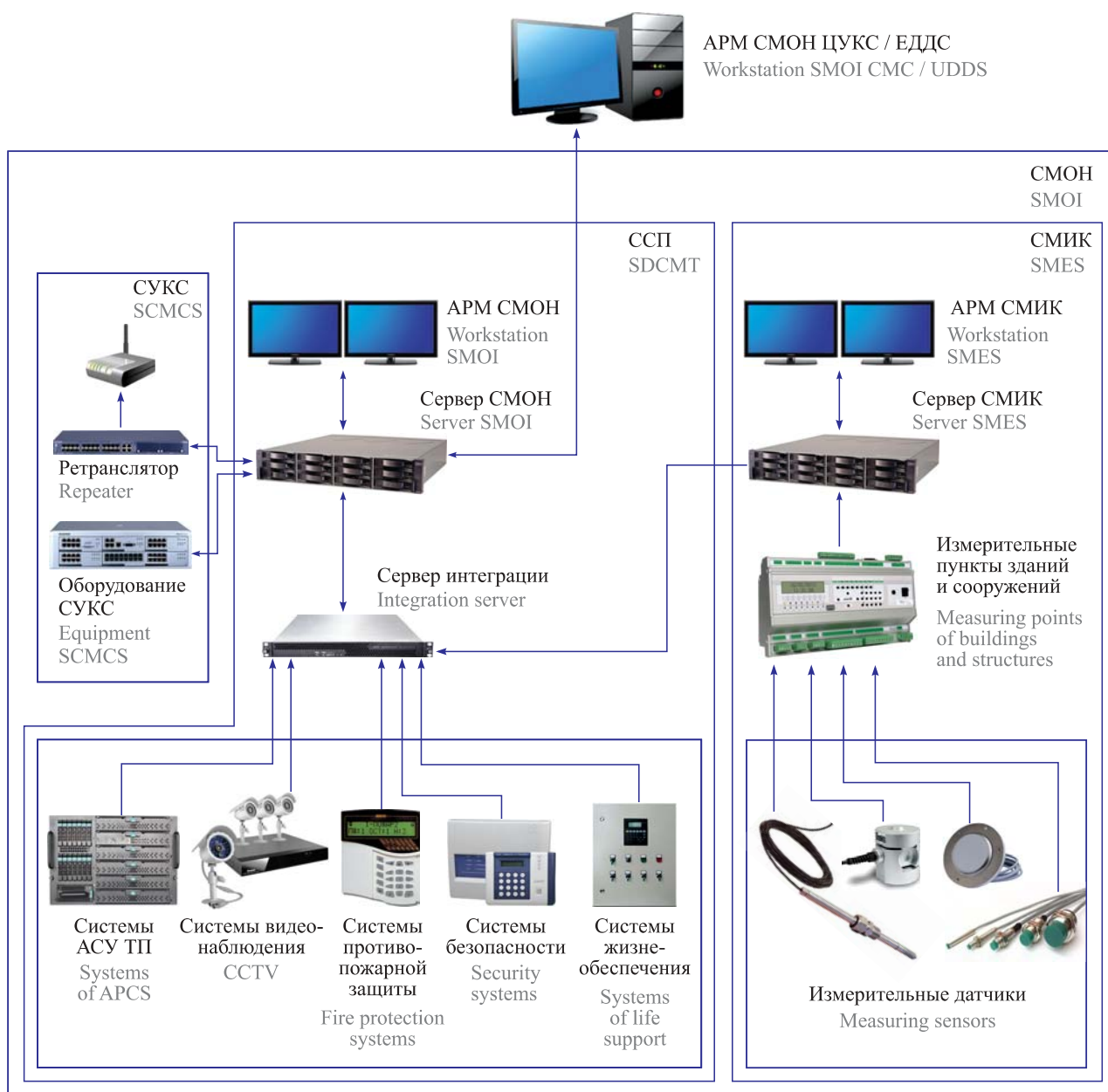


Рис. 1. Структура СМОН / Fig. 1. SMOI structure

- мониторинга инженерных (несущих) конструкций, опасных природных процессов и явлений (СМИК).

Подсистема ССП решает технологические задачи по сбору данных о контролируемых параметрах процессов обеспечения функционирования объектов и определению отклонений их текущих значений от нормативных, а также по формированию и передаче формализованной оперативной информации о состоянии технологических систем и изменении состояния инженерно-технических конструкций объектов в дежурные и диспетчерские службы объекта и в органы повседневного управления РСЧС.

Для решения данных задач в составе ССП используются:

- программный комплекс сбора, обработки данных мониторинга, формирования и передачи информации;
- серверы СМОН объекта для обеспечения сопряжения с инженерными системами объекта, информационного сопряжения с органами повседневного управления РСЧС;
- АРМ СМОН, включающий мониторы оперативного мониторинга и поддержки принятия решения;
- оборудование автоматической передачи коротких сообщений (SMS);
- оборудование приема и передачи видеoinформации;
- локальная вычислительная сеть СМОН;
- комплекс средств связи с органами повседневного управления РСЧС.

В случае отсутствия возможности мониторинга дестабилизирующих факторов через существующие аппаратно-программные средства объекта в ССП СМОН включаются контроллеры, модули автоматики, датчики, системы и технические средства раннего обнаружения пожара [8].

Подсистема СУКС предназначена для обеспечения:

- устойчивой радиосвязи и управления аварийно-спасательными подразделениями в условиях действия дестабилизирующих факторов во время проведения действий по ликвидации ЧС, в том числе вызванных террористическими актами, между штабом по ликвидации ЧС и помещениями объекта;
- гарантированной устойчивой связи на объекте между оперативно-спасательными службами, специальными формированиями, а также со штабом по ликвидации ЧС в условиях действия дестабилизирующих факторов во время ликвидации ЧС, в том числе вызванных террористическими актами.

В СУКС входит технологическое оборудование связи, обеспечивающее управление специальными формированиями внутри объекта при ликвидации последствий аварий, ЧС, в том числе вызванных террористическими актами.

На рис. 2 представлена структура СУКС. В состав СУКС входят система оперативной радиосвязи городских служб безопасности и экстренных служб (СОРС) и система оперативной чрезвычайной телефонной связи (СОТС).

Система оперативной чрезвычайной телефонной связи разворачивается в зоне расположения административно-офисных помещений, технических, производственных, выставочных и др. Система оперативной радиосвязи городских служб безопасности и экстренных служб разворачивается в зонах и помещениях объектов, в которых отсутствует уверенный прием радиосигнала штатными носимыми средствами радиосвязи сотрудников городских служб безопасности и экстренных служб.

СОТС включает:

- оборудование автономной проводной телефонной связи помещения аппаратной СМОН с помещениями объекта;
- оборудование и программное обеспечение АТС СУКС;
- источники бесперебойного питания;
- коммутационное оборудование СУКС.

Система СОРС включает:

- программируемые ретрансляторы радиосвязи;
- антенно-фидерные устройства (АФУ);
- источники бесперебойного питания;
- кабельную сеть электроснабжения;
- аппаратно-программный комплекс программирования.

Использование в СУКС средств и оборудования других объектовых систем связи не допускается.

Подсистема СМИК выполняет функции:

- своевременного оповещения о критическом изменении состояния несущих конструкций комплекса и принятия обоснованных решений по обеспечению безопасности посетителей и персонала, безопасной эксплуатации;
- прекращения эксплуатации объекта;
- мониторинга и регистрации в течение всего срока эксплуатации объекта изменений состояния несущих конструкций вследствие накопления в них эксплуатационных дефектов, которые с течением времени могут привести здание, сооружение в предельное состояние, требующее соответствующего ремонта или прекращения эксплуатации.

Структура СМИК показана на рис. 3. В СМИК входит оборудование мониторинга изменения состояния оснований, строительных конструкций

