

7-2014

ПОЖ Издательство
НАУКА

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



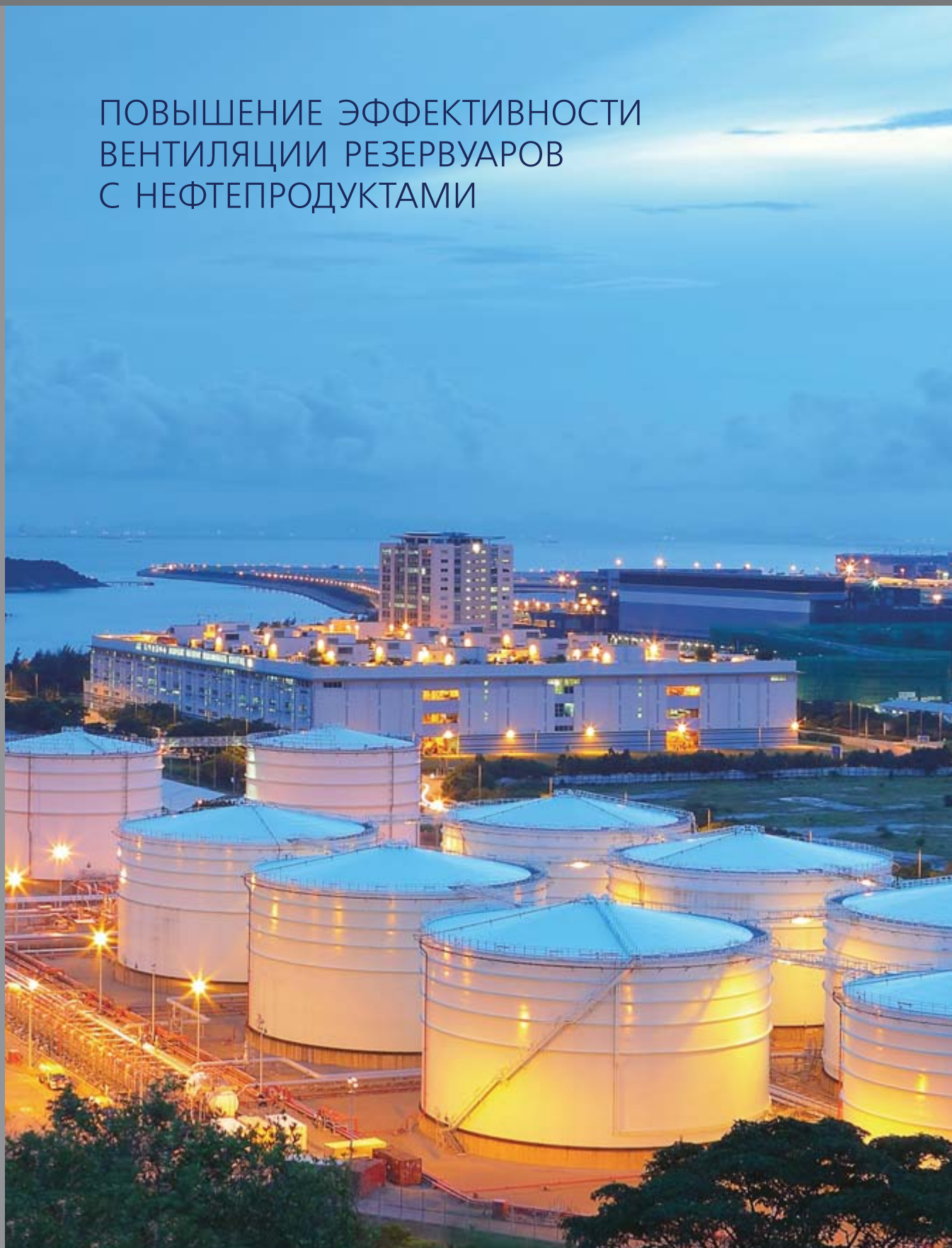
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0869-7493

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВЕНТИЛЯЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ
С НЕФТЕПРОДУКТАМИ

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая





I Международная выставка и конференция

НЕФТЬ И ГАЗ БОЛЬШОГО УРАЛА

9-12 сентября / Екатеринбург

Уважаемые Господа!

Рады пригласить Вашу компанию к участию

ПОЧЕМУ ЕКАТЕРИНБУРГ

Екатеринбург — столица Уральского федерального округа, который является местом сосредоточения крупнейших нефтяных и газовых месторождений, относящихся к Западносибирской нефтегазоносной провинции, в которой сконцентрировано 66,7% отечественных запасов нефти (6%-мировых) и 77,8% запасов газа (26%-мировых).

Согласно Энергетической Стратегии Министерства Энергетики РФ к «2030 году Уральский федеральный округ сохранит за собой позиции главного нефте- и газодобывающего района России, поставляющего энергоносители в энергодефицитные районы страны и на экспорт. Возрастет энергоэффективность экономики региона, будут использованы экологически безопасные и эффективные способы добычи и производства энергоресурсов в сложных природно-климатических условиях».

ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕФТЬ И ГАЗ БОЛЬШОГО УРАЛА» ЭТО:

- Профессиональная площадка, предоставляющая технические возможности для демонстрации новейших технологических решений и продукции
- Практическая диалоговая площадка для всех участников нефтегазового рынка региона, позволяющая специалистам ознакомиться с новейшим оборудованием и технологиями, обменяться актуальными мнениями и информацией
- Максимальное отражение тенденций развития нефтегазовой отрасли региона
- Насыщенная программа специализированных научно-технологических круглых столов и тематических семинаров
- **Конференция – место встречи руководителей высшего звена: представителей власти, первых руководителей добывающих компаний, руководителей компаний-поставщиков оборудования и сервисных компаний.**

РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

- Геологоразведка
- Бурение разведочных и эксплуатационных скважин
- Добыча и переработка нефти и газа
- Нефтегазовое оборудование
- Транспортировка, хранение и сбыт нефти, нефтепродуктов и газа, другие транспортные услуги, логистика
- Геофизические услуги
- Новейшие технологии в сфере геологоразведки и добычи
- Нефтегазохимия
- Сервисное обслуживание на нефтегазовых месторождениях
- Средства промышленной и индивидуальной защиты, программное обеспечение
- Строительные работы
- Инжиниринг и консалтинг
- Экологические природоохранные услуги
- Проектные исследования, проектирование
- Трубопроводы и трубы

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ:

- Международная технологическая конференция «Нефть и Газ Большого Урала»
- Отраслевой всероссийский конкурс им. Ф.С. Прядунова на звание «Лучшего в нефти и газе РФ»
- «Ярмарка вакансий» для молодых специалистов и опытных профессионалов отрасли

Выставочный Комплекс «Екатеринбург-Экспо»

www.uoge.ru E-mail: info@uoge.ru

Тел.: (343) 381-00-25

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

COMBUSTION AND EXPLOSION PROCESSES

ЖДАНОВА А. О., КУЗНЕЦОВ Г. В., СТРИЖАК П. А.
Численное исследование процессов теплопереноса
при подавлении реакции термического разложения
лесного горючего материала группой капель воды

6

ZHDANOVA A. O., KUZNETSOV G. V., STRIZHAK P. A.
Numerical investigation of heat and mass transfer processes
at the thermal decomposition reaction suppressing
for forest fuel by water droplets group

ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

FIRE-AND-EXPLOSION HAZARD OF SUBSTANCES AND MATERIALS

БАРБОТКО С. Л., БАРБОТКО М. С.,
ВОЛЬНЫЙ О. С., ШВЕДКОВА А. К.
Исследование длительных совместных воздействий
факторов температуры и влажности
на пожаробезопасность стеклопластиков

16

BARBOTKO S. L., BARBOTKO M. S.,
VOLNYY O. S., SHVEDKOVA A. K.
Research of joint long-time impacts
of temperature and humidity on fire safety
of glass reinforced polymers

УШКОВ В. А., НЕВЗОРОВ Д. И.,
КОПЫТИН А. В., ЛАЛАЯН В. М.
Воспламеняемость и дымообразующая способность
полимерных материалов, содержащих
производные ферроцена

27

USHKOV V. A., NEVZOROV D. I.,
KOPYTIN A. V., LALAYAN V. M.
Flammability and smoke-forming ability
of polymeric materials containing
ferrocene derivatives

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРОВ

FIRE MODELING

БАРАНОВСКИЙ Н. В., НИ А. Э.
Перспективы развития математического моделирования
процессов теплопереноса в слоях почвы
как инструмента дистанционного исследования
воздействия лесных пожаров на почвы

36

BARANOVSKIY N. V., NI A. E.
Development prospects of mathematical simulation
of heat mass transfer processes in the soil layers
as a tool of remote sensing of forest
fire impact

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

FIRE HAZARD OF ELECTROTECHNICAL PRODUCTS

ВЕРЁВКИН В. Н., МАРКОВ А. Г.
Электрическая прочность диэлектриков
и предельные параметры процессов электризации

46

VEREVKIN V. N., MARKOV A. G.
Electric strength of dielectrics
and the limiting parameters of processes of electrization

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

FIRE-AND-EXPLOSION SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

НАЗАРОВ В. П., КИРШЕВ А. А.
Повышение эффективности вентиляции
резервуаров с нефтепродуктами

52

NAZAROV V. P., KIRSHEV A. A.
Efficiency improvement of ventilation
in tanks with oil-products

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

FIRE SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

КОМАРОВ А. А., ВАСЮКОВ Г. В.,
ЗАГУМЕННИКОВ Р. А., БУЗАЕВ Е. В.
Взрыв газа на газонаполнительной станции
в поселке Чагода. Причины и последствия

58

KOMAROV A. A., VASYUKOV G. V.,
ZAGUMENNIKOV R. A., BUZAEV E. V.
Gas explosion at the gas-filling station in the settlement
of Chagoda. Causes and consequences

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

КОРОЛЬЧЕНКО Д. А., ШАРОВАРНИКОВ А. Ф.
Основные параметры процесса тушения пламени
нефтепродуктов пеной низкой кратности

65

KOROL'CHENKO D. A., SHAROVARNIKOV A. F.
Main parameters of extinguishing of the oil flame
by low expansion foam

КОЖЕВИН Д. Ф., ПОЛЯКОВ А. С.
Единый показатель огнетушащей способности
переносных порошковых огнетушителей

74

KOZHEVIN D. F., POLYAKOV A. S.
Single measure of fire-extinguishing capability
of portable powder fire extinguishers

ГУНДАР С. В., ДЕНИСОВ А. Н.
Интенсивность подачи воды на тушение
кромки низовых лесных пожаров

80

GUNDAR S. V., DENISOV A. N.
Flow rate of water to extinguish the edge
of the creeping forest fires

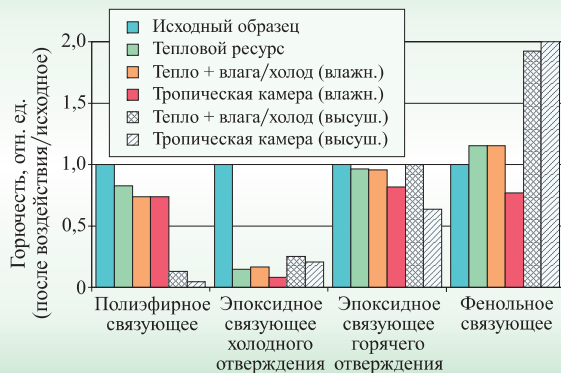
ВОПРОС – ОТВЕТ

86

QUESTION – ANSWER

СМИ зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций —
свидетельство ПИ № ФС77-43615 от 18 января 2011 г.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК России для публикации трудов соискателей
ученых степеней, в Реферативный журнал и базы данных ВИНТИ РАН, в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Сведения
о журнале ежегодно публикуются в Международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям "Ulrich's Periodicals Directory".
Перепечатка материалов журнала "Пожаровзрывобезопасность" только по согласованию с редакцией. При цитировании ссылка обязательна.
Авторы и рекламодатели несут ответственность за содержание представленных в редакцию материалов и публикацию их в открытой печати.
Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов опубликованных материалов.