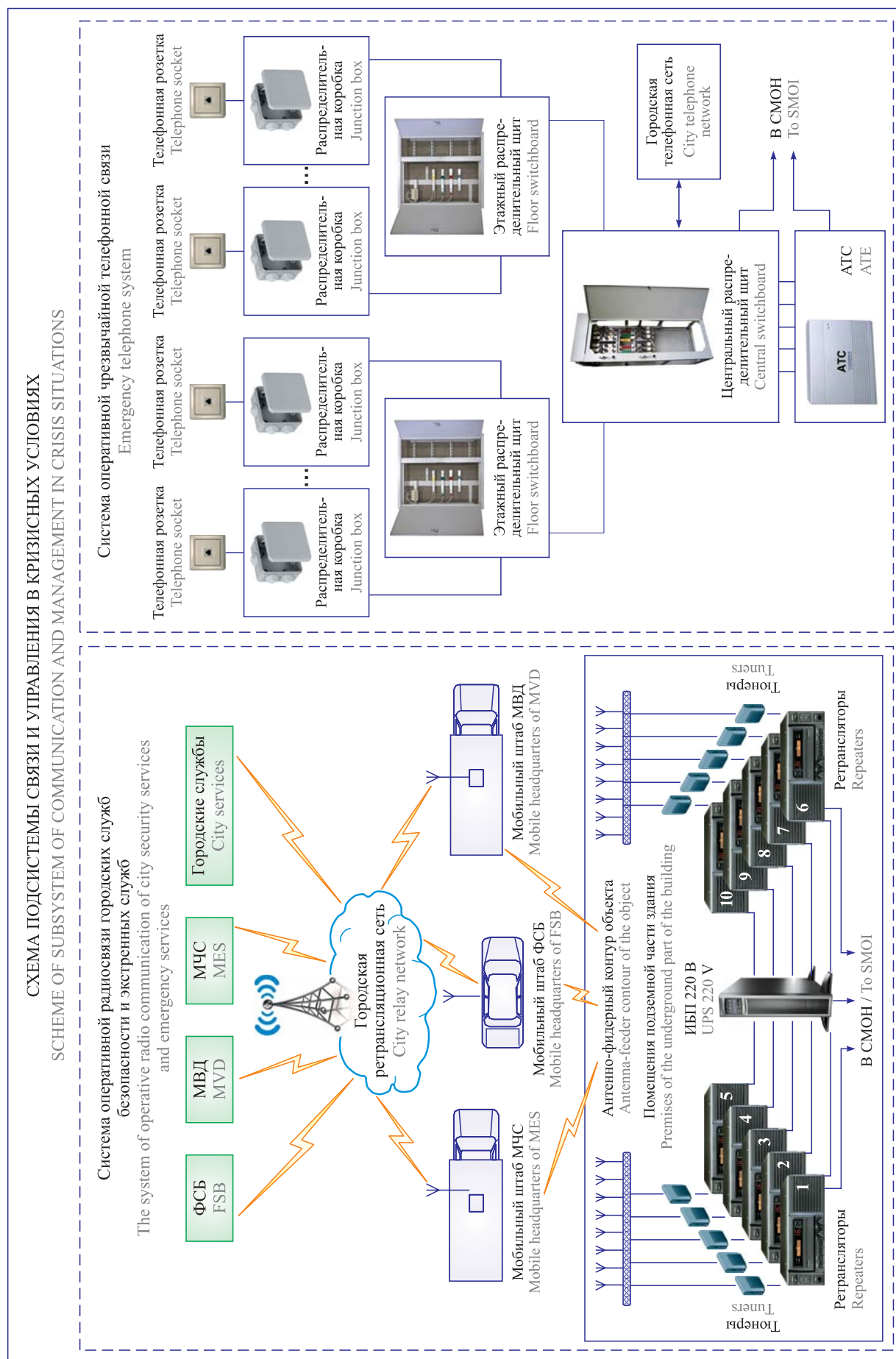


Рис. 2. Структура СУКС / Fig. 2. SCMCS structure

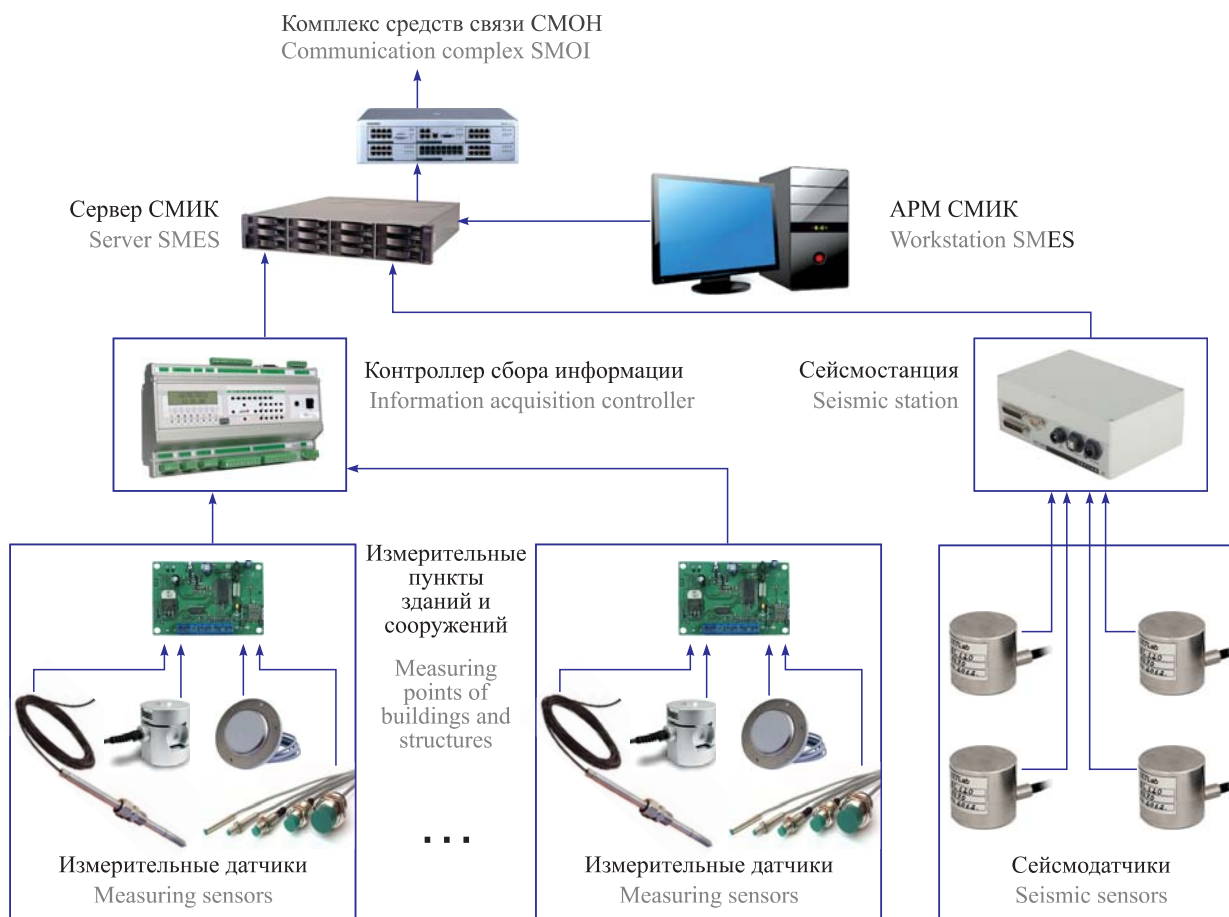


Рис. 3. Структура СМИК / Fig. 3. SMES structure

зданий и сооружений, сооружений инженерной защиты, а также наличия угроз, участков возможных сходов селей, оползней, лавин в зоне эксплуатации здания или сооружения, включая:

- серверы, локальные серверы и контроллеры СМИК;
- АРМ СМИК;
- оборудование сети сбора и передачи данных;
- датчики контроля изменения состояния оснований, строительных конструкций зданий и сооружений; сооружений инженерной защиты, а также участков возможных сходов селей, оползней, лавин.

СМИК функционально делится на следующие подсистемы:

1) сигнальную подсистему мониторинга, которая функционирует непрерывно, обеспечивая:

- автоматический, в режиме реального времени, мониторинг интегральных характеристик несущих конструкций объекта;
- автоматическое, в режиме реального времени, информирование персонала дежурно-диспетчерской службы объекта, ЕДДС муниципального образования и ЦУКС субъекта о критическом изменении состояния (деформированного состояния) конструкций объекта;

2) подсистему периодического мониторинга, которая начинает функционировать по сообщениям (инцидент, авария) от сигнальной подсистемы мониторинга или в соответствии с регламентом. При этом в автоматизированном режиме реализуются следующие функции:

- оценка технического состояния несущих конструкций объекта и выдача рекомендаций по их усилению (восстановлению);
- контроль и корректировка (при необходимости) функционирования сигнальной подсистемы.

Организационные и инженерно-технические мероприятия

При создании СМОН и их информационного сопряжения с органами повседневного управления РСЧС используются следующие технологические решения, включающие комплекс организационных и инженерно-технических мероприятий:

- определение и согласование между администрацией города (района), органом управления по делам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций и городскими службами состава существующих дежурно-диспетчерских служб, при-

влекаемых для ликвидации различных видов ЧС, в том числе вызванных террористическими актами, на объектах, а также порядка их взаимодействия и информационного обмена;

- уточнение группировки сил и средств постоянной готовности, определение и согласование основных мероприятий экстренного реагирования, выполнение которых в случае ЧС на объектах должны организовать органы повседневного управления РСЧС;
- разработка порядка информационного обеспечения в случае ЧС на объектах;
- разработка систем связи и управления в кризисных ситуациях, оповещения применительно к задачам и потребностям органов повседневного управления РСЧС в части предупреждения или ликвидации последствий ЧС, в том числе вызванных террористическими актами, на объектах;
- сопряжение СМОН с комплексами средств автоматизации органов повседневного управления РСЧС.

Технологические этапы создания СМОН

Основными технологическими этапами создания СМОН и их информационного сопряжения с органами повседневного управления РСЧС являются:

- организационный этап, на котором решаются организационные вопросы построения СМОН и их информационного сопряжения с органами повседневного управления РСЧС;
- технический этап, на котором разрабатываются и внедряются программно-технические средства СМОН, а также осуществляется их информационное сопряжение с органами повседневного управления РСЧС.

Для создания СМОН и их информационного сопряжения с органами повседневного управления РСЧС на организационном этапе разрабатывают и утверждают следующие документы:

- положение о СМОН и об их информационном сопряжении с органами повседневного управления РСЧС;
- инструкции об обмене информацией между ДДС объектов, органами повседневного управления РСЧС и городскими ДДС;
- дополнения и изменения к действующим инструкциям дежурно-диспетчерских служб (в части их взаимодействия с органами повседневного управления РСЧС) [9] и др.

В целях создания СМОН и их информационного сопряжения с органами повседневного управления РСЧС субъекта органами управления конкретного города (района), специально уполномоченными на решение задач в области защиты населения и тер-

риторий от чрезвычайных ситуаций, разрабатываются и утверждаются администрацией: Положение о СМОН, Положение об органах повседневного управления РСЧС в части контроля объектов, инструкции об обмене информацией между ДДС объектов, ЕДДС и городскими ДДС, а также другие необходимые нормативно-методические документы [10–12].

Технологические решения обеспечения управления инженерными системами

Проведенный анализ технологий создания автоматизированных систем управления инженерными системами показывает, что, как правило, технологические решения по их реализации в той или иной мере имеют следующие недостатки [6]:

- недостаточность информации у служб эксплуатации;
- отсутствие координации между системами мониторинга различных инженерных систем;
- снижение общей надежности технологического процесса, в частности из-за применения морально устаревших технических средств;
- отсутствие унификации оборудования и кабельных сетей;
- отсутствие запасного серийно выпускаемого оборудования;
- большие эксплуатационные затраты;
- значительное время реакции на отказ оборудования и восстановление работоспособности;
- отсутствие технических решений по обеспечению живучести системы;
- отсутствие функции автоматического управления;
- ограничение возможности диспетчерского управления из-за отсутствия возможности дистанционной передачи информации в эксплуатационные службы объекта.

На объектах с сильно развитой инфраструктурой функционируют сложные и дорогостоящие инженерно-технические комплексы. Контроль и управление инженерным оборудованием таких объектов является одним из необходимых условий функционирования и эффективного использования систем, обеспечивающих их жизнедеятельность. В то же время существующие диспетчерские системы не предусматривают контроль над оборудованием в достаточном объеме и базируются на многих предприятиях, как правило, на элементной базе с низкой надежностью, а также не обеспечивают непрерывного анализа состояния оборудования и прогнозирования отказов.

Устранение перечисленных выше недостатков возможно с помощью предложенных технологических решений построения системы мониторинга объ-

ектов нефтедобычи. Основные принципы данных решений следующие:

- использование единой структурированной кабельной сети объекта;
- создание структурированной иерархической системы управления и сбора информации;
- концентрация и распределение информации в соответствии с потребностями и полномочиями; комплексная автоматизация учета и обработки информации;
- сопряжение с автоматизированными системами объекта на уровне не выше уровня контроллеров для обеспечения независимого от служб эксплуатации объекта мониторинга;
- применение оборудования инженерных систем со встроенными функциями мониторинга и управления;
- унификация оборудования и информационного обеспечения, типизация проектных решений.

Вследствие того что функционирование инженерных систем объекта взаимосвязано (состояние одной инженерной системы влияет на состояние другой), администратор объекта и службы эксплуатации должны иметь необходимую информацию о смежных инженерных системах. Информация о состоянии инженерных систем нужна также администраторам локальных вычислительных сетей объекта и других информационных систем, в том числе составляющих технологический процесс организа-

ций, находящихся в здании. Структурирование информационных потоков в системе позволяет сократить потребности в пропускной способности каналов передачи информации, а также наиболее эффективно войти в инфраструктуру управления зданием и технологическими и обеспечивающими процессами организаций, находящихся в нем.

Выводы

Иерархическая структура сбора информации позволяет реализовать сопряжение структурированной системы мониторинга и управления с другими автоматизированными и информационными системами в составе ситуационных центров различного уровня.

Комплексная автоматизация учета и обработки информации дает возможность исключить ошибки персонала и повысить общую надежность функционирования инженерных систем.

Применение оборудования инженерных систем со встроенными функциями мониторинга [13–17] и управления позволяет упростить создание систем мониторинга и управления, получить комплексную информацию об оборудовании, а также облегчить диагностику оборудования.

Унификация оборудования мониторинга позволяет снизить эксплуатационные расходы и сроки восстановления работоспособности оборудования и систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костюков В. Н. Мониторинг безопасности производства. — М. : Машиностроение, 2002. — 224 с.
2. Мурыжников А. Н. Методическое и программное обеспечение нижнего уровня системы мониторинга объектов нефтедобычи // Нефтяное хозяйство. — 2015. — № 7. — С. 120–123.
3. Тугушов К. В., Рыбаков А. В., Носков С. С., Арефьева Е. В., Лебедев А. Ю. О подходе к построению структуры комплексного мониторинга состояния основных производственных фондов критически важных объектов в Арктической зоне Российской Федерации // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. — 2016. — № 3(30). — С. 34–38.
4. Шавалеев Д. А., Абдрахманов Н. Х. Управление промышленной безопасностью объектов топливно-энергетического комплекса на основе анализа и мониторинга рисков // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. — 2012. — № 6. — С. 435–441.
5. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 03.07.2016). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 26.05.2017).
6. Батырев В. В., Волков О. С., Качанов С. А. Технологии создания структурированных систем мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. — М. : ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. — 270 с.
7. Кудрин А. Ю., Качанов С. А., Запорожец А. И., Топольский Н. Г., Волков О. С., Гинзбург В. В. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений // Технологии гражданской безопасности. — 2006. — Т. 3, № 3. — С. 25–30.
8. Фёдоров А. В., Членов А. Н., Лукьянченко А. А., Буцынская Т. А., Демёхин Ф. В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара : монография. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. — 160 с.
9. Концепция создания единых дежурно-диспетчерских служб в городах России : прилож. 1 к приказу МЧС России от 25.08.98. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901750067> (дата обращения: 26.05.2017).

10. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : Федер. закон РФ от 21.12.1994 № 68-ФЗ (с изм. на 23.06.2016). URL: <http://docs.cntd.ru/document/9009935> (дата обращения: 26.05.2017).
11. О пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 21.12.1994 № 69-ФЗ (с изм. и доп.). URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/10103955/paragraph/276110:0> (дата обращения: 26.05.2017).
12. О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций : постановление Правительства РФ от 30.12.2003 № 794 (с изм. и доп.). URL: <http://base.garant.ru/186620/> (дата обращения: 26.05.2017).
13. Grosse C. U., Finck F., Kurz J., Reinhard H.-W. Monitoring techniques based on wireless AE sensors for large structures in civil engineering // Proceedings of the EWGAE 2004 Symposium in Berlin. — Berlin : DGZfP, 2004. — P. 843–856.
14. Boldyrev G., Valev D., Idrisov I., Krasnov G. A system for static monitoring of sports center structures // Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring / Editor Fu-Kuo Chang. — Stanford : Stanford University, 2009. — Vol. 1. — P. 374–382.
15. Lynch J. P., Loh K. J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring // The Shock and Vibration Digest. — 2006. — Vol. 38, No. 2. — P. 91–128. DOI: 10.1177/0583102406061499.
16. Lynch J. P., Sundararajan A., Law K. H., Kiremidjian A. S., Kenny T., Carryer E. Computational core design of a wireless structural health monitoring system // Proceedings of World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics. — 2002. — P. 1–8.
17. Doebling S. W., Farrar C. R., Prime M. B., Shevitz D. W. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review : Report No. LA-13070-MS. — Los Alamos, New Mexico : Los Alamos National Laboratory, 1996. — 127 p. DOI: 10.2172/249299.

Материал поступил в редакцию 3 июня 2017 г.

Для цитирования: Астапов П. Е., Федоров А. В., Членов А. Н., Ломаев Е. Н., Ищенко А. Д. Технологические и структурные решения по созданию системы мониторинга взрывопожароопасности объектов добычи и транспорта нефти // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 50–60. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.50-60.

English

TECHNOLOGICAL AND STRUCTURAL SOLUTIONS FOR THE CREATION OF THE MONITORING SYSTEM OF EXPLOSIVE FIRE-PROOF OBJECTS OF OIL PRODUCTION AND TRANSPORT

ASTAPOV P. E., Adjunct, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: as101086@gmail.com)

FEDOROV A. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Fire Safety Sector, Research Institute "Transneft" (Sevastopolskiy Avenue, 47A, Moscow, 117186, Russian Federation; e-mail: FedorovAV@niitnn.transneft.ru)

CHLENOV A. N., Doctor of Technical Sciences, Professor of Fire Automation Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: chlenov@mail.ru)

LOMAEV E. N., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Fire Automation Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: lomaeff@mail.ru)

ISHCHENKO A. D., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of Fire Safety Sector, Research Institute "Transneft" (Sevastopolskiy Avenue, 47A, Moscow, 117186, Russian Federation; e-mail: IschenkoAD@niitnn.transneft.ru)

ABSTRACT

In the conditions of rapid development of software and hardware that automatically monitor destabilizing factors of natural and technogenic nature, technologies of oil production and transportation processes, increasing requirements for ensuring the safety of the population and territories from technogenic disaster, technological and structural solutions for the creation of a system for the explosion-and-fire hazard monitoring of objects production and transport of oil (SMOI).

In this paper, we propose modern technological solutions for the creation of SMOI, which are developed on the basis of the requirements determined by the technological principles of the integrated safety of potentially dangerous objects and capital construction projects and the technology of building automated control systems, taking into account an integrated approach to solving security and antiterrorist security problems.

The technology of SMOI construction is based on software and hardware that automatically monitors destabilizing factors of natural and man-made nature and provides information to the everyday management bodies of the General subject about the threat and occurrence of an accident, emergency situations, including those caused by terrorist acts.

Structurally, the monitoring system includes three subsystems:

- for data collection and message transfer (SDCMT);
- of communication and management in crisis situations (SCMCS);
- for engineering (bearing) structures monitoring, hazardous natural processes and phenomena (SMES).

The organizational and engineering-technical measures for the creation of SMOI are proposed, the technological stages of its creation are determined, the necessary normative base for ensuring interaction with the everyday management bodies of the RSES and technological solutions for providing management of engineering systems with integrated monitoring and management functions is considered.

Keywords: monitoring system; objects of oil production and transport; explosion-and-fire hazard; engineering construction and structures monitoring; fires and emergencies; fire safety.

REFERENCES

1. Kostyukov V. N. *Monitoring bezopasnosti proizvodstva* [Monitoring of production safety]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2002. 224 p. (in Russian).
2. Muryzhnikov A. N. Methodical and software support of low level of oil production facilities. *Neftyanoye khozyaystvo / Oil Industry*, 2015, no. 7, pp. 120–123 (in Russian).
3. Tugushov K. V., Rybakov A. V., Noskov S. S., Aref'eva E. V., Lebedev A. Yu. On the approach to the construction structure integrated monitoring state basic production assets of critical facilities in the Arctic zone of the Russian Federation. *Nauchnyye i obrazovatelnyye problemy grazhdanskoy zashchity / Scientific and Educational Problems of Civil Protection*, 2016, no. 3(30), pp. 34–38 (in Russian).
4. Shavaleev D. A., Abdrahmanov N. H. Management of industrial safety of objects of fuel and energy complex on the basis of the analysis and the monitoring of risks. *Neftgazovoye delo. Elektronnyy nauchnyy zhurnal / Oil and Gas Business. The electronic scientific journal*, 2012, no. 6, pp. 435–441 (in Russian).
5. Technical regulations for fire safety requirements. Federal Law of the Russian Federation on 22.07.2008 No. 123 (ed. 03.07.2016) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 26 May 2017).
6. Batyrev V. V., Volkov O. S., Kachanov S. A. *Tekhnologii sozdaniya strukturirovannykh sistem monitoringa i upravleniya inzhenernymi sistemami zdaniy i sooruzheniy* [Technologies for creating structured systems for monitoring and managing engineering systems of buildings and structures]. Moscow, FGU VNII GOChS (FC) Publ., 2011. 270 p. (in Russian).
7. Kudrin A. Yu., Kachanov S. A., Zaporozhets A. I., Topolskiy N. G., Volkov O. S., Ginzburg V. V. Structured system of monitoring and control of engineering systems of buildings and structures. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti / Technology of Civil Security*, 2006, vol. 2, no. 3, pp. 25–30 (in Russian).

8. Fedorov A. V., Chlenov A. N., Lukyanchenko A. A., Butynskaya T. A., Demekhin F. V. *Sistemy i tekhnicheskiye sredstva rannego obnaruzheniya pozhara* [Systems and technical means of early detection of a fire]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia, 2009. 160 p. (in Russian).
9. *The concept of creating Incorporated on duty dispatching service in the cities of Russia*. The annex of order of Emecrom of Russia on 25.08.98 No. 517 (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/901750067> (Accessed 26 May 2017).
10. On the protection of the population and territories from natural and man-made emergencies. Federal Law of Russian on 21.12.1994 No. 68 (ed. 23.06.2016) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/9009935> (Accessed 26 May 2017).
11. On fire safety. Federal Law of the Russian Federation on 21.12.1994 No. 69 (in Russian). Available at: <http://ivo.garant.ru/#/document/10103955/paragraph/276110:0> (Accessed 26 May 2017).
12. On the Unified State System for the Prevention and Elimination of Emergencies. Decree of the Government of the Russian Federation on 30.12.2003 No. 794 (in Russian). Available at: <http://base.garant.ru/186620/> (Accessed 26 May 2017).
13. Grosse C. U., Finck F., Kurz J., Reinhard H.-W. Monitoring techniques based on wireless AE sensors for large structures in civil engineering. In: *Proceedings of the EWGAE 2004 Symposium in Berlin*. Berlin, DGZfP, 2004, pp. 843–856.
14. Boldyrev G. G., Valeyev D., Idrisov I., Krasnov G. A system for static monitoring of sports center structures. In: Fu-Kuo Chang (ed.). *Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, Stanford Univesity, 2009, vol. 1, pp. 374–382.
15. Lynch J. P., Loh K. J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *The Shock and Vibration Digest*, 2006, vol. 38, no. 2, pp. 91–128. DOI: 10.1177/0583102406061499.
16. Lynch J. P., Sundararajan A., Law K. H., Kiremidjian A. S., Kenny T., Carryer E. Computational core design of a wireless structural health monitoring system. In: *Proceedings of World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, 2002, pp. 1–8.
17. Doebling S. W., Farrar C. R., Prime M. B., Shevitz D. W. *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review*. Report No. LA-13070-MS. Los Alamos, New Mexico, Los Alamos National Laboratory, 1996. 127 p. DOI: 10.2172/249299.

For citation: Astapov P. E., Fedorov A. V., Chlenov A. N., Lomaev E. N., Ishchenko A. D. Technological and structural solutions for the creation of the monitoring system of explosive fire-proof objects of oil production and transport. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 50–60 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.50-60.

А. В. ШЛЕНКОВ, д-р психол. наук, профессор, начальник кафедры психологии и педагогики, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: 33366610@mail.ru)

Е. А. МАЛЫГИНА, канд. пед. наук, доцент, доцент кафедры психологии и педагогики, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: malygin_com@mail.ru)

Г. В. МОСКАЛЕНКО, канд. психол. наук, преподаватель кафедры психологии и педагогики, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: moskalenko_galina@list.ru)

УДК 159.944.3

ВЛИЯНИЕ НЕГАТИВНЫХ ФАКТОРОВ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ИНДИВИДУАЛЬНО-ЛИЧНОСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЖАРНЫХ И СПАСАТЕЛЕЙ

Представлены результаты исследования влияния негативных факторов профессиональной деятельности пожарных и спасателей на их индивидуально-личностные особенности. Показано, что негативные факторы профессиональной деятельности делятся на объективные и субъективные. К объективным факторам отнесены: непредсказуемость событий аварийно-спасательных работ (АСР); новизна обстановки (нестандартность), опасность, угроза как жизни, физическому и психическому здоровью специалистов, так и жизни, здоровью и благополучию граждан в зоне АСР; дефицит времени, возможные человеческие жертвы, материальные потери и др. К субъективным факторам отнесены: ответственность; состояние психического напряжения; аффективные реакции как личного состава пожарных и спасателей, так и граждан в условиях чрезвычайной ситуации; степень слаженности и взаимопонимания личного состава. Показано, что сотрудники, отличающиеся быстротой вработываемости, практичностью мышления, развитыми вербальными способностями, оценивают объективные негативные факторы как более угрожающие в отличие от сотрудников, обладающих высокой переключаемостью внимания и внутренней мотивацией к профессиональной деятельности.

Ключевые слова: негативные факторы профессиональной деятельности; индивидуально-личностные особенности; профессиональная деятельность пожарных и спасателей; мотивация профессиональной деятельности; структура интеллекта.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.61-68

Введение

Профессиональная деятельность оказывает существенное влияние на личность человека. С одной стороны, формируются личностные черты, необходимые для эффективного выполнения профессиональной деятельности, а с другой — при сильном объективном или субъективном воздействии негативных факторов профессиональной деятельности могут начать протекать процессы, губительно влияющие как на качество решаемых трудовых задач, так и на личное благополучие [1–5].

Особенности труда пожарных и спасателей, их профессионально важные качества, специфика эмоционального выгорания и деформаций личности изучены хорошо. Установлено, что профессиональная деятельность пожарных и спасателей сопряжена с высоким уровнем нервно-психического напряжения, высоким уровнем личной ответственности, не-

обходимостью принятия быстрых и эффективных решений в условиях дефицита времени, информации и пространства [6–10]. Все эти негативные факторы профессиональной деятельности в первую очередь оказывают влияние на эмоционально-волевую и мотивационную сферы личностной организации сотрудника, поэтому цель исследования заключалась в оценке влияния негативных факторов профессиональной деятельности сотрудника ГПС МЧС России (пожарного, спасателя) на его личностные особенности.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели в первую очередь была использована анкета, разработанная О. Л. Узуном [11]. В анкете представлен перечень негативных факторов профессиональной деятельности (всего 15), которые разделены на объектив-

ные и субъективные. Так, к объективным негативным факторам были отнесены 8 факторов:

- непредсказуемость событий аварийно-спасательных работ (АСР), вынуждающая специалиста быть готовым к быстрой смене алгоритма деятельности;
- новизна обстановки (нестандартность);
- опасность, угроза как жизни, физическому и психическому здоровью специалистов, так и жизни, здоровью и благополучию граждан в зоне АСР;
- дефицит времени;
- возможные человеческие жертвы и материальные потери;
- неблагоприятные погодные-климатические условия;
- недостаток информации;
- недостаточность материального (зарплата и премии) и нематериального (грамоты, благодарности, медали, нагрудные знаки и пр.) поощрения.

В свою очередь, субъективными негативными факторами профессиональной деятельности (всего 7) были обозначены:

- ответственность;
- состояние психического напряжения;
- высокий уровень неожиданности;
- аффективные реакции как личного состава формирования, так и граждан в условиях чрезвычайной ситуации;
- степень слаженности и взаимопонимания личного состава;
- высокий темп действий;
- совмещение нескольких направлений деятельности.

С помощью данной анкеты общая группа испытуемых, составленная из 86 пожарных и спасателей, была разделена на две:

- *группу А*, куда вошли 46 респондентов, которые отметили объективные факторы как наиболее негативные для себя, т. е. первые пять позиций

Негативные факторы профессиональной деятельности пожарных и спасателей

Negative Occupational Factors firefighters and rescuers

Негативные факторы профессиональной деятельности Negative Occupational Factors	Группа А Group A	Группа Б Group B
Непредсказуемость событий АСР, вынуждающая специалиста быть готовым к быстрой смене алгоритма деятельности / Unpredictable nature of rescue events, which forces the rescuer to be ready for a rapid shift in the algorithm of activities	4	8
Ответственность / Responsibility	8	9
Новизна обстановки (нестандартность) / Novelty of the situation (non-standard situation)	9	10
Состояние психического напряжения / State of mental stress	7	2
Высокий уровень неожиданности / High level of surprise	13	5
Опасность, угроза как жизни, физическому и психическому здоровью специалистов, так и жизни, здоровью, благополучию граждан в зоне АСР / Danger, threat to life or physical and mental health of rescuers and to life, health, well-being of citizens in the rescue zone	1	14
Аффективные реакции как личного состава формирования, так и граждан в условиях чрезвычайной ситуации / Affective reactions of both rescue team members and the civilians in an emergency situation	6	12
Степень слаженности и взаимопонимания личного состава / Degree of coherence and mutual understanding among the team members	11	3
Дефицит времени / Time deficit	12	15
Возможные человеческие жертвы и материальные потери / Possible human casualties and material losses	2	6
Неблагоприятные погодные-климатические условия / Unfavorable weather and climate conditions	15	7
Высокий темп действий / High pace of actions	10	1
Совмещение нескольких направлений деятельности / Combining several activities	14	4
Недостаток информации / Lack of information	5	13
Недостаточность материального (зарплата и премии) и нематериального (грамоты, благодарности, медали, нагрудные знаки и пр.) поощрения / Lack of material (wages and bonuses) and non-material (letters of appreciation, commendations, medals, badges, etc.) stimulation	3	11
Примечание. Серым цветом обозначены объективные негативные факторы. Note. Gray color indicates objective negative factors.		