Исследование климатической стойкости стеклопластиков



Электрическая прочность диэлектриков

Стр. 16

Стр. 46



Повышение эффективности вентиляции резервуаров

Стр. 52



Взрыв газа на газонаполнительной станции в пос. Чагода

Стр. 58

Стр. 74



Кодификация переносных порошковых огнетушителей

Председатель Редакционного совета:

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

Зам. председателя Редакционного совета:

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

Редакционный совет:

Баратов А. Н., д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ,
заслуженный деятель науки РФ (Россия)

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

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

Горбань Ю. И., генеральный директор –
главный конструктор (Россия)

Кирюханцев Е. Е., к. т. н., профессор (Россия)

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

Лейбман М. Е., заслуженный строитель России,
генерал-полковник запаса (Россия)

Меркулов В. А., к. т. н. (Россия)

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

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

Сенин Н. И., к. т. н., профессор (Россия)

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

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

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

Теличенко В. И., д. т. н., профессор, действительный член
РААСН, заслуженный деятель науки РФ (Россия)

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

Тычино Н. А., д. т. н., член-корреспондент МАНЭБ (Белоруссия)

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

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

Шилдс Т. Дж., профессор (Великобритания)

Редакция:

Главный редактор **Корольченко А. Я.**

Шеф-редактор **Соколова Н. Н.**

Редактор **Крылова Л. В.**

Учредитель — ООО "Издательство "ПОЖНАУКА"

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

Адрес редакции: 121108, Россия, г. Москва,
ул. Ивана Франко, д. 4, корп. 10 (фактический);
121352, г. Москва, а/я 43 (почтовый).

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

Подписано в печать 08.07.2014. Выход в свет 25.07.2014.

Формат 60x84 1/8. Тираж 5000 экз.

Бумага мелованная матовая. Печать офсетная.

Отпечатано в типографии ООО "Эрудит"

(127051, Россия, г. Москва, Бульвар Петровский, д. 3, стр. 2).

**Founder:**

"POZHNAUKA" Publishing House, Ltd.

Editorial Staff:

Editor-in-Chief **Korol'chenko A. Ya.**

Editorial director **Sokolova N. N.**

Editor **Krylova L. V.**

Address of Editorial Staff:

Ivana Franko St., 4/10, Moscow,
121108, Russia.

Post office box 43,
Moscow, 121352, Russia.

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

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

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

Chairman of Editorial Board:

Korol'chenko A. Ya.,

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

Deputy Chairman of Editorial Board:

Molkov V. V.,

Doctor of Technical Sciences, Professor (Great Britain)

Editorial Board:

Baratov A. N.,

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

Barbin N. M.,

Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Brushlinskiy N. N.,

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

Gorban Yu. I.,

General Director – Chief Designer (Russia)

Kiryukhantsev Ye. Ye.,

Candidate of Technical Sciences, Professor (Russia)

Korol'chenko D. A.,

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

Leybman M. Ye.,

Honoured Builder of the Russian Federation, Retired Colonel General (Russia)

Merkulov V. A.,

Candidate of Technical Sciences (Russia)

Mishuev A. V.,

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

Roytman V. M.,

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

Senin N. I.,

Candidate of Technical Sciences, Professor (Russia)

Serkov B. B.,

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

Puzach C. V.,

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

Tamrazyan A. G.,

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

Telichenko V. I.,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation (Russia)

Topolskiy N. G.,

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

Tychino N. A.,

Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of International Academy of Ecology and Life Safety (Belarus)

Kholshchevnikov V. V.,

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

Shebeko Yu. N.,

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

Thomas Jim Shields,

Professor (Great Britain)

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

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

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

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

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

Signed for printing 08.07.2014

Date of publication 25.07.2014

Format is 60x84 1/8

Printing is 5 000 copies

Chalk-overlay mat paper

Offset printing



ПРАВИТЕЛЬСТВО
УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ



МИНИСТЕРСТВО
ВНУТРЕННИХ ДЕЛ
ПО УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ



ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
МЧС РОССИИ
ПО УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ



АДМИНИСТРАЦИЯ
ГОРОДА ИЖЕВСКА



УДМУРТСКАЯ
ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННАЯ
ПАЛАТА



ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
«УДМУРТИЯ»



ЧЛЕН
РОССИЙСКОГО
СОЮЗА ВЫСТАВОК
И ЯРМАРОК

ВЫСТАВКА ПРОХОДИТ ПОД ПАТРОНАЖЕМ ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ПАЛАТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

VI Всероссийская
специализированная выставка



Комплексная безопасность

18-21 СЕНТЯБРЯ/ 2014

ПРИГЛАШАЕМ ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ!

- ВЕДУЩИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ ОТРАСЛИ
- ДЕЛОВЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ
- ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ АУДИТОРИЯ

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
ОБЩЕСТВЕННАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧС
БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

**ОДНОВРЕМЕННО СОСТОИТСЯ XII МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА-ЯРМАКА
«РОССИЙСКИЕ ОХОТНИЧЬЕ-СПОРТИВНЫЕ ТОВАРЫ»**

Место проведения:
г. Ижевск, ул. Кооперативная, 9

тел./факс: (3412) 733-581, 733-585, 733-587, 733-664
safe@vcudm.ru | www.safe.vcudm.ru | vk.com/izh_safe

Генеральный
интернет-партнер



Информационные партнеры



ПРОТИВОПОЖАРНЫЙ
СПАСАТЕЛЬНЫЙ СЕРВИС

ПОЖАРНОЕ ДЕЛО

Интернет-партнеры



ПОСТАВЩИКИ МАШИН
И ОБОРУДОВАНИЯ

ОПТОВАЯ ТОРГОВЛЯ
ОПТОВЫЕ ПОСТАВЩИКИ

А. О. ЖДАНОВА, аспирант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: zhdanovaao@tpu.ru)

Г. В. КУЗНЕЦОВ, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплотехники, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: elf@tpu.ru)

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

УДК 536.46

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПОДАВЛЕНИИ РЕАКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА ГРУППОЙ КАПЕЛЬ ВОДЫ

Приведены результаты численных исследований процессов теплообмена при подавлении реакции термического разложения типичных лесных горючих материалов (листья березы, хвоя сосны и ели) группой капель воды. Установлено влияние взаимного расположения капель на поверхности лесного горючего материала (ЛГМ), а также температуры внешней парогазовой смеси на времена подавления (прекращения) его пиролиза. Обоснована нецелесообразность заливания поверхности ЛГМ водой при подавлении химического реагирования в нем в процессе тушения лесных пожаров.

Ключевые слова: лесной горючий материал; вода; капли; термическое разложение; теплообмен.

Введение

Численные [1–3] и экспериментальные [4–6] исследования показали, что при типичном для авиации локальном сбросе воды в зону пламени в процессе тушения лесных пожаров эффективно используется (непосредственно испаряется), как правило, лишь малая часть (менее 10 %) жидкости. Показано [2–5], что для существенного (несколько сотен градусов) снижения температуры пламени с минимальными затратами воды целесообразно мелкодисперсное распыление жидкости. Для снижения температуры реагирующего слоя лесного горючего материала не более чем до 500 К (что соответствует условиям начала пиролиза ЛГМ) достаточна толщина пленок воды несколько миллиметров [2, 3]. При этом время полного подавления (прекращения) реакции в прогретом слое ЛГМ составляет менее 5 мин. Следует отметить, что при движении через пламя малой совокупности капель тушащей жидкости (в частности, воды) поверхности ЛГМ достигает только их некоторая часть [5, 6]. В таком случае при мелкодисперсном распылении маловероятно образование монолитных пленок жидкости на поверхности реагиру-

ющего материала: капли осаждаются на некотором расстоянии друг от друга. В связи с этим представляет интерес анализ возможности подавления (прекращения) реакции термического разложения ЛГМ группой капель, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

Цель настоящей работы — численное исследование процессов теплообмена при подавлении реакции термического разложения типичных лесных горючих материалов (листья березы, хвоя сосны и ели) группой капель воды.

Постановка задачи

При постановке задачи предполагалось, что “водяной снаряд” (большая совокупность капель воды) прошел через пламя и в основном испарился. Поверхности термически разлагающегося ЛГМ достигла лишь малая группа капель. В общем случае расстояния между отдельными каплями воды на поверхности интенсивно пиролизующегося ЛГМ могут быть различными. Из всего многообразия вероятных вариантов расположения группы капель на поверхности ЛГМ наиболее значимым для последующего

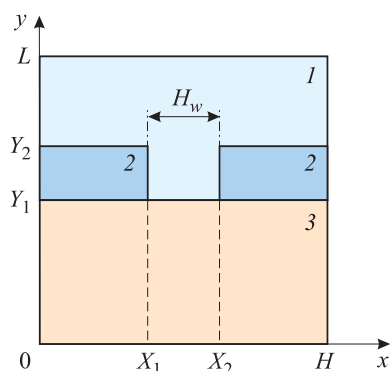


Рис. 1. Схема области решения задачи: 1 — парагазовая смесь; 2 — капли воды; 3 — ЛГМ

анализа является вариант, при котором две капли (рис. 1) находятся на определенном расстоянии друг от друга ($H_w = X_2 - X_1$). Все остальные схемы являются модификациями данного варианта.

Считалось, что жидкость прогревается в процессе теплообмена с термически разлагающимся, нагретым до высоких температур ЛГМ. На всех границах капель воды при достижении соответствующих условий происходит парообразование (испарение). За счет теплоты эндотермического фазового перехода и кондуктивного теплообмена температура ЛГМ снижается.

По результатам численного моделирования определялось время подавления (прекращения) реакции термического разложения ЛГМ t_d , которое характеризуется снижением температуры ЛГМ до температуры начала термического разложения T_d .

Математическая модель и методы решения

Нелинейные нестационарные дифференциальные уравнения тепломассопереноса в частных производных для системы ЛГМ – капли воды – парагазовая смесь (см. рис. 1) при $0 < t < t_d$ имеют следующий вид (согласно теории физико-химических процессов [7–9] при высоких температурах):

- уравнение энергии для ЛГМ ($0 < x < H$, $0 < y < Y_1$):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right) + Q_3 W_3; \quad (1)$$

- уравнение химического реагирования в прогретом слое ЛГМ ($0 < x < H$, $0 < y < Y_1$):

$$\frac{d\varphi_3}{dt} = (1 - \varphi_3) k_3^0 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_3}\right); \quad (2)$$

- уравнение теплопроводности для капель воды ($0 < x < X_1$, $X_2 < x < H$, $Y_1 < y < Y_2$):

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right); \quad (3)$$

- уравнение энергии для парагазовой смеси ($X_1 < x < X_2$, $Y_1 < y < Y_2$, $0 < x < H$, $Y_2 < y < L$):

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right); \quad (4)$$

- уравнение диффузии продуктов термического разложения ЛГМ ($X_1 < x < X_2$, $Y_1 < y < Y_2$, $0 < x < H$, $Y_2 < y < L$):

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = D_{11} \left(\frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_f}{\partial y^2} \right); \quad (5)$$

- уравнение диффузии паров воды ($X_1 < x < X_2$, $Y_1 < y < Y_2$, $0 < x < H$, $Y_2 < y < L$):

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} = D_{12} \left(\frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} \right); \quad (6)$$

где ρ — плотность, кг/м³;

C — теплоемкость, Дж/(кг·К);

T — температура, К;

t — время, с;

λ — теплопроводность, Вт/(м·К);

Q_3 — тепловой эффект термического разложения, Дж/кг;

W_3 — массовая скорость термического разложения, кг/(м³·с);

φ_3 — относительная доля способного к термическому разложению вещества;

k_3^0 — предэкспонента реакции термического разложения, с⁻¹;

E — энергия активации реакции термического разложения, Дж/моль;

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

C_f — безразмерная концентрация газообразных продуктов термического разложения ЛГМ;

D — коэффициент диффузии, м²/с;

C_v — безразмерная концентрация паров воды; индексы: 1 — парагазовая смесь, 2 — вода, 3 — ЛГМ, 11 — водяной пар, 12 — газообразные продукты термического разложения.