заняли объективные негативные факторы профессиональной деятельности;

- группу Б, которую составили 40 испытуемых, наоборот, отдавших первые пять позиций субъективным негативным факторам.

Ответы испытуемых представлены в таблице.

В таблице наглядно показана дифференциация тех негативных факторов, которые отмечают в своей профессиональной деятельности испытуемые.

Для группы А наиболее значимыми стали факторы, несущие непосредственную угрозу жизни и здоровью, а также недостаточное материальное и нематериальное поощрение, а для группы Б — факторы, охватывающие нервно-психические возможности (темп действий, устойчивость, переключаемость с одного вида деятельности на другой) и взаимоотношения в коллективе.

Кроме анкеты, в исследовании нами применялись методики “Таблицы Шульте”, “Красно-черная таблица” Горбова, методика изучения мотивации профессиональной деятельности К. Замфира (в модификации А. А. Реана), тест структуры интеллекта Р. Амтхауэра и 16-факторный личностный опросник Р. Кеттелла, позволившие сделать вывод об индивидуально-личностных характеристиках респондентов.

Результаты и их обсуждение

В результате исследования было установлено следующее.

Для пожарных и спасателей, выделивших **объективные негативные факторы** как наиболее значимые (в частности, непосредственная угроза жизни и здоровью, а также недостаточная материальная и нематериальная стимуляция), характерны:

- высокая эффективность работы и быстрая встраиваемость;
- практическое мышление, обусловленное способностью быстро решать возникающую проблему;
- развитые вербальные способности;
- эмоциональная устойчивость и, как следствие, стабильность поведения, спокойствие и уверенность в себе.

Для пожарных и спасателей, выделивших **субъективные негативные факторы** как наиболее значимые (темп действий, состояние психического напряжения, слаженность и взаимопонимание в коллективе), свойственны:

- высокая переключаемость внимания;
- индуктивное речевое мышление и точность словесных формулировок;
- способность комбинировать и рассуждать на основании здравого смысла;
- внутренняя мотивация профессиональной деятельности.

Применив коэффициент ранговой корреляции Спирмена в отношении объективных и субъективных негативных факторов профессиональной деятельности сотрудников ГПС МЧС России, получили две корреляционные плеяды (рис. 1 и 2), включившие в себя только статистически достоверные значения на уровне $p \leq 0,05$ (p — уровень значимости).

Самая сильная прямая взаимосвязь наблюдается между объективными негативными факторами и вербальными способностями ($r = 0,59$ при $p \leq 0,01$) (r — коэффициент корреляции). Она указывает на то, что чем сильнее проявляют себя негативные объективные факторы, тем ярче выражены вербальные способности.



Рис. 1. Влияние объективных негативных факторов профессиональной деятельности на личностные особенности сотрудника ГПС МЧС России

Fig. 1. The impact of objective negative factors of professional activity on the personal employee characteristics of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia



Рис. 2. Влияние субъективных негативных факторов профессиональной деятельности на личностные особенности сотрудника ГПС МЧС России

Fig. 2. The impact of subjective negative factors of professional activity on the personal employee characteristics of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia

Вербальные способности отражают развитый вербальный интеллект, т. е. достаточный коммуникативный навык в трансляции и приеме вербальной информации, что в ситуациях повышенной опасности для жизни и здоровья, непредсказуемости событий, вынуждающих быстро менять алгоритм деятельности, дефицита времени и пр., чрезвычайно важно для решения поставленных задач. Вербальные способности обеспечивают возможность быстро донести информацию как до специалистов, участвующих в АСР, так и до граждан, оказавшихся в зоне АСР, поэтому полученная взаимосвязь ожидаема.

Другая сильная взаимосвязь, но обратного характера, обнаружена между объективными негативными факторами и внутренней мотивацией профессиональной деятельности ($r = -0,52$ при $p \leq 0,01$). Связь указывает на то, что чем сильнее действие объективных факторов, тем слабее внутренняя мотивация профессиональной деятельности.

Внутренняя мотивация профессиональной деятельности раскрывает ориентацию на сам процесс труда, получение удовлетворения от его содержания.

Полученную взаимосвязь можно объяснить тем, что при аварийно-спасательных работах, особенно с человеческими жертвами, физическими и психологическими страданиями, трудно получать удовольствие от процесса профессиональной деятельности без сознательного применения деперсонализации, а объективные негативные факторы как раз и касаются угроз жизни и здоровью как жертвы чрезвычайной ситуации, так и сотрудника ГПС МЧС России. Поэтому чем сильнее воздействие объективных негативных факторов профессиональной деятельности, тем слабее внутренняя мотивация.

Обратно и достаточно сильно взаимосвязаны объективные негативные факторы и вработываемость ($r = -0,46$ при $p \leq 0,05$), т. е. чем сильнее действие объективных негативных факторов, тем хуже вработываемость.

Недостаток информации, дефицит времени, новизна или нестандартность обстановки, а также другие объективные негативные факторы отрицательно влияют на скорость включения специалиста в деятельность, потому что невозможно начать действовать, не зная обстановки, целей и задач, что и обуславливает низкий уровень вработываемости.

Эмоциональная устойчивость (фактор С) и объективные негативные факторы имеют обратную, среднюю по силе взаимосвязь ($r = -0,36$ при $p \leq 0,05$), т. е. чем сильнее воздействие объективных негативных факторов профессиональной деятельности, тем ниже уровень эмоциональной устойчивости.

Эта взаимосвязь проста, понятна и логична. При чрезмерном воздействии объективных негативных факторов профессиональной деятельности на со-

трудника ГПС МЧС России (например, при наличии человеческих жертв, длительном течении АСР, нестандартной и непредсказуемой ситуации) эмоциональная устойчивость может дать сбой через острые стрессовые реакции, а затем и посттравматическое стрессовое расстройство.

Таким образом, чем сильнее объективные негативные факторы, тем ярче себя проявляет практическое мышление, направленное на скорейшее решение проблем. Весь процесс АСР ориентирован на скорейшее разрешение сложившейся ситуации. Следовательно, такая взаимосвязь весьма логична.

Другая корреляционная плеяда была построена для субъективных негативных факторов, т. е. факторов необъективных, личностных (например, ответственность, психическое напряжение, аффективные реакции, высокий темп действий и др.) (см. рис. 2). Все полученные корреляции имеют прямой характер.

Фактор F (озабоченность – беспечность) имеет самую сильную взаимосвязь с субъективными негативными факторами профессиональной деятельности ($r = 0,55$ при $p \leq 0,01$). Эта связь указывает на то, что чем сильнее осторожность, сдержанность и пессимистичность, тем ярче проявляются субъективные негативные факторы.

Деятельность пожарного и спасателя подразумевает ежедневный риск в разумных пределах, а чрезмерная осторожность тормозит эффективное выполнение им своих профессиональных обязанностей.

Следующая по силе взаимосвязь обнаружилась между фактором О (тревожность – спокойствие) и субъективными негативными факторами профессиональной деятельности ($r = 0,45$ при $p \leq 0,05$). Фактор О во многом похож на фактор F, поэтому данную взаимосвязь можно рассмотреть с позиции подтверждения ранее выдвинутого предположения: чрезмерная осторожность (в случае с фактором О – тревожность) обуславливает развитие субъективных негативных факторов профессиональной деятельности и пагубно влияет на качественное исполнение должностных обязанностей.

Субъективные негативные факторы профессиональной деятельности оказывают влияние и на вработываемость ($r = 0,31$ при $p \leq 0,05$), т. е. чем сильнее воздействие этих факторов, тем выше уровень вработываемости, и наоборот.

Полученная взаимосвязь указывает на то, что при условии включения в деятельность (профессиональную, психологическую, информационную и т. п.) без предварительной подготовки велика вероятность попасть под действие субъективных негативных факторов, например состояния психического напряжения или совмещения нескольких видов деятельности одновременно.

Заключение

Изучив взаимосвязи между личностными особенностями испытуемых и их оценками негативных факторов своей профессиональной деятельности, можно сделать следующие выводы.

1. Объективные негативные факторы оказывают прямое влияние на вербальные способности, т. е. чем сильнее воздействие этих негативных факторов, тем ярче проявляют себя практическое мышление и коммуникативные навыки.

2. Объективные негативные факторы оказывают обратное влияние на внутреннюю мотивацию профессиональной деятельности, вработываемость и эмоциональную устойчивость, т. е. при воздействии объективных негативных факторов снижается ориентация на процесс профессиональной деятельности, ухудшается способность быстро включаться в него, а также развивается эмоциональная неустойчивость.

3. Субъективные негативные факторы оказывают *прямое влияние* на внутреннюю мотивацию профессиональной деятельности, вработываемость, осторожность и тревожность, т. е. субъективные негативные факторы действуют тем сильнее, чем важнее для сотрудника содержание его профессиональной деятельности и чем легче он вработывается, а также чем сильнее выражена у него осторожность и тревожность.

Сообразно выводам исследования можно предложить следующие рекомендации практического характера.

На уровне статистической достоверности было доказано, что сотрудники, отличающиеся чрезмерной осторожностью в действиях и тревожностью, имеют склонность к более яркому восприятию субъективных негативных факторов (ответственность, высокий уровень неожиданности, аффективные реакции, темп действий и т. д.). В связи с этим можно рекомендовать при необходимости прово-

дить психотерапевтические и психокоррекционные мероприятия, направленные на снижение уровня тревожности. Кроме того, могут быть полезны систематические занятия групп самопомощи, ориентированные на выработку реакции на негативные чувства, связанные с профессиональной деятельностью.

Однако чрезмерная осторожность и тревожность могут быть симптомами протекания негативных внутриличностных процессов, не связанных с профессиональной деятельностью, поэтому психологу важно выстроить доверительный контакт с пожарными-спасателями.

Внешняя мотивация профессиональной деятельности, т. е. стремление к высокой заработной плате и карьерному росту, никак не зависит от влияния негативных факторов, в то время как внутренняя (важность содержания и процесса труда) страдает под влиянием и объективных, и субъективных негативных факторов. С ухудшением трудовой мотивации падает и качество, поэтому важно компенсировать влияние негативных факторов профессиональной деятельности. Следовательно, первоначально следует выявить, какие конкретно негативные факторы с точки зрения сотрудника оказывают на него наибольшее травматическое воздействие в данный момент времени, и в соответствии с полученными данными выстроить программу психологической поддержки или помощи.

Вработываемость — важное качество для пожарного и спасателя, сильное влияние на которое оказывают негативные факторы профессиональной деятельности, поэтому его следует развивать. Уровень вработываемости как способности к быстрому включению в деятельность можно повысить с помощью педагогических мер (повышение осведомленности, тренировка навыков и умений и пр.) и психологических (развитие стрессоустойчивости, групповой сплоченности и т. п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошкарров В. С., Шнайдер Н. В. Влияние экстремальных ситуаций на индивидуально-личностные особенности сотрудников пожарной охраны // Вестник университета (Государственный университет управления). — 2011. — № 7. — С. 55–59.
2. Костюк А. В., Черных А. К., Малыгина Е. А. Использование инновационных технологий в подготовке специалистов для силовых структур // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2015. — № 2(34). — С. 134–138.
3. Armstrong D., Shakespeare-Finch J., Shochet I. Predicting post-traumatic growth and post-traumatic stress in firefighters // Australian Journal of Psychology. — 2014. — Vol. 66, Issue 1. — P. 38–46. DOI: 10.1111/ajpy.12032.
4. Samantha K. Brooks, Rebecca Dunn, Clara A. M. Sage, Richard Amlôt, Neil Greenberg, G. James Rubin. Risk and resilience factors affecting the psychological wellbeing of individuals deployed in humanitarian relief roles after a disaster // Journal of Mental Health. — 2015. — Vol. 24, Issue 6. — P. 385–413. DOI: 10.3109/09638237.2015.1057334.

5. Tak S. W., Driscoll R., Bernard B., West C. Depressive symptoms among firefighters and related factors after the response to Hurricane Katrina // Journal of Urban Health. — 2007. — Vol. 84, Issue 2. — P. 153–161. DOI: 10.1007/s11524-006-9155-1.
6. Ашанина Е. Н., Кулаков Д. В. Выраженность и особенности дезадаптивных нервно-психических состояний у сотрудников ГПС МЧС России // Ученые записки университета имени П. Ф. Лесгафта. — 2011. — № 9(79). — С. 24–28.
7. Манеров Р. В., Шленков А. В., Кошкаров В. С. Функциональная модель развития устойчивости к эмоциональному выгоранию сотрудников пожарных частей // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2014. — № 3. — С. 115–119. URL: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V63/20.pdf> (дата обращения: 01.08.2017).
8. Кручинин С. А. Эмоционально-волевая устойчивость сотрудников спасательных формирований МЧС России к профессиональным стрессовым воздействиям : дис. ... канд. пед. наук. — СПб., 2012. — 149 с.
9. Марченко Д. В. Методика оценки влияния профессиональной деятельности на здоровье личного состава оперативных служб (на примере ФПС МЧС России) // Вестник Восточно-Сибирского института Министерства внутренних дел России. — 2010. — № 3(54). — С. 113–123.
10. Павлова А. М. Ценностно-смысловые ресурсы преодоления витального стресса // Вестник Уральского государственного университета путей сообщений. — 2015. — № 3(27). — С. 45–51.
11. Узун О. Л. Система научного обеспечения профессиональной подготовки специалистов МЧС России к деятельности в чрезвычайных ситуациях : дис. ... д-ра пед. наук. — СПб., 2011. — 346 с.

Материал поступил в редакцию 18 августа 2017 г.

Для цитирования: Шленков А. В., Малыгина Е. А., Москаленко Г. В. Влияние негативных факторов профессиональной деятельности на индивидуально-личностные особенности пожарных и спасателей // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 61–68. DOI: 6610.18322/PVB.2017.26.10.61-68.

English

INFLUENCE OF NEGATIVE OCCUPATIONAL FACTORS ON INDIVIDUAL PERSONAL CHARACTERISTICS OF FIRE AND RESCUERS

SHLENKOV A. V., Doctor of Psychological Sciences, Professor, Head of the Department of Psychology and Pedagogy, Saint Petersburg University of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: 33366610@mail.ru)

MALYGINA E. A., Candidate of Pedagogical Sciences, Academic Secretary of the Academic Council, Saint Petersburg University of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: malygin_com@mail.ru)

MOSKALENKO G. V., Candidate of Psychological Sciences, Lecturer of the Department of Psychology and Pedagogy, Saint Petersburg University of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: moskalenko_galina@list.ru)

ABSTRACT

This paper presents the results of an experimental study how objective and subjective negative occupational factors affect individual and personal characteristics of fire-fighters and rescuers. Objective negative occupational factors are defined as external factors that make a direct threat to life and health, such as: unpredictable nature of accident rescue operations, novelty effect, danger, threat to life, time deficit, etc. Subjective factors refer to emotional and personal experiences: responsibility, high level of neuro-psychic stress, psychological climate within the team, etc. Those factors provided the basis of the questionnaire developed by O. L. Uzun, thanks to which the total sample of volunteers

(86 people) was divided into two groups: group A recognized objective negative factors as more significant in their professional activities while group B, on the contrary, considered that subjective negative factors exert a more significant influence.

Apart from the above-mentioned questionnaire, we used “Schulte’s Tables”, “Red-Black Tables” of Gorbov, professional motivation study technique by Catalin Zamfir (modified of A. A. Rean), R. Amthauer’s Intelligence Structure Test, and the Sixteen Personality Factor Questionnaire by R. Cattell, all of which allowed us to make conclusions about individual characteristics of the respondents. Fire-fighters and rescuers, who identified objective negative factors as the most significant, are marked by high work efficiency and fast adaptability; practical thinking, associated with the ability to quickly solve any arising problem; well-developed verbal skills; emotional robustness and, as a result, stable behavior, calmness and self-confidence. For firefighters and rescuers who marked subjective negative factors as the most significant typical characteristics are: rapid shift of attention; inductive speech thinking and accuracy of verbal formulations; ability to combine and argue relying on common sense; internal motivation for professional activities.

Having studied relationships between personal characteristics of the volunteers and their assessments of negative occupational factors, we drew the following conclusions:

1. Objective negative factors have a direct impact on verbal skills, i. e. the stronger those negative factors affect, the more pronounced are practical thinking and communication skills.
2. Objective negative factors make a reverse affect on internal professional motivation, adaptability and emotional robustness, i. e. influenced by objective negative factors, the focus on the professional process decreases, the ability to quickly join in deteriorates, and emotional instability develops.
3. Subjective negative factors have a direct impact on internal professional motivation, i. e. subjective negative factors are all the more effective the more valuable the content of professional activity is for the volunteers, the easier they feel to adaptability and the more developed their caution and anxiety.

Keywords: negative occupational factors; individual and personal characteristics; professional activity; firefighters; rescuers; professional motivation; intelligence structure.

REFERENCES

1. Koshkarov V. S., Shnayder N. V. Extremal situations impact on individual personal features of fire service staff. *Vestnik universiteta (Gosudarstvennyy universitet upravleniya) / University Bulletin (State University of Management)*, 2011, no. 7, pp. 55–59 (in Russian).
2. Kostyuk A. V., Chernykh A. K., Malygina E. A. Usage of innovation technologies during training of force structures specialists. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2015, no. 2(34), pp. 134–138 (in Russian).
3. Armstrong D., Shakespeare-Finch J., Shochet I. Predicting post-traumatic growth and post-traumatic stress in firefighters. *Australian Journal of Psychology*, 2014, vol. 66, issue 1, pp. 38–46. DOI: 10.1111/ajpy.12032.
4. Samantha K. Brooks, Rebecca Dunn, Clara A. M. Sage, Richard Amlôt, Neil Greenberg, G. James Rubin. Risk and resilience factors affecting the psychological wellbeing of individuals deployed in humanitarian relief roles after a disaster. *Journal of Mental Health*, 2015, vol. 24, issue 6, pp. 385–413. DOI: 10.3109/09638237.2015.1057334.
5. Tak S. W., Driscoll R., Bernard B., West C. Depressive symptoms among firefighters and related factors after the response to Hurricane Katrina. *Journal of Urban Health*, 2007, vol. 84, issue 2, pp. 153–161. DOI: 10.1007/s11524-006-9155-1.
6. Ashanina E. N., Kulakov D. V. Expressiveness and features of desadapted psychological statuses among the employees of the State fire service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. *Uchenye zapiski universiteta imeni P. F. Lesgafta / Scientific Notes of Lesgaft National State University*, 2011, no. 9(79), pp. 24–28 (in Russian).
7. Manerov R. V., Shlenkov A. V., Koshkarov V. S. Functional simulant of development resistance to burnout of firefighters and rescuers. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii. Nauchno-analiticheskiy zhurnal / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia. Scientific and Analytical Magazine*, 2014, no. 3, pp. 115–119 (in Russian). Available at: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V63/20.pdf> (Accessed 1 August 2017).

8. Kruchinin S. A. *Emotional-and-will stability of rescue teams of the Ministry of Emergencies of Russia to professional stress effects*. Cand. ped. sci. diss. Saint Petersburg, 2012. 149 p. (in Russian).
9. Marchenko D. V. Technique of an estimation of influence of professional work on health of staff of field services (on example FF the Ministry of Emergency Measures of Russia). *Vestnik Vostochno-Sibirskogo instituta Ministerstva vnutrennikh del Rossii / Vestnik of the Eastern Siberia Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation*, 2010, no. 3 (54), pp. 113–123 (in Russian).
10. Pavlova A. M. Value-based and conceptual resources to overcome vitality stress. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniy / Herald of the Ural State University of Railway Transport*, 2015, no. 3(27), pp. 45–51 (in Russian).
11. Uzun O. L. *The system of scientific training of specialists of Emercom of Russia to activity in extreme situations*. Dr. ped. sci. diss. Saint Petersburg, 2011. 346 p. (in Russian).

For citation: Shlenkov A. V., Malygina E. A., Moskalenko G. V. Influence of negative occupational factors on individual personal characteristics of fire and rescuers. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 61–68 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.61-68.



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

М. В. АЛЕШКОВ, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника по научной работе, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

И. А. ГУСЕВ, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: ivan.gusev.92@inbox.ru)

УДК 614.847.002.5:620.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ С ВОЗМОЖНОСТЯМИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Проведен анализ и обработка полученных в ходе экспериментального исследования массива данных по определению значений тока утечки по струе огнетушащего вещества при использовании установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки. Установлено, что полученные значения тока утечки подчиняются нормальному закону распределения и наиболее точно описываются степенной зависимостью. Для массива полученных данных определены зависимости величины тока утечки по струе огнетушащих веществ от напряжения и расстояния до объекта, находящегося под напряжением. Показано, что в 95 случаях из 100 определенные экспериментальным путем значения тока утечки не будут превышать рассчитанных по модели значений. Определены рабочие параметры для безопасного использования установок при тушении пожаров электрооборудования под напряжением.

Ключевые слова: тушение пожаров электрооборудования; установки пожаротушения; объекты энергетики; рабочие параметры; установки с гидроабразивной резкой; токи утечки.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.69-76

Введение

Одним из основных критериев применения огнетушащих веществ (ОТВ) и средств их подачи на объектах энергетики является возможность тушения пожаров на электрооборудовании под напряжением.

Анализ пожаров [1–5], происшедших на объектах энергетики (рис. 1), позволил установить, что большинство из них происходит из-за коротких замыканий и перегрузок, связанных с эксплуатацией различного электрооборудования.

Для установления возможности тушения пожаров на электрооборудовании под напряжением необходимо знать параметры тушения, при которых достигаются безопасные условия для участников тушения пожара, а технические средства транспортировки и подачи огнетушащих веществ сохраняют свою работоспособность.

Как показали проведенные ранее исследования, на безопасность применения огнетушащих веществ может влиять большое количество факторов, начиная от состава и структуры ОТВ и заканчивая способами их подачи [7–11]. Так, для определения условий безопасного применения воды проводились экспериментальные исследования, в результате которых было установлено, что одним из способов безопас-

ного применения ее при тушении пожаров на электрооборудовании под напряжением является подача в распыленном состоянии с расстояния не менее 5 м [11, 12]. Результаты исследований нашли свое отражение и в нормативной литературе [13, 14], которая обязательна к применению и регламентирует порядок тушения.

Исследовалась возможность тушения электрооборудования ручными пожарными стволами. Было установлено, что при подаче ОТВ из стволов марки “Курс-8” с расходом 8 л/с при напряжении на мишени 36 кВ с расстояния 3 м возникает ток утечки, равный 11,329 мА. Следовательно, для безопасного применения стволов при заданных параметрах необходимо осуществлять подачу огнетушащих веществ с расстояния не менее 11,5 м [15]. В ходе исследования удалось определить, что использование при тушении пожаров 3 %-ного раствора пенообразователя марки ПО-6А3Ф, подаваемого из стволов “Курс-8” и “Пурга-2”, невозможно исходя из условий безопасности, что также отражено в работе [14].

Однако появление новых технологий пожаротушения позволило в качестве огнетушащего вещества при тушении пожаров на электрооборудовании под напряжением применять и пенные растворы.

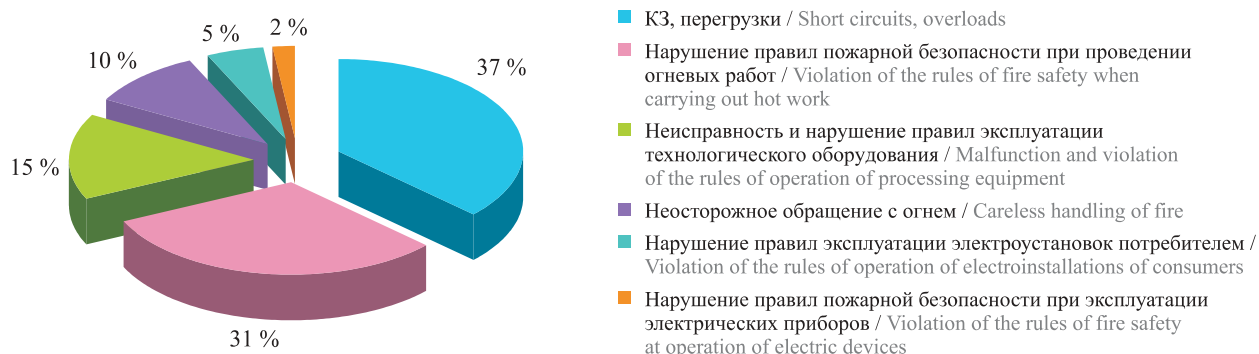


Рис. 1. Причины возникновения пожаров на объектах энергетики / Fig. 1. The causes of the fires on power objects

В настоящее время широкое распространение получила газонаполненная пена. Проведенные исследования позволили установить возможность ее безопасного применения при тушении пожаров на электрооборудовании под напряжением и определить соответствующие рабочие параметры [16].