Начальные ($t = 0$) условия (см. рис. 1):

- $T = T_0(x, y)$, $\varphi_3 = \varphi_0(x, y)$ при $0 < x < H$, $0 < y < Y_1$;
- $T = T_w$ при $0 < x < X_1$, $X_2 < x < H$, $Y_1 < y < Y_2$;
- $T = T_f$, $C_v = 0$, $C_f = 0$ при $X_1 < x < X_2$, $Y_1 < y < Y_2$, $0 < x < H$, $Y_2 < y < L$.

Здесь $T_0(x, y)$, $\varphi_0(x, y)$ — начальные распределения температуры и доли способного к термическому разложению вещества в ЛГМ; T_w — начальная температура капель воды, К; T_f — начальная температура парагазовой смеси, К.

Граничные условия при $0 < t < t_d$ (см. рис. 1):

- $x = 0, x = H, 0 < y < Y_1$:

$$\partial T_3 / \partial x = 0; \quad (7)$$

- $x = 0, x = H, Y_1 < y < Y_2$:

$$\partial T_2 / \partial x = 0; \quad (8)$$

- $x = 0, x = H, Y_2 < y < L$:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C_v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C_f}{\partial x} = 0; \quad (9)$$

- $y = 0, 0 < x < H$:

$$\partial T_3 / \partial y = 0; \quad (10)$$

- $y = Y_1, 0 < x < X_1, X_2 < x < H$:

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} - Q_3 W_3^\Sigma - Q_2 W_2 = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}; \quad (11)$$

- $y = Y_1, X_1 < x < X_2$:

$$\begin{aligned} -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} - Q_3 W_3^\Sigma &= -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \\ \frac{\partial C_f}{\partial y} &= \frac{W_3^\Sigma}{\rho_{11} D_{11}}, \quad \frac{\partial C_v}{\partial y} = 0; \end{aligned} \quad (12)$$

- $x = X_1, x = X_2, Y_1 < y < Y_2$:

$$\begin{aligned} -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - Q_2 W_2 &= -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}, \\ \frac{\partial C_v}{\partial x} &= \frac{W_2}{\rho_{12} D_{12}}, \quad \frac{\partial C_f}{\partial x} = 0; \end{aligned} \quad (13)$$

- $y = Y_2, 0 < x < X_1, X_2 < x < H$:

$$\begin{aligned} -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} - Q_2 W_2 &= -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \\ \frac{\partial C_v}{\partial y} &= \frac{W_2}{\rho_{12} D_{12}}, \quad \frac{\partial C_f}{\partial y} = 0; \end{aligned} \quad (14)$$

- $y = L, 0 < x < H$:

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 C_f}{\partial y^2} = 0, \quad (15)$$

где Q_2 — тепловой эффект испарения, Дж/кг;

W_2 — массовая скорость испарения, кг/(м²·с).

Массовая скорость испарения жидкости вычислялась по формуле [10]:

$$W_2 = \frac{\beta}{1 - k_\beta \beta} \frac{P^n - P}{\sqrt{2\pi R T_{2s}/M}}, \quad (16)$$

где β, k_β — безразмерные коэффициенты (эмпирические константы) испарения [10, 11];

P^n — давление насыщенных паров воды, Н/м²;

P — давление паров воды вблизи границы испарения, Н/м²;

T_{2s} — температура на границе испарения жидкости, К;

M — молярная масса, кг/кмоль.

Безразмерные параметры β и k_β принимались равными соответственно 0,1 и 0,4 по результатам исследований [10, 11].

Для вычисления массовой скорости термического разложения ЛГМ использовалось выражение [7]:

$$W_3 = \varphi_3 \rho_3 k_3^0 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_3}\right). \quad (17)$$

Давление паров воды рассчитывалось по уравнению Клапейрона–Менделеева [8].

Для учета вдува паров воды и продуктов термического разложения в парогазовую область из-под капель применялись алгоритмы и методы, описанные в [2, 3].

Теплофизические характеристики ЛГМ вычислялись с учетом их изменения в процессе пиролиза:

$$\begin{aligned} \lambda_3 &= \lambda_{31} \varphi_3 + \lambda_{32} (1 - \varphi_3); \\ C_3 &= C_{31} \varphi_3 + C_{32} (1 - \varphi_3); \\ \rho_3 &= \rho_{31} \varphi_3 + \rho_{32} (1 - \varphi_3), \end{aligned} \quad (18)$$

где 31, 32 — индексы, соответствующие твердым и газообразным продуктам пиролиза ЛГМ.

В целях установления начальных для рассматриваемой задачи тепломассопереноса (см. рис. 1) распределений температуры $T_0(x, y)$ и $\varphi_0(x, y)$ в приповерхностном слое ЛГМ толщиной L_f решались задачи, описанные в [12–15]. Вычислялись распределения $T_0(x, y)$ и $\varphi_0(x, y)$ к некоторому моменту времени (характерному для выхода процесса горения материала на стационарный режим) при постоянной температуре внешней газовой среды 1170 К.

Система нестационарных дифференциальных уравнений (1)–(18) решалась методом конечных разностей [16], разностные аналоги дифференциальных уравнений — локально-одномерным методом [16]. Для решения одномерных разностных уравнений применялся метод прогонки с использованием неявной четырехточечной схемы [16]. Нелинейные уравнения решались методом итераций [17]. Для повышения точности решения системы дифференциальных уравнений (1)–(18) применялись неравномерные шаги по времени (10^{-4} – 10^{-2} с) и координатам (10^{-8} – 10^{-6} м). Вблизи границ фазового перехода разностная сетка сгущалась по алгоритму, аналогичному [2, 3].

Методика оценки достоверности результатов выполненных теоретических исследований, основанная на проверке консервативности применяемой разностной схемы, аналогична используемой в [2, 3].

Результаты и их обсуждение

Численные исследования выполнялись при следующих значениях параметров [13–15, 18–21]: начальная температура воды $T_w = 300$ К и парогазовой

смеси $T_f = 300 \div 800$ К; температура начала термического разложения ЛГМ $T_d = 500$ К; кинетические параметры химической реакции: $k_3^0 = 3,63 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, $E_3 = 78,114 \text{ кДж/моль}$, $Q_3 = 1,021 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$; молярная масса воды $M = 18 \text{ кг/кмоль}$; тепловой эффект испарения воды $Q_2 = 2,26 \text{ МДж/кг}$. Толщина прогретого слоя ЛГМ выбиралась типичной для лесных пожаров $L_f = 0,04 \div 0,06 \text{ м}$ [22–24]. Продольные и поперечные размеры капель варьировались в диапазоне $H_{dr} = 0,01 \div 0,05 \text{ м}$ при $L_{dr} = 0,01 \text{ м}$, а расстояние между каплями — $H_w = 0,001 \div 0,090 \text{ м}$. Характерные размеры области решения изменялись в зависимости от значений H_{dr} , H_w и L_f в диапазонах: $H = 0,05 \div 0,10 \text{ м}$, $L = 0,05 \div 0,10 \text{ м}$. Теплофизические характеристики ЛГМ (листья березы, хвоя сосны и ели), продуктов пиролиза, воды и водяных паров принимались согласно [18–21].

На рис. 2 приведены зависимости времени подавления реакции термического разложения наиболее типичного ЛГМ — хвои сосны от расстояния между двумя каплями жидкости H_w при различных температурах в следе “водяного снаряда”. Можно отметить, что при уменьшении H_w время прекращения реакции термического разложения t_d нелинейно снижается. Целесообразно выделить также изменение характера снижения t_d при варьировании температуры парогазовой смеси T_f . Так, при значениях T_f , соответствующих диапазону типичного “водяного снаряда” (300–450 К), зависимости $t_d = f(H_w)$ отличаются незначительно (кривые 1–3 практически “сливаются”). Однако при $T_f > 450$ К и увеличении расстояния H_w до 0,06 м кривые 4–6 существенно (времена t_d отличаются более чем на 45 %) расходятся (рис. 2). Установлено, что при $T_f > 800$ К и $H_w > 0,06 \text{ м}$ реакция термического разложения не подавляется ($t_d \rightarrow \infty$). Поэтому значения $T_f = 800$ К

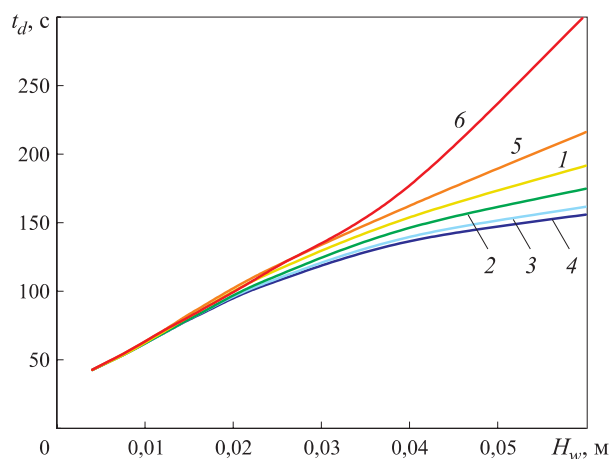


Рис. 2. Зависимость времени подавления реакции термического разложения ЛГМ (хвоя сосны) от параметра H_w при различных температурах в следе “водяного снаряда” и $L_f = 0,04 \text{ м}$: 1 — $T_f = 300$ К; 2 — $T_f = 350$ К; 3 — $T_f = 450$ К; 4 — $T_f = 550$ К; 5 — $T_f = 650$ К; 6 — $T_f = 800$ К

и $H_w = 0,06 \text{ м}$ можно считать предельными для исследуемой системы (см. рис. 1).

Как видно из рис. 2, при $H_w < 0,02 \text{ м}$ кривые 1–6 “смыкаются”. Данный результат показывает, что обеспечиваются условия подавления реакции разложения материала даже при достаточно высоких температурах внешней парогазовой среды. Теплоты фазового превращения при испарении двух “соседних” капель воды достаточно для поглощения энергии, аккумулированной в прогретом слое ЛГМ, и прекращения реакции его термического разложения во всем диапазоне возможного изменения T_f практически за равные значения времени t_d при $H_w = 0,02 \text{ м}$.

В результате обработки зависимостей, приведенных на рис. 2, получен ряд аппроксимационных выражений, наиболее типичными из которых являются:

$$t_d = 5 \cdot 10^{-5} H_w^3 - 0,0332 H_w^2 + 4,0259 H_w + 26,018$$

при $0 < H_w < 70 \text{ мм}$ и $T_f = 300$ К;

$$t_d = 3 \cdot 10^{-5} H_w^3 - 0,0307 H_w^2 + 4,0425 H_w + 25,801$$

при $0 < H_w < 70 \text{ мм}$ и $T_f = 350$ К;

$$t_d = -6 \cdot 10^{-5} H_w^3 - 0,0184 H_w^2 + 3,8476 H_w + 26,461$$

при $0 < H_w < 70 \text{ мм}$ и $T_f = 450$ К;

$$t_d = -2 \cdot 10^{-5} H_w^3 - 0,0199 H_w^2 + 4,0545 H_w + 25,302$$

при $0 < H_w < 70 \text{ мм}$ и $T_f = 550$ К;

$$t_d = 0,0001 H_w^3 - 0,023 H_w^2 + 4,2114 H_w + 24,878$$

при $0 < H_w < 70 \text{ мм}$ и $T_f = 650$ К;

$$t_d = 0,0007 H_w^3 - 0,0352 H_w^2 + 4,084 H_w + 26,114$$

при $0 < H_w < 70 \text{ мм}$ и $T_f = 800$ К.

На рис. 3 приведены зависимости времени подавления реакции термического разложения от температуры в следе “водяного снаряда” T_f при $L_f = 0,04 \text{ м}$ и $H_w = 0,015 \text{ м}$. Рассмотрены три варианта типичных ЛГМ — листья березы, хвоя сосны и ели. Для них можно отметить нелинейный характер зависимостей $t_d = f(T_f)$. Это обусловлено как химическим реагированием в прогретом слое ЛГМ, так и интенсивным парообразованием в малой окрестности поверхности последнего.

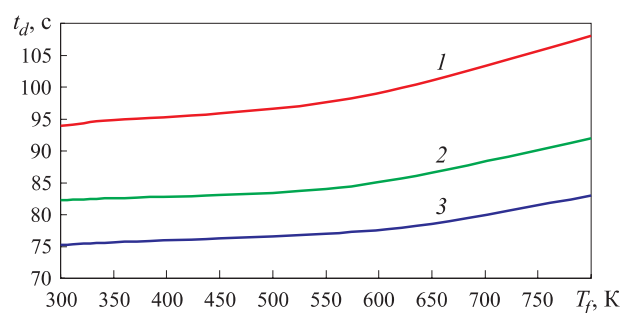


Рис. 3. Зависимость времени подавления реакции от температуры в следе “водяного снаряда” T_f при $L_f = 0,04 \text{ м}$, $H_w = 0,015 \text{ м}$: 1 — листья березы; 2 — хвоя сосны; 3 — хвоя ели

Для зависимостей, приведенных на рис. 3, также получены аппроксимационные выражения:

- для листьев березы:

$$t_d = 7 \cdot 10^{-8} T_f^3 - 6 \cdot 10^{-5} T_f^2 + 0,0271 T_f + 89,253$$

при $300 < T_f < 800$ К;

- для хвой сосны:

$$t_d = 4 \cdot 10^{-8} T_f^3 - 2 \cdot 10^{-5} T_f^2 + 0,0043 T_f + 82,171$$

при $300 < T_f < 800$ К;

- для хвой ели:

$$t_d = 8 \cdot 10^{-8} T_f^3 - 9 \cdot 10^{-5} T_f^2 + 0,0426 T_f + 68,724$$

при $300 < T_f < 800$ К.

Установленные зависимости t_d , $f(H_w)$ и $t_d = f(T_f)$ (см. рис. 2 и 3) можно объяснить тем, что при термическом разложении ЛГМ вследствие интенсивного тепловыделения значительно возрастает температура парогазовой смеси в области между каплями (рис. 4,а). При расстояниях между каплями менее 0,02 м большая доля этого тепла расходуется на реализацию фазовых превращений на боковых границах капель ($X = X_1$, $X = X_2$, $Y_1 < Y < Y_2$) вследствие большого теплового эффекта испарения жидкости ($Q_2 = 2,26$ МДж/кг). В этом случае область прогрева парогазовой смеси ограничивается толщиной каплей жидкости L_{dr} (см. рис. 4,а). При увеличении значений H_w установлено существенное возрастание размеров области прогрева парогазовой смеси относительно L_{dr} (см. рис. 2).

В результате численного моделирования процессов тепломассопереноса в рассматриваемой системе (см. рис. 1) выявлено, что при интенсивном парообразовании значительно возрастают линейные скорости вдува водяных паров во внешнюю парогазовую среду. На рис. 4 приведены изолинии концентраций паров воды и газообразных продуктов пиролиза ЛГМ при $t = 10$ с. Следует отметить, что массовая скорость термического разложения W_3 существенно превышает скорость парообразования W_2 при $1 < t < 3$ с. Процесс вдува продуктов пиролиза в парогазовую область над ЛГМ не вызывает ускорения реакции их окисления, так как в реальном следе “водяного снаряда” окислителя практически нет (относительная концентрация менее 5 %). Как следствие, не формируется область интенсивного тепловыделения в результате химического реагирования, что приводит к инерционному остыванию как парогазовой области, так и приповерхностного слоя ЛГМ (см. рис. 3).

При остывании ЛГМ значения W_3 существенно снижаются (при $t > 5$ с выполняется неравенство $W_3 < W_2$). Установлено, что при $0 < t < t_d$ скорость парообразования сохраняет практически максимальные значения, так как температура на границе вода — ЛГМ не опускается ниже температуры кипения

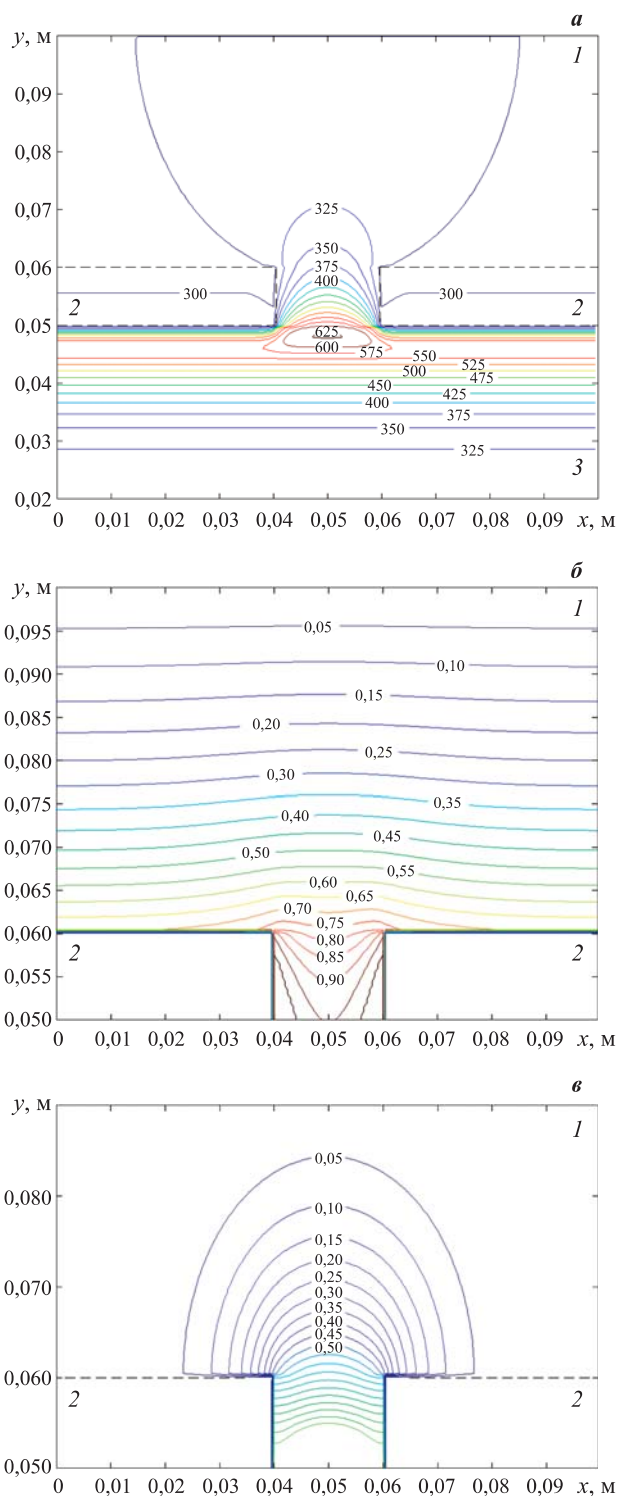


Рис. 4. Изотермы (а), изолинии концентраций паров воды (б) и продуктов пиролиза (в) в системе хвоя сосны – капли воды – парогазовая смесь при $T_f = 300$ К, $H_w = 0,02$ м, $L_f = 0,05$ м, $t = 10$ с: 1 — парогазовая смесь; 2 — капли воды; 3 — ЛГМ

($T_f = 370$ К). В результате концентрация паров воды C_v растет в несколько раз быстрее, чем газообразных продуктов пиролиза C_f (см. рис. 4). Вследствие остывания ЛГМ при дальнейшем увеличении времен реализации рассматриваемых процессов массовые скорости вдува продуктов пиролиза снижают-

ся. Концентрации паров воды C_v к моменту полного прекращения реакции термического разложения материала в несколько раз превышают соответствующие значения C_f . Можно сделать вывод, что даже при наличии незакрытой каплями жидкости поверхности ЛГМ практически всю парогазовую область над ним заполняют водяные пары.

Используя полученные результаты численных исследований, можно сделать заключение о возможности существенного повышения коэффициента эффективного использования воды при тушении пожаров (особенно лесных [22–25]) за счет мелкодисперсного распыления и поддержания некоторой требуемой температуры T_f в течение ограниченного времени t_d . Полученные результаты еще раз подчеркивают целесообразность применения тонкораспыленной воды, паровых завес и различных газопарокапельных смесей как для локализации пламени, так и для полной ликвидации лесных пожаров [26–30].

Заключение

Численные исследования показали, что расстояние между каплями воды H_w существенно влияет на время подавления реакции термического разложения типичных ЛГМ (листья березы, хвоя сосны и

ели). При этом показано, что в зависимости от температуры парогазовой смеси у поверхности ЛГМ и, как следствие, между каплями жидкости времена t_d могут отличаться на 10–40 % при идентичных значениях H_w .

Установлено также, что при варьировании температуры парогазовой смеси в диапазоне, соответствующем типичному следу “водяного снаряда” ($T_f = 300\div 450$ К), время t_d практически не изменяется (отклонения менее 1 %). Это свидетельствует о том, что для подавления реакции термического разложения ЛГМ достаточно сформировать на период времени t_d над его поверхностью парогазовую смесь с температурой 300–450 К за счет мелкодисперсного [4–6] распыления воды в пламенной зоне горения. При этом наличие капель или пленок жидкости большой толщины (существенно превышающей L_f) на поверхности термически разлагающегося ЛГМ объективно избыточно.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации (проект № МК-620.2012.8) и РФФИ (проект № 13-08-90703).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Р. С., Высокоморная О. В., Стрижак П. А. Численное исследование условий взаимодействия диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания // Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 10. — С. 74–79.
2. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние формы капли воды на результаты математического моделирования ее испарения при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Тепловые процессы в технике. — 2013. — № 6. — С. 254–261.
3. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Оценка эффективности использования теплоты испарения воды при тушении лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 9. — С. 57–63.
4. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование полноты испарения распыленной воды при ее движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 10. — С. 15–24.
5. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. О некоторых физических закономерностях испарения распыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 323, № 2. — С. 201–207.
6. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2013. — Vol. 86, No. 6. — P. 1413–1418.
7. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987. — 490 с.
8. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
9. Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. — М.: Наука, 1984. — 277 с.
10. Муратова Т. М., Лабунцов Д. А. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // Теплофизика высоких температур. — 1969. — Т. 7, № 5. — С. 959–967.
11. Кнаке О., Странский И. Н. Механизм испарения // Успехи физических наук. — 1959. — Т. 68, № 2. — С. 261–305.
12. Grishin A. M., Sinitsyn S. P., Akimova I. V. Comparative analysis of thermokinetic constant of drying and pyrolysis of forest fuels // Combustion and Explosion Physics Journal. — 1991. — Vol. 27. — P. 17–24.