Результаты исследований свидетельствуют о том, что для определения рабочих параметров средств тушения, транспортирующих и подающих различные огнетушащие составы, необходима комплексная оценка, заключающаяся в проведении как теоретических, так и экспериментальных исследований. В связи с этим основной целью работы являлось определение рабочих параметров установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки. Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач:

- провести экспериментальное исследование для получения массива данных по величине тока утечки при различных расстояниях и напряжениях на экспериментальном стенде;
- выполнить математическую обработку полученного массива данных в целях определения рабочих параметров безопасного применения установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки при тушении пожаров на электрооборудовании под напряжением.

Основная часть

Ранее нами были проведены исследования по определению величины тока утечки по струе огнетушащего вещества при тушении пожаров на электрооборудовании под напряжением с применением системы пожаротушения, обладающей возможностями гидроабразивной резки. Интересен тот факт, что рассматривалась не только струя ОТВ в виде воды, но и струя смеси воды с абразивом [17].

Рассматриваемые системы пожаротушения обладают функциями как поверхностного, так и локально-объемного тушения. Основным огнетушащим компонентом является тонкораспыленная вода со средним диаметром капель около 170 мкм, по-

даваемая в зону горения под давлением до 30 МПа. Имея малые размеры и высокую начальную скорость, капли достигают очага пожара и испаряются, отводя от зоны горения большое количество теплоты, за счет чего обеспечивается ее охлаждение и достигается огнетушащий эффект [18].

Подача огнетушащих веществ в зону горения может осуществляться через оградительные конструкции помещений или других объектов путем их разрушения потоком смеси воды и абразивных частиц. Образующееся отверстие диаметром около 3 мм, через которое производится подача ОТВ, исключает не только приток кислорода воздуха в зону горения, но и воздействие на участников тушения опасных факторов пожара (ОФП).

Результаты экспериментальных исследований позволили получить массив данных и в первом приближении отметить, что пороговое значение тока утечки 0,5 мА превышает на расстоянии до 1 м, а следовательно, подачу огнетушащих веществ следует осуществлять с расстояний, превышающих 1 м.

Для установления рабочих параметров установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки при тушении пожаров на электрооборудовании под напряжением была проведена математическая обработка массива полученных экспериментальных данных методом регрессионного анализа.

Замеры значений тока утечки проводились с расстояний 0,5; 1,0; 2,0 и 3,0 м; при этом на каждом из расстояний при помощи мультиметра замерялись значения тока утечки при напряжениях на мишени экспериментального стенда 10, 20 и 30 кВ.

Для полученного массива экспериментальных данных были определены их статистические оценки — математическое ожидание X и стандартное отклонение σ .

При оценке величины тока утечки более целесообразно рассматривать не средние значения, а доверительные оценки, обеспечивающие надлежащий уровень достоверности полученных экспериментальных данных.

Таблица 1. Значения статистических оценок и доверительного интервала**Table 1.** Values of statistical estimates and confidential interval

ОТВ Fire extinguishing substance	Параметр Parameter	Значение параметра в зависимости от расстояния, м Parameter value depending on distance, m											
		0,5			1,0			2,0			3,0		
		при напряжении, кВ / at tension, kV											
		10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Вода Water	X	311,2	570,9	971,3	67,1	112,4	280,5	58,3	72,0	111,1	51,4	59,0	77,5
	σ	1,3	1,5	1,3	1,0	0,9	1,7	1,0	1,2	1,8	1,1	0,8	0,9
	$X_{\max}$	315,6	576,1	975,6	70,6	115,3	286,1	61,6	75,9	116,9	55,2	61,5	80,5
Абразив Abrasive	X	110,4	371,0	610,7	46,5	90,5	190,4	38,7	55,1	72,6	31,8	47,8	57,7
	σ	1,4	1,6	1,3	0,8	1,2	1,1	0,8	1,2	1,1	0,9	0,9	0,9
	$X_{\max}$	114,9	376,3	614,9	49,2	94,4	194,0	41,3	59,0	76,2	34,9	50,8	60,6

По результату статистической обработки данных было выявлено, что ток утечки может рассматриваться как непрерывная случайная величина, подчиняющаяся нормальному закону распределения. Тогда для уровня значимости $\alpha = 0,001$ (по ГОСТ Р 8.736–2011) она определяется как:

$$X_{p \max} = X + 3,3\sigma. \quad (1)$$

Значения статистических оценок и доверительного интервала приведены в табл. 1.

Для возможности обоснованного использования доверительной оценки тока утечки без ущерба для полученной структуры данных проведена визуализация

средних значений тока утечки (рис. 2) и доверительных оценок (рис. 3).

Анализируя трехмерные изображения, полученные на рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что структура данных при использовании доверительных оценок не изменилась, о чем свидетельствуют достаточно небольшие значения стандартного отклонения по отношению к средним значениям.

Основываясь на результатах исследований [15], для обработки экспериментальных данных использовали степенную зависимость, а при оценке степени аппроксимации экспериментальных данных — коэффициент детерминации R^2 .

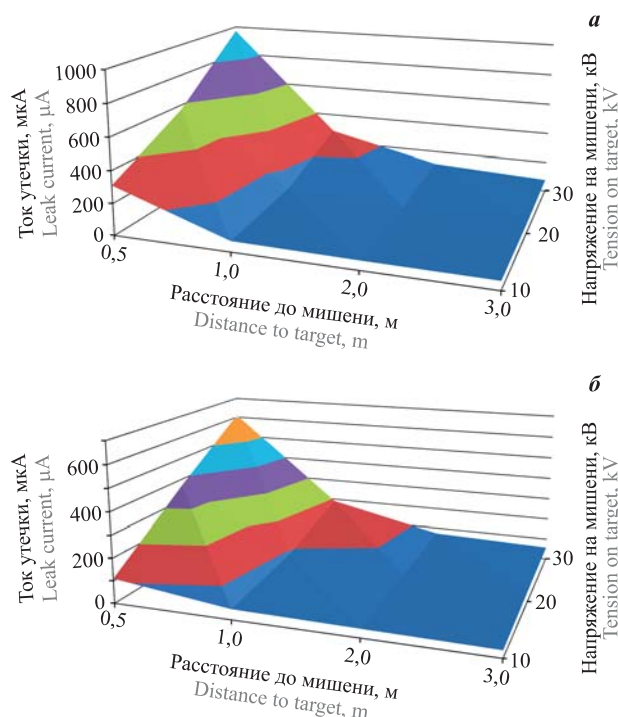


Рис. 2. Графическое отображение данных математического ожидания тока утечки по воде (а) и по воде с абразивом (б)
Fig. 2. Graphic display of data of population mean of leak current on water (a) and with an abrasive (b)

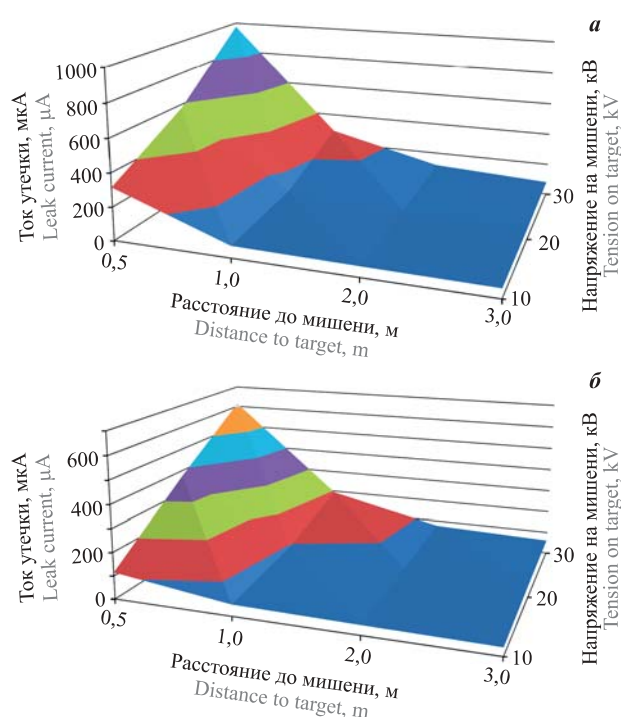


Рис. 3. Графическое отображение данных доверительного интервала тока утечки по воде (а) и по воде с абразивом (б)
Fig. 3. Graphic display of data of a confidential interval of leak current on water (a) and with an abrasive (b)

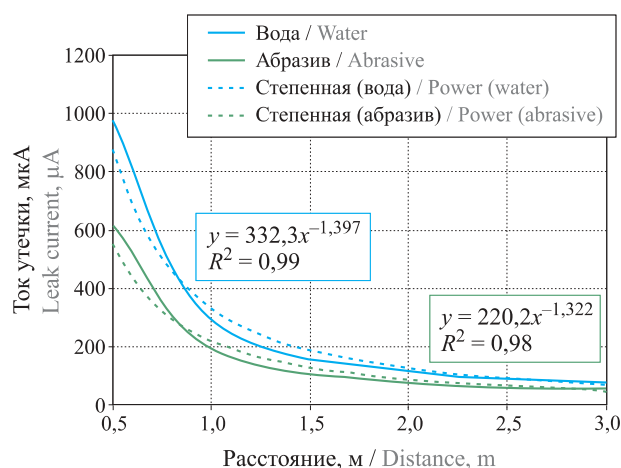


Рис. 4. Зависимость тока утечки от расстояния до мишени при напряжении на ней 30 кВ

Fig. 4. Dependence of values of leak current on distance to a target at a tension on a target of 30 kV

Результаты аппроксимации экспериментальных данных представлены на рис. 4, где в качестве примера приведены значения тока утечки при напряжении 30 кВ.

Коэффициенты полученной степенной зависимости для воды и смеси воды и абразива при различных значениях напряжения представлены в табл. 2.

Из анализа значений коэффициента детерминации (R^2) для рассматриваемых уравнений линии регрессии был сделан вывод, что оценки тока утечки при вариации напряжения на мишени и расстояния до нее, хорошо будут аппроксимированы степенной функцией регрессии, имеющей вид:

$$I = I_0 L^\alpha U^\beta, \quad (2)$$

где I_0 — свободный член модели, мкА (ток утечки);

L — расстояние до мишени, м; $L = 0,5; 1,0; 2,0; 3,0$;

U — напряжение на мишени, кВ;

α, β — эмпирические коэффициенты модели.

На основании анализа коэффициента аппроксимации R^2 , значения которого варьируются от 0,78 до 0,99, использовали доверительную вероятность 95 %, при которой определяли коэффициенты степенной регрессии.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась в программе “EXCEL” (ГОСТ Р 8.736–2011, [19]). При обработке экспериментальных данных было установлено, что полученная математическая зависимость достаточно хорошо описывает эмпирические данные, а коэффициенты аппроксимации составляют: для воды — $R^2 = 0,88$; для смеси воды с абразивом — $R^2 = 0,90$.

В результате обработки экспериментальных данных были получены степенные регрессионные зависимости, представленные в табл. 3.

Верификацию полученных регрессионных зависимостей доверительными оценками эксперимен-

Таблица 2. Коэффициенты регрессионных зависимостей
Table 2. Coefficients of regression dependences

Вид струи Type of a stream	Напряжение на мишени, кВ Tension on a target, kV	Степенная зависимость Power characteristic
Вода Water	10	$I = 120L^{-0,916}, R^2 = 0,78$
	20	$I = 184,8L^{-1,205}, R^2 = 0,88$
	30	$I = 332,3L^{-1,397}, R^2 = 0,99$
Абразив Abrasive	10	$I = 63,5L^{-0,631}, R^2 = 0,88$
	20	$I = 137,3L^{-1,096}, R^2 = 0,90$
	30	$I = 220,2L^{-1,322}, R^2 = 0,98$

Таблица 3. Степенные регрессионные зависимости
Table 3. Sedate regression dependences

Вид струи Type of a stream	Критерий регрессии Criterion of regression	Вид регрессии Type of regression
Вода Water	Нижняя доверительная граница Lower confidential bound	$I = 20,29L^{-1,6}U^{0,45}$
	Ожидаемая регрессия Expected regression	$I = 20,57L^{-1,17}U^{0,775}$
	Верхняя доверительная граница Upper confidential bound	$I = 24,05L^{-0,95}U^{0,9}$
Абразив Abrasive	Нижняя доверительная граница Lower confidential bound	$I = 5,59L^{-1,05}U^{0,92}$
	Ожидаемая регрессия Expected regression	$I = 7,8L^{-1,02}U^{0,955}$
	Верхняя доверительная граница Upper confidential bound	$I = 8,17L^{-0,82}U^{1,1}$

тального наблюдения проведем графически. На рис. 5 показаны графики полученных регрессий и доверительной оценки экспериментальных данных на примере воды и смеси воды и абразива при напряжении 30 кВ.