13. *Lautenberger C. H., Fernando-Pello C.* A model for the oxidative pyrolysis of wood // *Combustion and Flame*. — 2009. — Vol. 156. — P. 1503–1513.
14. *Барановский Н. В., Гоман П. Н.* Сравнительный анализ численного моделирования и экспериментальных данных по зажиганию лесных горючих материалов лучистым тепловым потоком // *Фундаментальные исследования. Физико-математические науки*. — 2013. — № 10. — С. 747–751.
15. *Жданова А. О.* Определение характерных времен прекращения реакции термического разложения типичных лесных горючих материалов при воздействии “водяного снаряда” // *I Международный форум “Интеллектуальные энергосистемы”, г. Томск*. — 2013. — Т. 1. — С. 295–298.
16. *Самарский А. А.* Теория разностных схем. — М. : Наука, 1983. — 616 с.
17. *Коздоба Л. А.* Методы решения нелинейных задач теплопроводности. — М. : Наука, 1975. — 227 с.
18. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М. : ООО “Старс”, 2006. — 720 с.
19. *Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева*. — М. : Энергия, 1975. — Т. 1. — 743 с.
20. *Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева*. — М. : Энергия, 1975. — Т. 2. — 896 с.
21. *Корольченко А. Я., Корольченко Д. А.* Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. 1. — 713 с.
22. *Гришин А. М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. — Новосибирск : Наука, 1992. — 408 с.
23. *Барановский Н. В.* Детерминированно-вероятностный прогноз лесной пожарной опасности на основе экспериментальных данных по зажиганию лесного горючего материала // *Научные технологии*. — 2009. — Т. 10, № 6. — С. 66–70.
24. *Кузнецов Г. В., Барановский Н. В.* Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. — 301 с.
25. *Гнездилов Н. Н., Козлов И. М., Доброго К. В.* Математическое моделирование горения торфяного слоя. Влияние конденсации паров воды // *Инженерно-физический журнал*. — 2012. — Т. 58, № 5. — С. 982–990.
26. *Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K.* Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles // *Fire Safety Science : Proceeding of Eight International Symposium*. — 2005. — Vol. 27. — P. 753–764.
27. *Соколов В. В., Тугов А. Н., Гришин В. В., Камышев В. Н.* Автоматическое водяное пожаротушение с применением тонкораспыленной воды на электростанциях // *Энергетик*. — 2008. — № 6. — С. 37–38.
28. *Корольченко Д. А., Громоной В. Ю., Ворогушин О. О.* Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2011. — Т. 20, № 11. — С. 54–57.
29. *Андрюшкин А. Ю., Пелех М. Т.* Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2012. — Т. 21, № 1. — С. 64–69.
30. *Ковалев А. Н., Журавлева Л. А.* Перспективные направления тушения низовых лесных и степных пожаров // *Научная жизнь*. — 2012. — № 4. — С. 153–157.

Материал поступил в редакцию 14 января 2014 г.

English

NUMERICAL INVESTIGATION OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES AT THE THERMAL DECOMPOSITION REACTION SUPPRESSING FOR FOREST FUEL BY WATER DROPLETS GROUP

ZHDANOVA A. O., Postgraduate Student of Automation Thermal and Power Processes Department, Power Institute of National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: zhdanovaao@tpu.ru)

KUZNETSOV G. V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Theoretical and Industrial Heat Engineering Department, Power Institute of National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: elf@tpu.ru)

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

ABSTRACT

In this study there are the numerical investigation results of heat and mass processes under the thermal decomposition reaction suppressing of forest fuel by water droplets group.

The time dependence of the thermal decomposition reaction suppressing of typical forest fuels (leaves of birch, pine and spruce needles) on distance between the droplets (H_w) was presented. It has been established that depending on gas-vapor mixture temperature by the forest fuel surface and, as consequence, between water droplets the times t_d may differ by 10–40 % under identic H_w .

The time dependence of the thermal decomposition reaction suppressing of typical forest fuels on gas-vapor mixture temperature was presented. It has been determined that for the thermal decomposition reaction suppressing of forest fuel it is sufficient to form the gas-vapor mixture above its surface with temperature about 300–450 K during t_d by the finely dispersed water spray in the flaming combustion area.

Approximate expressions are obtained, which illustrate the redundancy of large thickness (all the more so they exceed characteristic size of the heated material layer L_f) liquid films formed by the set of droplets on the surface of thermally decomposing forest fuel.

Keywords: forest fuel; water; droplets; thermal decomposition; heat and mass transfer.

REFERENCES

1. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye usloviy vzaimodeystviya dispergirovannogo flegmatizatora goreniya s vysokotemperaturnymi produktami sgoraniya [Numerical investigation of conditions of dispersed phlegmatizer combustion interaction with high-temperature combustion products]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti — Workplace Safety in Industry*, 2012, no. 10, pp. 74–79.
2. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye formy kapli vody na rezultaty matematicheskogo modelirovaniya yeye ispareniya pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Influence of water droplet shape on mathematical modeling results of its evaporation in motion through the high-temperature combustion products]. *Teplovyye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2013, no. 6, pp. 254–261.
3. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Otsenka effektivnosti ispolzovaniya teploty ispareniya vody pri tushenii lesnykh pozharov [Efficiency assessment of water evaporation heat using in woods fire extinguishing]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no 9, pp. 57–63.
4. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye polnoty ispareniya raspylennoy vody pri yeye dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of sprayed water evaporation fullness in its motion through the flame]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no 10, pp. 15–24.
5. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. O nekotorykh fizicheskikh zakonomernostyakh ispareniya raspylennoy vody pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Some physical laws of sprayed water evaporation in motion through high-temperature combustion products]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no 2, pp. 201–207.
6. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 6, pp. 1413–1418.
7. Frank-Kamenetskiy D. A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and heat-transfer process in chemical kinetics]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 490 p.
8. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Theoretical foundations of heat-transfer process]. Moscow, Atomizdat, 1979. 416 p.
9. Paskonov V. M., Polezhaev V. I., Chudov L. A. *Chislennoye modelirovaniye protsessov teplo- i massoobmena* [Numerical modeling of heat and mass transfer]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 277 p.
10. Muratova T. M., Labuntsov D. A. Kineticheskiy analiz protsessov ispareniya i kondensatsii [Kinetic analysis of evaporation and condensation processes]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 1969, vol. 7, no. 5, pp. 959–967.
11. Knake O., Stranskiy I. N. Mekhanizm ispareniya [Evaporation mechanism]. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 1959, vol. 68, no 2, pp. 261–305.

12. Grishin A. M., Sinitsyn S. P., Akimova I. V. Comparative analysis of thermokinetic constant of drying and pyrolysis of forest fuels. *Combustion and Explosion Physics Journal*, 1991, vol. 27, pp. 17–24.
13. Lautenberger C. H., Fernando-Pello C. A model for the oxidative pyrolysis of wood. *Combustion and Flame*, 2009, vol. 156, pp. 1503–1513.
14. Baranovskiy N. V., Goman P. N. Sravnitelnyy analiz chislennogo modelirovaniya i eksperimentalnykh dannykh po zazhiganiyu lesnykh goryuchikh materialov luchistym teplovym potokom [Comparative analysis of numerical simulations and experimental facts on combustible wood ignition by the radiant heat flux]. *Fundamentalnyye issledovaniya. Fiziko-matematicheskiye nauki — Fundamental Research. Physics and mathematics*, 2013, no. 10, pp. 747–751.
15. Zhdanova A. O. Opredeleniye kharakternykh vremen prekrashcheniya reaktsii termicheskogo razlozheniya tipichnykh lesnykh goryuchikh materialov pri vozdeystvii “vodyanogo snaryada” [Termination characteristic times definition of the thermal decomposition reaction of typical combustible wood by “water slug” influence]. *I Mezhdunarodnyy forum “Intellectualnyye energosistemy” [I International Forum “Smart grids”]*. Tomsk, 2013, vol. 1, pp. 295–298.
16. Samarskiy A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
17. Kozdoba L. A. *Metody resheniya nelineynykh zadach teploprovodnosti* [Methods for solving nonlinear heat conduction problems]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 227 p.
18. Vargaftik N. B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Gases and liquids thermophysical properties guide]. Moscow, Stars Publ., 2006. 720 p.
19. Yurenev V. N., Lebedev P. D. (eds). *Teplotekhnicheskyy spravochnik* [Thermophysical guide]. Moscow, Energiya Publ., 1975, vol. 1. 743 p.
20. Yurenev V. N., Lebedev P. D. (eds). *Teplotekhnicheskyy spravochnik* [Thermophysical guide]. Moscow, Energiya Publ., 1975, vol. 2. 896 p.
21. Korol’chenko A. Ya., Korol’chenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing agent: guide]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part 1, 713 p.
22. Grishin A. M. *Matematicheskoye modelirovaniye lesnykh pozharov i novyye sposoby borby s nimi* [Mathematical modeling of woods fires and new ways of firefighting system]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 408 p.
23. Baranovskiy N. V. Determinirovanno-veroyatnostnyy prognoz lesnoy pozharoy opasnosti na osnove eksperimentalnykh dannykh po zazhiganiyu lesnogo goryuchego materiala [Deterministic and probabilistic forecast of woods combustion hazard based on the experimental data about combustible wood ignition]. *Naukoyemkiye tekhnologii — High Technologies*, 2009, no. 6, vol. 10, pp. 66–70.
24. Kuznetsov G. V., Baranovskiy N. V. Prognoz vozniknoveniya lesnykh pozharov i ikh ekologicheskikh posledstviy [Forecast of woods fires beginning and its environmental effects]. Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. 301 p.
25. Gnezdilov N. N., Kozlov I. M., Dobrego K. V. Matematicheskoye modelirovaniye gorennya torfyanogo sloya. Vliyaniye kondensatsii parov vody [Mathematical modeling of the water layer combustion. Effect of water vapor condensation]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 58, no 5, pp. 982–990.
26. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles. *Fire Safety Science: Proceeding of Eight International Symposium*, 2005, vol. 27, pp. 753–764.
27. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniyyem tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automatic water-based fire suppression with using water spray in power stations]. *Energetik — Energetic*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
28. Korol’chenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Water spray application for fires extinction in the high buildings]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no 11, pp. 54–57.
29. Andryushkin A. Yu., Pelekh M. T. Effektivnost pozharotusheniya tonkoraspylennoy vodoy [The effectiveness of water spray firefighting]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere — Control Risks Issues in a Technosphere*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 64–69.
30. Kovalev A. N., Zhuravleva L. A. Perspektivnyye napravleniya tusheniya nizovykh lesnykh i stepnykh pozharov [Promising directions of ground wood and steppe fires extinction]. *Nauchnaya zhizn — Scientific Life*, 2012, no 4, pp. 153–157.



Пенообразователи

ШТОРМ

Точный расчет на безопасность!

РЕКЛАМА

Шторм-ОН — синтетический углеводородный пенообразователь общего назначения. Основная область применения: для нужд пожарных бригад в городах, для тушения лесов, деревянных строений, торфяников. Относится к биологически маловредным средствам (БИО). Срок годности пенообразователя до 5 лет, после чего необходимо либо проводить дополнительные исследования, либо использовать его для учений.

ГЕФЕСТ

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ

Тел.: (495) 925 51 31

www.gefestnpk.ru

www.shtpena.ru

С. Л. БАРБОТЬКО, канд. техн. наук, начальник лаборатории "Исследование неметаллических материалов на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность", ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ)" ГНЦ РФ (Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, 17; e-mail: slbarbotko@yandex.ru)

М. С. БАРБОТЬКО, инженер-экспериментатор 1-й категории, ОАО НПО "Энергомаш" им. академика В. П. Глушко (Россия, 141401, Московская обл., г. Химки, ул. Бурденко, 1)

О. С. ВОЛЬНЫЙ, ведущий инженер лаборатории "Исследование неметаллических материалов на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность", ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ)" ГНЦ РФ (Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, 17)

А. К. ШВЕДКОВА, ведущий инженер лаборатории "Исследование неметаллических материалов на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность", ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ)" ГНЦ РФ (Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, 17)

УДК 614.841.41:629.7.042.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ СОВМЕСТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ФАКТОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

С использованием лабораторных методов испытаний на климатическую стойкость исследовано длительное (до 90 сут) совместное влияние факторов температуры и повышенной влажности на изменение характеристик пожарной опасности стеклопластиков на полимерных матрицах различной химической природы. Исследования климатической стойкости проводили по двум режимам: имитация суточного хода температуры и влажности в условиях тропического климата; экспозиция в стационарных условиях при повышенной температуре и влажности с периодическим наложением термоциклов (воздействие отрицательных температур). Полученные результаты сопоставлены с характеристиками исходных материалов и материалов, подвергнутых только тепловому старению. Показано, что после длительного совместного воздействия температуры и повышенной влажности в зависимости от химической природы полимерной матрицы могут существенно изменяться характеристики горючести, дымообразования и тепловыделения, причем в зависимости от вида полимерной матрицы в сторону как снижения, так и увеличения.

Ключевые слова: стеклопластик; полимерный композиционный материал; пожаробезопасность; горючесть; дымообразование; тепловыделение; термовлажностное старение; климатическая стойкость.

Введение

Изделия, имеющие длительные сроки эксплуатации или хранения, подвергаются воздействию климатических факторов. Вид и интенсивность последних могут существенно варьироваться в зависимости от условий хранения и эксплуатации изделий.

В последнее время в машиностроении (авиа-, судостроении и др.) растет спрос на детали из полимерных конструкционных материалов (ПКМ), специальные лакокрасочные покрытия, изолирующие и шумопоглощающие покрытия, различные функциональные полимерные материалы [1].

Использование полимерных композиционных материалов в конструкциях авиационной техники и других сложных технических систем достигает в настоящее время 50 % [2].

В процессе хранения и эксплуатации изделий, материалы, из которых они изготовлены, подвергаются длительному воздействию различных климатических факторов, в результате чего происходит изменение их характеристик [3, 4].

Согласно литературным данным [5] наиболее существенное влияние на техническое состояние изделий оказывает не механический износ, а про-

цессы коррозии и старения под влиянием факторов окружающей среды. Так как авиационная техника и другие высокотехнологичные изделия, как правило, имеют длительные сроки службы, необходимо, чтобы в течение всего заявленного периода сохранялся требуемый уровень их свойств. Согласно требованиям пп. 25.609 и 25.613 Авиационных правил [6] каждый элемент конструкции должен быть защищен от атмосферного воздействия, приводящего к снижению прочностных характеристик. Однако на безопасность сложных технических систем влияет сохраняемость уровня не только физико-механических свойств, но и других видов служебных характеристик.

Одним из важнейших параметров, влияющих на безопасность людей, выживаемость их в условиях чрезвычайных ситуаций и сохранение работоспособности изделий, является уровень характеристик пожарной опасности материалов, определяющий общую пожаробезопасность изделия. Наиболее подвержены воздействию переменных температур и повышенной влажности материалы, используемые для внешнего контура изделий. В связи с расширением использования ПКМ для изготовления конструктивных элементов, контактирующих с окружающей средой, необходимо представлять, насколько критичным может быть воздействие факторов внешней среды с точки зрения сохранения пожаробезопасности. Важность проведения таких исследований отмечалась неоднократно [7–10].

В настоящее время имеются отдельные данные по оценке воздействия климатических факторов на пожаробезопасность древесных материалов [11, 12], ПВХ-пластикатов и других материалов для электрокабельных изделий [13–15], на изменение свойств огнезащитных покрытий [16–20]. Данные по климатической стойкости ПКМ относительно характеристик пожарной опасности практически отсутствуют.

Согласно [21] по физико-механическим и химическим характеристикам образцы, вырезанные из высушенных элементов конструкций самолета после 20-летней эксплуатации, в общем идентичны материалам, подвергнутым тепловому старению при температуре 120 °С в течение 2000 ч. Исследования [22, 23] показали, что для ряда стеклопластиков после термостарения ухудшения пожаробезопасности материалов по выбранным характеристикам оценки пожарной опасности не происходит. Это может быть объяснено отсутствием в процессе теплового воздействия интенсивной термодеструкции полимерных матриц, а также возможным протеканием под действием длительных повышенных температур процессов релаксации внутренних напряжений, перегруппировкой структур, дополнительной

сшивкой полимерных цепей и удалением низкомолекулярных горючих полупродуктов.

Нормативная документация [24] рекомендует при прогнозировании климатической стойкости полимерных материалов не ограничиваться только режимом теплового старения, а реализовать комплексное эксплуатационно-климатическое воздействие на материал, сочетающее в себе все воздействующие факторы (повышенные и пониженные температуры, влажность, солнечное излучение и т. п.). В настоящей работе продолжены исследования, начатые в [23], и проведена оценка комбинированного воздействия температуры и повышенной влажности на изменение регистрируемых характеристик пожарной опасности полимерных композиционных материалов.

Материалы и методы испытаний

Для выполнения данных исследований были использованы образцы четырех типов стеклопластиков на основе различных полимерных связующих:

- полиэфирной смолы;
- эпоксидной смолы холодного отверждения;
- эпоксидной смолы горячего отверждения;
- фенольной смолы.

Подробная характеристика образцов приведена в [23]. Для данных исследований использовались образцы, изготовленные из тех же партий стеклопластиков, что и для ранее проведенной работы. Выполнение этого условия обеспечило возможность сопоставления изменения свойств после различных видов воздействий без оценки изменения толщины, содержания связующего, структуры композиционного материала. Существенность влияния указанных факторов на характеристики пожарной опасности показана в [25–28].

В результате воздействия повышенной влажности атмосферного воздуха происходит влагонасыщение испытываемых образцов, что может неоднозначно сказаться на изменении характеристик пожарной опасности. Вполне ожидаемо, что могут улучшиться характеристики горючести и тепловыделения (уменьшиться продолжительность остаточного горения, длина прогорания, интенсивность и общее количество выделившегося тепла). Одновременно могут ухудшиться характеристики дымообразования. В то же время воздействие влаги может вызвать изменение химической структуры и состава полимерной матрицы (разрыв или образование новых химических связей, удаление низкомолекулярных горючих полупродуктов и антипиренов), повысить пористость и дефектность материала, что может привести к изменению процессов термодеструкции и, как следствие, повлиять на все характеристики пожарной опасности. Поэтому для все-

сторонней оценки влияния факторов климата на характеристики пожарной опасности целесообразно подвергать испытаниям как влажные образцы, так и высушенные после тепловлажностного воздействия.

Исследование совместного влияния температуры и повышенной влажности проводили при двух различных режимах, используя следующие методики.

Метод 1 — тропический климат. Одни сутки испытания имитируют одни сутки экспозиции в условиях тропической зоны. Образцы выдерживают в специальной климатической камере (камера тропического климата), для которой задан регламентированный переменный тепловлажностный режим:

- температура $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$, относительная влажность $(98 \pm 2)\%$ — 8 ч;
- температура $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, относительная влажность $(98 \pm 2)\%$ — 12 ч;
- температура $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, относительная влажность $(50 \pm 10)\%$ — 4 ч.

Общая продолжительность экспозиции образцов составляла 90 суток.

Метод 2 — комплексные тепловлажностные испытания с наложением термоциклов (отрицательных температур). Испытания проводили согласно указаниям, приведенным в ГОСТ 9.707–81 (метод 2) [24]. Образцы подвергали комбинированному воздействию с постоянными значениями повышенной температуры и влажности (теповлажностные испытания) и с заданной периодичностью — воздействию отрицательных температур (перепадов температур). Тепловлажностные испытания проводили при следующем стационарном режиме: повышенная температура 60°C , относительная влажность 85 %. Имитация воздействия перепадов температур осуществлялась после каждых 8 сут тепловлажностной экспозиции при следующем режиме: образцы выдерживали в течение 2 ч в холодильной камере при температуре минус 60°C , после чего возвращали их в тепловлажностную камеру. Всего было выполнено 10 циклов воздействия равномерно распределенных перепадов температур в течение общей 90-суточной экспозиции.

Испытание образцов на тепловлажностные воздействия осуществлялось в климатических камерах марки Excal 7723-НА (тепло + холод + влага) и камере Excal 2221-ТА (тепло + холод) (Climats, Франция). Процесс влагонасыщения контролировался по изменению массы образцов, предназначенных для определения характеристик пожарной опасности.

После экспозиции в климатических камерах по методам 1 и 2 проводили сушку части образцов в термостатах при температуре $(110 \pm 2)^\circ\text{C}$ до постоянной массы в течение не менее 24 ч.

Для исключения изменения влагосодержания материалов перед испытаниями на определение характеристик пожарной опасности образцы кондиционированию не подвергали, а проводили только их охлаждение до температуры окружающей среды $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ в течение не более 0,5 ч.

Характеристики пожарной опасности оценивали по показателям горючести, дымообразования и тепловыделения при горении согласно требованиям [6]. Подробное описание методик и оборудования для проведения испытаний приведено в [22, 29, 30]. Исходя из предварительной оценки возможного направления влияния фактора влажности и с целью оптимизации количества испытываемых образцов, испытания на горючесть и тепловыделение проводили как для увлажненных, так и высушенных образцов испытания на дымообразование — только для увлажненных образцов.

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены графики кинетики изменения влагосодержания образцов в процессе тепловлажностных испытаний. Влагосодержание рассчитывалось как относительное увеличение массы по сравнению с исходным материалом. Каждая точка является средним арифметическим из измерений девяти образцов, испытываемых на горючесть, дымообразование и тепловыделение. Влагосодержание образцов зависело от формы и размеров, однако воздействие этих факторов в данных условиях эксперимента было незначительным по сравнению с влиянием вида полимерной матрицы и условий экспонирования.

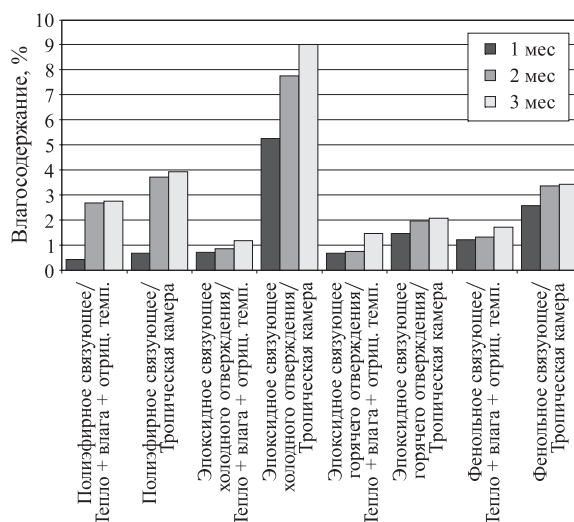


Рис. 1. Изменение массы (влагосодержания) образцов стеклопластиков на различных полимерных матрицах при экспозиции в климатических камерах

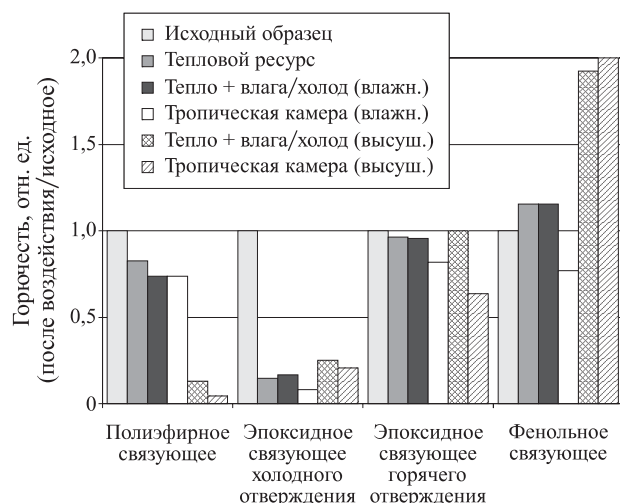


Рис. 2. Относительное изменение горючести высушенных образцов стеклопластиков на различных полимерных матрицах после тепловлажностных воздействий

За выбранный период (90 сут) образцы практически достигли предельного влагонасыщения в заданных условиях экспозиции. При экспозиции в стационарных условиях (камера — тепло + влага), по сравнению с тропической камерой, хотя образцы подвергались воздействию воздуха с большей абсолютной влажностью, влагосодержание образцов было существенно меньше. Это объясняется наличием в комплексном режиме испытания экспозиции при экстремально низкой температуре, что приводит к некоторому высушиванию образцов. Наиболее значительно это отличие для стеклопластика на эпоксидном связующем холодного отверждения, что может быть объяснено активным взаимодействием воды и эпоксидной матрицы [31].