Из анализа полученных степенных регрессионных зависимостей за модель принимаем уравнение степенной регрессии для верхней доверительной границы, которая гарантирует, что в 95 случаях из 100 определенные экспериментальным путем значения тока утечки не будут превышать рассчитанных по модели значений.

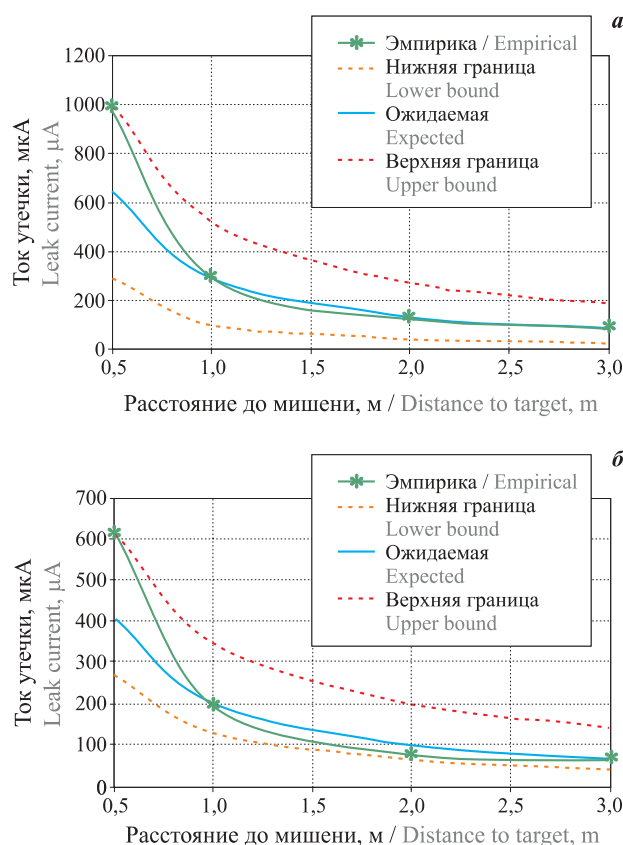


Рис. 5. Соотношение полученных регрессионных зависимостей с эмпирическими данными для воды (а) и смеси воды и абразива (б) при напряжении 30 кВ

Fig. 5. A ratio of the received regression dependences with empirical data for water (a) and mix of water and an abrasive (b) at a voltage of 30 kV

Таким образом, степенные зависимости для определения величины тока утечки в зависимости от расстояния и напряжения на мишени будут иметь вид:

- для воды:

$$I = 24,05L^{-0,95}U^{0,9}; \quad (3)$$

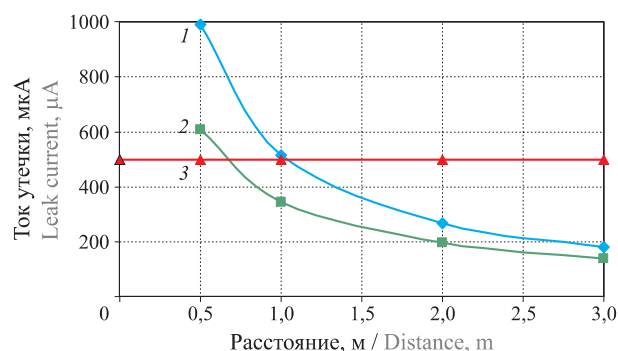


Рис. 6. Расчетные значения тока утечки для воды (1), смеси воды и абразива (2) и ощутимое для человека (3)

Fig. 6. Calculated values of leak current for water (1), mix of water and an abrasive (2) and notable for the person (3)

- для смеси воды и абразива:

$$I = 8,17L^{-0,82}U^{1,1}. \quad (4)$$

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования и их математическая обработка позволили определить рабочие параметры для установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки, которые обеспечивают безопасность их применения при тушении пожаров на электрооборудовании под напряжением до 30 кВ с расстояния не менее 1 м с использованием диэлектрического комплекта в соответствии с нормативным документом [13].

Полученные уравнения позволяют определить значения тока, допустимые для обеспечения работоспособности технических средств, работающих совместно с установками пожаротушения (размещение ствола на роботизированных образцах техники и др.), а следовательно, и для подбора узлов и механизмов, способных работать при возникающих токах утечки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2011 году : статистический сборник / Под общ. ред. В. И. Климкина. — М. : ВНИИПО, 2012. — 137 с.
2. Пожары и пожарная безопасность в 2012 году : статистический сборник / Под общ. ред. В. И. Климкина. — М. : ВНИИПО, 2013. — 137 с.
3. Пожары и пожарная безопасность в 2013 году : статистический сборник / Под общ. ред. В. И. Климкина. — М. : ВНИИПО, 2014. — 137 с.
4. Пожары и пожарная безопасность в 2014 году : статистический сборник / Под общ. ред. А. В. Матюшина. — М. : ВНИИПО, 2015. — 124 с.
5. Пожары и пожарная безопасность в 2015 году : статистический сборник / Под общ. ред. А. В. Матюшина. — М. : ВНИИПО, 2016. — 124 с.
6. Пожары и пожарная безопасность в 2016 году : статистический сборник / Под общ. ред. Д. М. Гордиенко. — М. : ВНИИПО, 2017. — 124 с.
7. Electrical properties of 3M™ Novec™ 1230 fire protection fluid. Compatibility with electrically energized equipment : Technical Bulletin. URL: <http://multimedia.3m.com/mws/media/8615150/3mtm-novectm-1230-fire-protection-fluid-electrical-prop.pdf> (дата обращения: 10.08.2017).
8. Gregory T. Linteris. Clean agent suppression of energized electrical equipment fires. — Quincy : Fire Protection Research Foundation, 2009. — 101 p.

9. Копылов С. Н., Куцук В. А., Баранов Е. В. Определение безопасных расстояний при тушении электроустановок, находящихся под напряжением // Пожарная безопасность. — 2008. — № 3. — С. 52–62.
10. Федяев В. Д. Применение пожарных стволов при тушении пожаров электрооборудования под напряжением // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXVII Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию МЧС России. — М. : ВНИИПО, 2015. — С. 62–72.
11. Алешков М. В., Колбасин А. А. Исследование тока утечки по струе из ручных пожарных стволов при подаче огнетушащего вещества на электрооборудование под напряжением // Энергосбережение и водоподготовка. — 2012. — № 5. — С. 69–71.
12. Навценя Н. В., Исавин Н. В., Поединцев И. Ф., Курбатский О. М. Исследования электропроводности огнетушащих струй и рекомендации по электробезопасности людей при тушении электроустановок // Пожарная профилактика в электроустановках : сб. тр. — М. : ВНИИПО, 1979. — С. 52–62.
13. Об утверждении Правил по охране труда в подразделениях Федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы : приказ Минтруда России от 23.12.2014 № 1100н. URL: <http://base.garant.ru/71018304/> (дата обращения: 10.08.2017).
14. Тактика тушения электроустановок, находящихся под напряжением : рекомендации. — М. : ВНИИПО, 1986. — 17 с.
15. Колбасин А. А. Нормирование требований к средствам тушения электрооборудования под напряжением на объектах энергетики : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2012. — 152 с.
16. Алешков М. В., Емельянов Р. А., Колбасин А. А., Федяев В. Д. Условия применения современных технологий пожаротушения для ликвидации пожаров электрооборудования под напряжением // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 6. — С. 12–18. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.12-18.
17. Алешков М. В., Безбородько М. Д., Гусев И. А. Применение установок пожаротушения с системами гидроабразивной резки на объектах атомной энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2016. — № 4. — С. 7–12.
18. Gsell J. Assessment of fire suppression capabilities of water mist — Fighting Compartment Fires with the Cutting Extinguisher. — Ulster : Ulster University, 2010. — 138 p.
19. Воскобойников Ю. Е., Воскобойникова Т. Н. Решение задач экономики в EXCEL. — Новосибирск : Новосибирский филиал Санкт-Петербургской академии управления и экономики, 2006. — 216 с.

Материал поступил в редакцию 15 августа 2017 г.

Для цитирования: Алешков М. В., Гусев И. А. Определение рабочих параметров установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки, применяемых на объектах энергетики // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 69–76. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.69-76.

English

DETERMINATION OF WORKING PARAMETERS OF THE INSTALLATIONS OF FIRE EXTINGUISHING WITH OPPORTUNITIES OF HYDROABRASIVE CUTTING APPLIED ON POWER OBJECTS

ALESHKOV M. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Chief on Scientific Work, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

GUSEV I. A., Postgraduate Student of Faculty of Training of Research and Educational Personnel, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: ivan.gusev.92@inbox.ru)

ABSTRACT

Suppression of the fires on objects of power represents quite difficult and labor-intensive process. It is connected with existence of a large amount of flammable substances and materials when which

burning conditions, dangerous to the person, are created. The special danger is constituted by the fires on electric equipment where besides the main dangers there is also a defeat threat of electric current. For safety it is necessary to de-energize electric equipment before suppression that can take long time at which the fire will accept the considerable sizes. For implementation of actions for fire extinguishing on electric equipment without removal of tension from his current carrying parts, it is necessary to determine working parameters for fire extinguishing structures and means of their transportation and giving. The analysis of the carried-out works demonstrates that a large number of factors influences the safe conditions of application of fire extinguishing structures and means of their giving. One of types of fire extinguishing substance is sprayed water which is the main fire extinguishing component applied in installations of fire extinguishing with opportunities of hydroabrasive cutting. Feature of installations is the possibility of supply of fire extinguishing substances through protective designs directly to the seat of fire or a zone of burning. Respectively, when determining working parameters of installations of fire extinguishing with hydroabrasive cutting for their application at suppression of the fires of electric equipment pilot studies where the data array has been received have been energized conducted.

Mathematical processing of the obtained experimental data by method of the regression analysis has been made for definition of the equations describing dependence of size of leak current on distance and tension.

As a result of processing of experimental data dependences of size of leak current for water and mix of water and an abrasive have been received from distance and tension on subject to suppression. The received results are comparable to the results received earlier in works on determination of working parameters for manual fire trunks. It demonstrates to reliability of the received results and their correct processing.

The received results allow to speak about a possibility of application of the considered installations of fire extinguishing for elimination of the fires which have arisen on electric equipment energized up to 30 kV from distance not less than 1 meter when using a dielectric set. Also received values need to be used at selection of knots and mechanisms to technical devices into which the fire extinguishing installation trunk, for their steady work and safety will be integrated.

Keywords: suppression of the fires of electric equipment; installations of fire extinguishing; power objects; working parameters; installations with hydroabrasive cutting; leak currents.

REFERENCES

1. Klimkin V. I. (ed.). *Pozhary i pozharnaya bezopasnost v 2011 godu. Statisticheskij sbornik* [Fires and fire safety in 2011. Statistical yearbook]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2012. 137 p. (in Russian).
2. Klimkin V. I. (ed.). *Pozhary i pozharnaya bezopasnost v 2012 godu. Statisticheskij sbornik* [Fires and fire safety in 2012. Statistical yearbook]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2013. 137 p. (in Russian).
3. Klimkin V. I. (ed.). *Pozhary i pozharnaya bezopasnost v 2013 godu. Statisticheskij sbornik* [Fires and fire safety in 2013. Statistical yearbook]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2014. 137 p. (in Russian).
4. Matyushin A. V. (ed.). *Pozhary i pozharnaya bezopasnost v 2014 godu. Statisticheskij sbornik* [Fires and fire safety in 2014. Statistical yearbook]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2015. 124 p. (in Russian).
5. Matyushin A. V. (ed.). *Pozhary i pozharnaya bezopasnost v 2015 godu. Statisticheskij sbornik* [Fires and fire safety in 2015. Statistical yearbook]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2016. 124 p. (in Russian).
6. Gordienko D. M. (ed.). *Pozhary i pozharnaya bezopasnost v 2016 godu. Statisticheskij sbornik* [Fires and fire safety in 2016. Statistical yearbook]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2017. 124 p. (in Russian).
7. *Electrical properties of 3M™ Novec™ 1230 fire protection fluid. Compatibility with electrically energized equipment. Technical Bulletin*. Available at: <http://multimedia.3m.com/mws/media/861515O/3mtm-novectm-1230-fire-protection-fluid-electrical-prop.pdf> (Accessed 10 August 2017).