На диаграммах (рис. 2–4) приведено сопоставление изменения относительных характеристик пожарной опасности по показателям горючести, оптической плотности дыма и тепловыделения после воздействия тепловлажностных факторов климата. Там же для сравнения приведены данные по характеристикам пожаробезопасности, полученным для исследованных образцов после теплового старения [23].

Сопоставление влияния тепловлажностных факторов климата на характеристики горючести представлено на рис. 2. Образцы стеклопластиков на полиэфирном связующем и эпоксидном связующем холодного отверждения при испытаниях на горючесть распространяли пламя по всей поверхности как в исходном состоянии, так и после климатических испытаний. Поэтому сопоставление изменения характеристики горючести проводили по параметру остаточного самостоятельного горения образца после его экспозиции над пламенем газовой горелки. Образцы стеклопластиков на эпоксидном связу-

ющем горячего отверждения и фенольном связующем как в исходном состоянии, так и после климатических испытаний не имели остаточного горения, поэтому оценка влияния факторов климата на характеристику горючести проводилась по показателю длины прогорания образца после регламентированного воздействия пламени.

Вследствие воздействия тепловлажностных факторов у образцов ПКМ на основе полиэфирной смолы и эпоксидной смолы холодного отверждения изменялась продолжительность остаточного горения. Так, у образцов ПКМ на основе эпоксидного связующего холодного отверждения после воздействия факторов климата существенно снижалась продолжительность остаточного горения. Значимого различия между разными видами климатических испытаний на характеристики горючести не выявлено: продолжительность остаточного горения увлажненных образцов, образцов после теплового старения и высушенных образцов после тепловлажностных испытаний имеет различия, сопоставимые с разбросом данных, наблюдаемым при испытаниях параллельных образцов.

У образцов ПКМ на основе полиэфирного связующего после воздействия тепловлажностных факторов по сравнению с тепловым старением наблюдается незначительное снижение продолжительности остаточного горения. Сушка образцов после тепловлажностного старения приводит к существенному сокращению продолжительности остаточного горения. Трактовка этого факта с точки зрения изменения пожаробезопасности материала может быть неоднозначной, так как во всех случаях происходит прогорание образца материала по всей длине.

У стеклопластика на эпоксидном связующем горячего отверждения изменения пожаробезопасности по характеристикам горючести после воздействия климатических факторов практически не происходит: продолжительность остаточного горения для всех испытанных образцов составляет 0 с, длина прогорания меняется незначительно. Наибольшее изменение длины прогорания по сравнению с исходным материалом зафиксировано у образцов, высушенных после тропической камеры: длина прогорания в среднем уменьшилась на 40 мм и составила около 63 % от исходной.

У стеклопластика на фенольном связующем после воздействия тепловлажностных факторов характеристики горючести практически не изменились. Однако у высушенных образцов после тепловлажностного воздействия длина прогорания возросла в 2 раза (на 12–15 мм).

Таким образом, длительное тепловлажностное воздействие может сказываться на характеристиках горючести стеклопластиков. В зависимости от типа

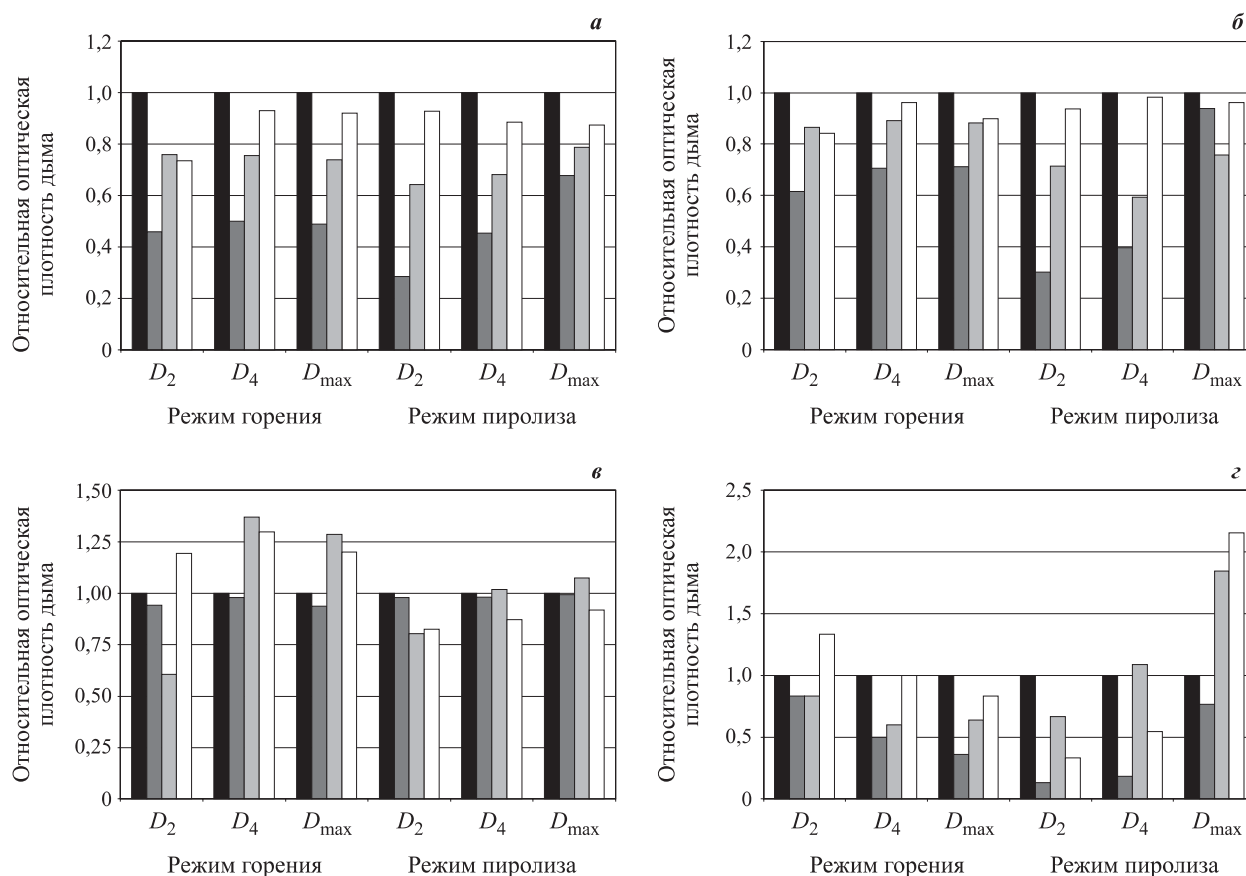


Рис. 3. Относительное изменение оптической плотности дыма образцов стеклопластиков на различных полимерных матрицах под воздействием факторов, имитирующих климатические и тепловые условия эксплуатации: *a* — на полиэфирном связующем; *б* — на эпоксидном связующем холодного отверждения; *в* — на эпоксидном связующем горячего отверждения; *г* — на фенольном связующем; ■ — исходные образцы; ■ — после теплового старения; ■ — после тепловлажностного воздействия с наложением термоциклов; □ — после старения по режиму тропического климата

полимерной матрицы, вида воздействия и состояния образцов после испытаний характеристики горючести могут как оставаться практически постоянными, так и изменяться в большую или меньшую сторону.

Данные по относительному изменению интенсивности оптической плотности дыма для образцов стеклопластиков приведены на рис. 3, *a–г*.

У образцов на основе наименее термостойких полимерных связующих, имеющих высокую дымообразующую способность (полиэфирное, эпоксидное холодного отверждения), по сравнению с исходным материалом зафиксировано существенное снижение оптической плотности дыма после теплового старения, особенно на начальном этапе термодеструкции (дымообразование за 2 и 4 мин D_2 и D_4), как в режиме пиролиза, так и в режиме горения. Совместное действие температуры и влажности при обоих выбранных режимах привело к увеличению дымообразования по сравнению с образцами, подвергнутыми только тепловому старению, однако уровень исходного материала не был превышен.

У образцов стеклопластика на эпоксидном связующем горячего отверждения в режиме пиролиза

не зафиксировано значимого изменения дымообразующей способности, а в режиме горения дымообразование за 4 мин и максимально достигаемое в процессе испытания (D_{max}) превысили уровень исходного материала на 20–30 %.

Для стеклопластика на фенольном связующем установлено увеличение дымообразования по сравнению с образцами, предварительно подвергнутыми тепловому старению, причем в отдельных случаях дымообразование превышало и уровень, определенный для исходного материала.

Таким образом, у образцов стеклопластиков, подвергнутых испытаниям, происходило изменение дымообразующей способности под совместным действием факторов температуры и влажности. Показатели дымообразования для образцов стеклопластиков возрастали с повышением их влагосодержания, однако однозначной корреляционной зависимости между содержанием влаги в материале и относительным изменением показателей дымообразования установить не удалось.

Данные по изменению максимальной интенсивности и общего количества выделившегося при го-

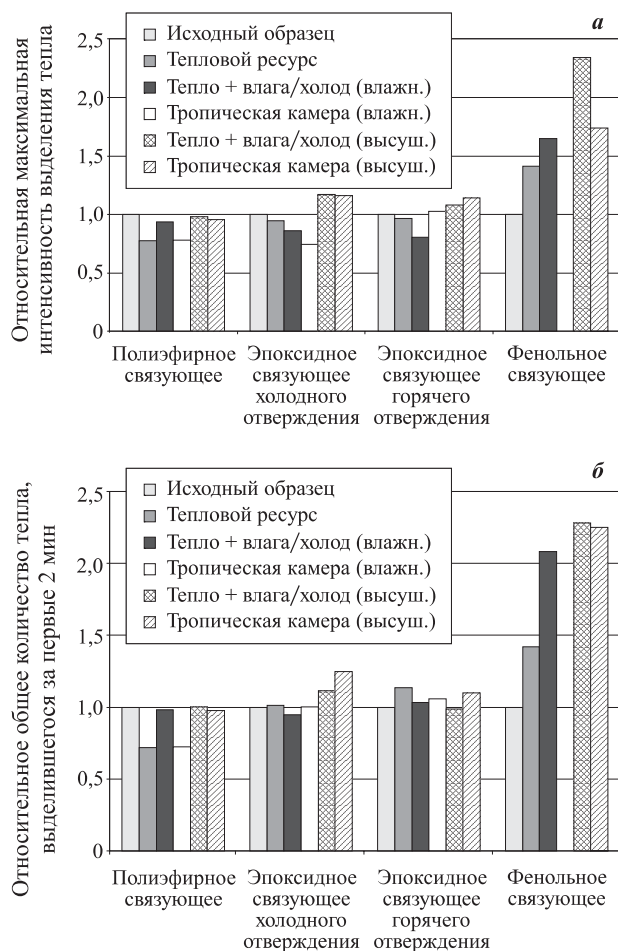


Рис. 4. Относительное изменение тепловыделения при горении образцов стеклопластиков на различных полимерных матрицах под воздействием факторов, имитирующих климатические и тепловые условия эксплуатации: *а* — относительная максимальная интенсивность выделения тепла; *б* — относительное общее количество тепла, выделившегося за первые 2 мин испытания

рении тепла приведены на рис. 4, *а* и 4, *б*. В зависимости от типа полимерной матрицы наблюдается различное изменение характеристик тепловыделения вследствие воздействия тепловлажностных факторов.