8. Gregory T. Linteris. *Clean agent suppression of energized electrical equipment fire*. Quincy, Fire Protection Research Foundation, 2009. 101 p.
9. Kopylov S. N., Kushchuk V. A., Baranov E. V. Determination of safe distances at suppression of the electroinstallations which are energized. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2008, no. 3, pp. 52–62 (in Russian).
10. Fedyaev V. D. Application of fire trunks at suppression of the fires of electric equipment energized. In: *Aktualnyye problemy pozharnoy bezopasnosti: materialy XXVII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of fire safety. Proceedings of XXVII International Scientific-and-Practical Conference]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2015, pp. 62–72 (in Russian).
11. Aleshkov M. V., Kolbasin A. A. Leak current research on a stream from manual fire trunks at supply of fire extinguishing substance on electric equipment energized. *Energoberezheniye i vodopodgotovka / Energy Saving and Water Treatment*, 2012, no. 5, pp. 69–71 (in Russian).
12. Navtsenya N. V., Isavin N. V., Poedintsev I. F., Kurbatskiy O. M. Researches of conductivity of fire extinguishing streams and the reference on electrical safety of people at suppression of electroinstallations. In: *Pozharnaya profilaktika v elektroustanovkakh. Sbornik trudov* [Fire prophylaxis in electrical installations. Collected papers]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 1979, pp. 52–62 (in Russian).
13. *About the approval of Rules on labor protection in divisions of a federal fire service of the Public fire service*. Order of Ministry of Labour and Social Protection of the Russian Federation on 23.12.2014 No. 1100n (in Russian). Available at: <http://base.garant.ru/71018304/> (Accessed 10 August 2017).
14. *Taktika tusheniya elektroustanovok, nakhodyashchikhsya pod napryazheniyem. Rekomendatsii* [Tactics of suppression of the electroinstallations which are energized. Recommendations]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 1986. 17 p. (in Russian).
15. Kolbasin A. A. *Rationing of requirements to means of suppression of electric equipment energized on power objects*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, 2012. 152 p. (in Russian).
16. Aleshkov M. V., Emelyanov R. A., Kolbasin A. A., Fedyaev V. D. Terms of the use of modern fire extinguishing technologies for fire liquidation on energized electrical equipment. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 6, pp. 12–18. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.12-18.
17. Aleshkov M. V., Bezborodko M. D., Gusev I. A. The use of fire extinguishing installations with water jet cutting systems at power engineering facilities. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya / Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2016, no. 4, pp. 7–12 (in Russian).
18. Gsell J. *Assessment of fire suppression capabilities of water mist — Fighting compartment fires with the cutting extinguisher*. Ulster, University of Ulster, 2010. 138 p.
19. Voskoboynikov Yu. E., Voskoboynikova T. N. *Resheniye zadach ekonomiki v EXCEL* [The solution of problems of economy in EXCEL]. Novosibirsk, Novosibirsk Branch of Saint Petersburg Academy of Management and Economy Publ., 2006. 216 p. (in Russian).

For citation: Aleshkov M. V., Gusev I. A. Determination of working parameters of the installations of fire extinguishing with opportunities of hydroabrasive cutting applied on power objects. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 69–76 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.69-76.

© А. С. ХАРЛАМЕНКОВ, старший преподаватель, кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: h_a_s@live.ru)

УДК 621.3.002.5-213.34:006.354

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С ВИДОМ ВЗРЫВОЗАЩИТЫ «р» ДЛЯ ПЫЛЕВЫХ СРЕД

Рассмотрен порядок применения взрывозащищенного электрооборудования с видом взрывозащиты “заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением «р»” во взрывоопасных пылевых средах. Дано сопоставление классов взрывоопасных зон с видами взрывозащиты электрооборудования. Отмечены особенности выбора уровней взрывозащиты в зависимости от наличия источников утечки и воспламеняющихся веществ.

Ключевые слова: взрывоопасная среда; пыль; Ex-оборудование; вид взрывозащиты; класс взрывоопасной зоны.



ВОПРОС:

Согласно требованиям “Технического регламента о требованиях пожарной безопасности” [1] (далее — ФЗ-123) пространства помещений, в которых могут образовываться взрывоопасные смеси горючей пыли с воздухом, подразделяются на зоны классов 20, 21 и 22. Для таких помещений требуется установка взрывозащищенного электрооборудования с определенной маркировкой. В ФЗ-123 порядок маркировки такого оборудования не представлен, но в ГОСТ 31610.0–2014 и Техническом регламенте Таможенного Союза (ТР ТС 012/2011) он приведен.

Безопасность работы взрывозащищенного электрооборудования в зоне того или иного класса определяется уровнем взрывозащиты, который обеспечивается выбором и применением специальных мер для предотвращения воспламенения окружающей оборудование взрывоопасной среды. Эти меры формируют конкретный вид взрывозащиты, указанный в маркировке.

Для обеспечения безопасной работы электрооборудования во взрывоопасных пылевых средах 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.

Для каких классов взрывоопасных зон можно использовать электрооборудование с видом взрывозащиты «р»?

ОТВЕТ:

До вступления в силу новой редакции ГОСТ IEC 60079-2–2013 [2] требования к виду защиты «р»

для взрывозащищенного электрооборудования (Ex-оборудование) регламентировались международным стандартом IEC 61241-4 [3], в котором указанный вид обозначался «*pD*» (*D* от англ. *dust* — пыль). При этом стандарт [3] не был переведен на русский язык и внесен в реестр государственных стандартов России, поэтому требования к порядку применения вида взрывозащиты «р» для взрывоопасных пылевых сред на территории РФ отсутствовали. Даже после введения ГОСТ IEC 60079-2–2011 и ГОСТ 30852.3–2002 [4] вид защиты «р» рассматривался только для обеспечения уровней взрывозащиты «*Ma*», «*Gb*», «*Gc*» (взрывоопасные газовые среды).

ГОСТ IEC 60079-2–2013 [2], введенный в июле 2015 г., определил порядок применения Ex-оборудования с видом «р» для взрывоопасных пылевых сред.

Согласно стандарту [2] вид взрывозащиты «р» подразделяется на подвиды «*px*», «*py*», «*pz*» или виды с уровнями «*pxb*», «*pyb*», «*pzc*». Для каждого подвида (вида с уровнем защиты) приводятся конкретные требования по его применению и обеспечению требуемой надежности Ex-оборудования. Подвиды «*px*» и «*py*» могут обеспечить при нормальных режимах работы Ex-оборудования уровень взрывозащиты «*Db*» (класс зоны 21), а «*pz*» — уровень «*Dc*» (класс зоны 22). Помимо этого, стандарт [2] предъявляет требования к электрооборудованию, расположенному внутри защитной оболочки с уровнями защиты «*Db*» и «*Dc*» (см. таблицу).

Кроме указанной в таблице взаимосвязи видов, уровней и классов зон, необходимо учитывать конструктивные особенности оболочки и системы контроля избыточного давления. Минимальное избыточное давление относительно внешнего давления для видов «*px*», «*py*» должно составлять 50 Па, а для вида «*pz*» — 25 Па.

Взаимосвязь классов взрывоопасных зон, видов и обеспечиваемых уровней взрывозащиты *Ex*-оборудования

Вид (вид с уровнем защиты) взрывозащиты <i>Ex</i> -оборудования [2]	Класс взрывоопасной зоны [1]	Обеспечиваемый уровень взрывозащиты <i>Ex</i> -оборудования (п. 4, табл. 1 [2])	Разрешенный уровень защиты <i>Ex</i> -оборудования	
			находящегося под напряжением внутри защитной оболочки (пп. 8.7 и 7.15 [2])	расположенного внутри защитной оболочки (п. 7.16 [2])
<i>p</i> x (<i>p</i> x <i>b</i>)	21	<i>D</i> b	<i>D</i> a, <i>D</i> b	Оборудование без средств взрывозащиты
	22	<i>D</i> c ¹	—	—
<i>p</i> y (<i>p</i> y <i>b</i>)	21	<i>D</i> b ²	—	<i>D</i> a, <i>D</i> b, <i>D</i> c
	22	<i>D</i> c ³	—	—
<i>p</i> z (<i>p</i> z <i>c</i>)	22	<i>D</i> c	<i>D</i> a, <i>D</i> b, <i>D</i> c	Оборудование без средств взрывозащиты

¹ При возможности утечки газа/пара и наличии источника воспламенения, расположенного вне зоны разбавления.

² При уровне взрывозащиты *Ex*-оборудования, расположенного внутри защитной оболочки, не ниже «*D*c».

³ При возможности утечки газа/пара и отсутствии источника воспламенения.

Для обеспечения безопасной работы *Ex*-оборудования с видом защиты «*p*» должны применяться защитные устройства в виде датчиков и индикаторов давления, датчиков расхода, реле времени, аварийной сигнализации и блокировки, обеспечивающей прекращение поступления в оболочку воспламеняющегося вещества.

Каждый подвид взрывозащиты имеет ограничения по самой высокой температуре внешней поверхности оболочки или самой нагретой поверхности внутреннего компонента. Для всех подвидов защиты «*p*» должны учитываться температурные пределы нагрева внешней или внутренней оболочки, выраженные в маркировке температурного класса. В электрооборудовании с оболочкой вида «*p*y» при нормальном режиме работы не допускается появление нагретых частиц, способных вызвать воспламенение горючей смеси.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что вид взрывозащиты «*p*» («*p*x», «*p*y», «*p*z») *Ex*-оборудования может применяться в зонах классов 21 и 22, в которых присутствуют взрывоопасные пылевые среды.

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. ГОСТ IEC 60079-2-2013. Взрывоопасные среды. Часть 2. Оборудование с видом взрывозащиты «оболочки под избыточным давлением *p*». — Введ. 01.07.2015. — М. : Стандартиформ, 2015.

3. IEC 61241-4(2001). Electrical apparatus for use in presence of combustible dust. Part 4. Type of protection «*pD*» (Электрооборудование, применяемое в зонах, опасных по воспламенению горючей пыли. Часть 4. Вид взрывозащиты «*pD*») // International Electrotechnical Commission. First edition. — March, 2001.

4. ГОСТ 30852.3-2002. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 2. Заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением *p*. — Введ. 15.02.2014. — М. : Стандартиформ, 2014.

Для цитирования: Харламенков А. С. Особенности выбора взрывозащищенного электрооборудования с видом взрывозащиты «*p*» для пылевых сред // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 77–78.

English

FEATURES CHOICE OF EXPLOSION-PROOF ELECTRICAL EQUIPMENT WITH THE TYPE OF PROTECTION “*p*” FOR DUST ENVIRONMENTS

KHARLAMENKOV A. S., Senior Lecturer, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: h_a_s@live.ru)

ABSTRACT

It was considered possibility application of explosion-proof electrical equipment with type of protection “filling or purging shell pressurized *p*” in explosive dust environments. A comparison of classes of explosive zones types of ignition protection of electrical equipment was presented. These features of the choice of levels of protection depending on the availability of sources of leakage and flammable substances were considered.

Keywords: explosive atmosphere; dust; *Ex*-equipment; type of protection; class hazardous zone.

For citation: Kharlamenkov A.S. Features choice of explosion-proof electrical equipment with the type of protection «*p*» for dust environments. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 77–78 (in Russian).

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 непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

2.3.1. Имена, отчества и фамилии всех авторов. Они должны приводиться полностью на русском языке и в транслитерации в соответствии с системой, которая в настоящее время является наиболее распространенной (<http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>).

Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома, а также контактные телефоны и электронный адрес всех или хотя бы одного из авторов. При этом не следует приводить составные части названий организаций, обозначающие принадлежность ве-

домству, форму собственности, статус организации (например, “Учреждение Российской академии наук...”, “Федеральное государственное унитарное предприятие...”, “ФГОУ ВПО...” и т. п.), так как это затрудняет идентификацию организации. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

Пример: *Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo Avenue, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

2.4. Аннотация на русском языке должна состоять не менее чем из 5–7 предложений и не должна содержать обобщенные данные по выбранной для статьи 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: подписочной 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 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты и т. п.). При этом процент ссылок на статьи из иностранных научных журналов и других иностранных источников должен быть не ниже 40 %. Выполнение данного требования будет свидетельствовать о том, что авторы используют предыдущие научные достижения в необходимой мере.

Не менее половины источников должно быть включено 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 (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

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

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

При составлении References необходимо следовать схеме:

- авторы (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справаверху флажок “Американская (для визы США)”; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т. п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: Sokolov D. N., Vogman L. P., Zuykov V. A. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35–48 (in Russian) (другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. К статьям следует прилагать рецензию стороннего специалиста (т. е. он не должен быть связан с местом работы (учебы) авторов статьи), которая должна быть подписана рецензентом (с указанием его Ф. И. О., ученого звания, ученой степени, должности, места работы), заверена отделом кадров (ученым секретарем) и печатью. Все рецензенты должны являться признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и иметь в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Обращаем Ваше внимание, что рецензент не должен входить в Редакционный совет нашего журнала.

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

5. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента. Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

6. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати.

Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, предоставившие рукопись для публикации в журнале “Пожаровзрывобезопасность”, согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!

ISSN 0869-7493 (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.