У стеклопластика на полиэфирном связующем после теплового старения происходит некоторое снижение как максимальной интенсивности выделения тепла, так и общего количества тепла, выделившегося за первые 2 мин испытания. Видимо, это вызвано процессами доотверждения полимерной матрицы, протекающими под воздействием повышенной температуры. При совместном воздействии повышенной температуры и влажности (режим тропической камеры), несмотря на поглощение образцом влаги, изменения характеристик тепловыделения по сравнению с тепловым старением не происходило. Однако после высушивания образца зарегистрировано увеличение тепловыделения по сравнению с

образцами, подвергнутыми тепловому старению, и возврат характеристик к первоначальному уровню. Тепловыделение образцов, подвергнутых комбинированному воздействию тепловлажностных факторов (повышенная температура/влажность и термоциклы), примерно соответствовало тепловыделению образцов исходного материала.

Для стеклопластика на эпоксидном связующем холодного отверждения выбранные режимы старения по методам 1 и 2 практически не оказывали влияния на общее количество выделившегося тепла. Зафиксировано последовательное небольшое снижение максимальной интенсивности выделения тепла в ряду: исходные образцы — образцы после теплового старения — образцы после комбинированного воздействия тепловлажностных факторов с наложением термоциклов — образцы после тропической камеры. Таким образом, увеличение влагосодержания образца закономерно приводило к снижению максимальной интенсивности выделения тепла. Для высушенных после тепловлажностного воздействия образцов наблюдался существенный рост максимальной интенсивности тепловыделения, причем тепловыделение сухих образцов было на 15–20 % выше по сравнению с исходным материалом.

Для образцов стеклопластика на эпоксидном связующем горячего отверждения влияние тепловлажностного старения как по методу 1, так и по методу 2 на характеристики тепловыделения было незначительным.

Наиболее существенное влияние тепловлажностного воздействия на характеристики тепловыделения было зарегистрировано у стеклопластика на наиболее термостойком из испытанных связующем — фенольном. Тепловое старение при весьма умеренной температуре (120 °С) по сравнению с исходным материалом приводило к росту как максимальной интенсивности выделения тепла, так и общего количества тепла, выделившегося за первые 2 мин испытания. Совместное воздействие тепловлажностных факторов вызывало дальнейший рост тепловыделения, а у образцов, высушенных после воздействия влаги, отмечалось наиболее высокое тепловыделение. В результате испытаний было установлено, что высушенные после тепловлажностного старения образцы имели тепловыделение примерно в 2 раза выше по сравнению с исходным материалом. Это может быть вызвано наиболее интенсивным изменением химической структуры и развитием дефектности полимерной матрицы вследствие совместного воздействия тепловлажностных факторов.

Представляет интерес изучение влияния различных видов климатического старения на сводный (комплексный) индекс пожарной безопасности. В данной работе сводный индекс рассчитывался как геомет-

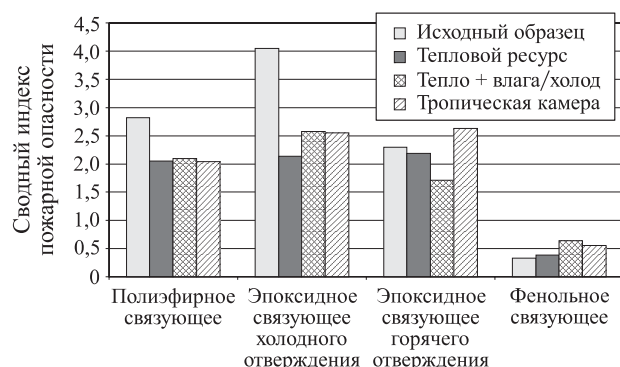


Рис. 5. Гистограмма сводного индекса пожарной опасности стеклопластиков на основе различных полимерных матриц под влиянием различных видов ускоренного климатического старения

рическая сумма индивидуальных индексов пожарной опасности, определяемых согласно [32]. На рис. 5 приведена гистограмма изменения индекса в зависимости от видов воздействия на образцы. При расчете индекса учитывались данные, полученные при наихудшем варианте: по дымообразованию — для увлажненных образцов, а по горючести и тепловыделению — для высушенных.

Комплексная оценка пожаробезопасности, рассчитанная как сводный индекс пожарной опасности, показала, что характер изменения пожарной опасности материалов в зависимости от вида воздействия и типа полимерной матрицы может иметь раз-

личные тенденции. Так, после воздействия различных видов климатических факторов пожарная опасность ПКМ на основе нетермостойких полимерных матриц (полиэфирной смолы и эпоксидной смолы холодного отверждения) снижается, а для наиболее пожаробезопасного материала на основе фенольной смолы — повышается.

Выводы

В результате исследований установлено существенное влияние тепловлажностного старения на характеристики пожарной опасности ПКМ. Величина и направление изменения свойств зависят от типа воздействия, вида полимерной матрицы и определяемой характеристики.

Исследованные образцы стеклопластиков в условиях тропической камеры по сравнению с экспозицией в тепловлажностной камере с наложением термоциклов имели более высокое влагопоглощение.

Наиболее чувствительными к воздействию факторов тепла и влаги оказались характеристики дымообразования и тепловыделения.

Из испытанных видов стеклопластиков наибольшую чувствительность к факторам климата показали ПКМ на фенольной матрице (по горючести, дымообразованию и тепловыделению) и ПКМ на эпоксидной смоле горячего отверждения (по дымообразованию).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е. Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. — 2010. — Т. LIV, № 1. — С. 3–4.
2. Mishra G., Mohapatra S. R., Behera P. R., Dash B., Mohanty U. K., Ray B. C. Environmental stability of GFRP laminated composites: an emphasis on mechanical behaviour // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. — 2010. — Vol. 82, No. 4. — P. 258–266.
3. Ефимов В. А., Шведкова А. К., Коренькова Т. Г., Кириллов В. Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натурных условиях // Труды ВИАМ. — 2013. — № 1. — С. 37–44. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=5 (дата обращения: 15.01.2014 г.).
4. Кириллов В. Н., Ефимов В. А., Шведкова А. К., Николаев Е. В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // Авиационные материалы и технологии. — 2011. — № 4. — С. 41–45.
5. Каблов Е. Н., Кириллов В. Н., Журнов А. Д., Старцев О. В., Ватиров Ю. М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // Авиационная промышленность. — 2009. — № 4. — С. 36–46.
6. Авиационные правила. Глава 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории : утв. приказом Минтранса РФ от 05.07.94 г. № 48/МАК. — 3-е изд. — М. : ОАО Авиаиздат, 2009. — 274 с.
7. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. — 2012. — № 5. — С. 7–17.
8. Барботько С. Л., Нагаев А. С. К вопросу об обеспечении пожарной безопасности внешнего контура самолетов // Сб. докладов VIII науч. конф. по гидроавиации “Гидроавиасалон-2010”. — М. : ЦАГИ, 2010. — Ч. II. — С. 107–110.
9. Барботько С. Л., Шуркова Е. Н. О пожарной безопасности материалов, используемых для изготовления внешнего контура самолетов // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 10. — С. 19–24.

10. Барботько С. Л., Шуркова Е. Н., Вольный О. С., Скрылёв Н. С. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов для внешнего контура авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. — 2013. — № 1. — С. 56–59.
11. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. — 262 с.
12. Асеева Р. М., Барботько С. Л., Серков Б. Б., Сивенков А. Б., Дегтярев Р. В., Тарасов Н. И. Влияние времени эксплуатации древесины на ее пожароопасные свойства // *Энциклопедия инженера-химика*. — 2010. — № 3. — С. 27–33.
13. The impact of thermal aging on the flammability of electric cables. Prepared by S. P. Nowlen // NUREG/CR-5619 SAND90-2121 Sandia National Laboratories, 1991. — 44 p. URL : <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0625/ML062510133.pdf> (дата обращения: 14.11.2013 г.).
14. Горение, деструкция и стабилизация полимеров / Под ред. Г. Е. Заикова. — СПб. : Научные основы и технологии, 2008. — 422 с.
15. Clough R. L. Aging effects on fire-retardant additives in polymers // *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*. — 1983. — Vol. 21. — P. 767–780.
16. Крашенинникова М. В. Огнезащитные вспучивающиеся покрытия для строительных конструкций и материалов. Специфика норм контроля // *Стандарты и качество*. — 2007. — № 12. — С. 78.
17. Баженов С. В., Наумов Ю. В. Определение срока службы огнезащитных покрытий по результатам натурных и ускоренных климатических испытаний // *Пожарная безопасность*. — 2005. — № 6. — С. 59–67.
18. Крашенинникова М. В., Еремина Т. Ю., Дмитриева Ю. Н., Семенов Д. С. Контроль качества огнезащитных покрытий и прогнозирование сохранения огнезащитной эффективности в процессе их эксплуатации // *Реконструкция Санкт-Петербурга 2003 : Межд. науч.-практ. конф.* — СПб. : СПбГАСУ, 2002. — С. 42–43. URL : <http://www.stopfire.ru/en/content/438/743> (дата обращения: 14.11.2013 г.).
19. Бибихина Т. Ю., Демехин В. Н. Об испытании новых огнезащитных покрытий на долговечность // *Проблемы пожарной безопасности : сб. науч. тр.* — СПб. : СПбВППШ МВД РФ, 1992. — С. 49–52. URL : <http://www.stopfire.ru/en/content/438/652> (дата обращения: 14.11.2013 г.).
20. Баженов С. В. Прогнозирование срока службы огнезащитных покрытий. Проблемы и пути решения // *Пожарная безопасность*. — 2005. — № 5. — С. 97–102.
21. Tian W., Hodgkin J. Long-term aging in a commercial aerospace composite sample: Chemical and physical changes // *Journal of Applied Polymer Science*. — 2010. — Vol. 115. — P. 2981–2985.
22. Скрылёв Н. С., Вольный О. С., Постнов В. И., Барботько С. Л. Исследование влияния тепловых факторов климата на изменение характеристик пожаробезопасности полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ*. — 2013. — № 9. — С. 23–28. URL : http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=248 (дата обращения: 15.01.2014 г.).
23. Барботько С. Л., Барботько М. С., Вольный О. С., Постнов В. И. Влияние длительного теплового воздействия на пожаробезопасность полимерных материалов // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2014. — Т. 23, № 1. — С. 12–20.
24. ГОСТ 9.707–81. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. — Введ. 01.01.83 г. — М. : Изд-во стандартов, 1990. — 80 с.
25. Барботько С. Л., Швец Н. И., Застрогина О. Б., Изотова Т. Ф. Исследование влияния толщины стеклопластиков на характеристики тепловыделения при горении // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2013. — Т. 22, № 7. — С. 30–36.
26. Барботько С. Л., Изотова Т. Ф. Влияние структуры стеклопластика на тепловыделение при горении // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2011. — Т. 20, № 9. — С. 17–21.
27. Шуркова Е. Н., Вольный О. С., Изотова Т. Ф., Барботько С. Л. Исследование возможности снижения тепловыделения при горении композиционного материала путем изменения его структуры // *Авиационные материалы и технологии*. — 2012. — № 1. — С. 27–30.
28. Барботько С. Л. Пути обеспечения пожарной безопасности авиационных материалов // *Российский химический журнал*. — 2010. — Т. LIV, № 1. — С. 121–126.
29. Барботько С. Л. Пожарная безопасность, климатические и микробиологические исследования материалов // *Сборник докладов Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов “ТестМат–2012”* / Под рук. А. Н. Луценко. — М., 2012. — С. 9.
30. Барботько С. Л. Пожаробезопасность авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. — 2012. — № 8. — С. 431–439.

31. Старцев О. В., Прокопенко К. О., Литвинов А. А., Кротов А. С., Аниховская Л. И., Дементьева Л. А. Исследование тепловлажностного старения авиационного стеклопластика // Клеи. Герметики. Технологии. — 2009. — № 8. — С. 18–22.
32. Барботько С. Л., Голиков Н. И. О комплексной оценке пожарной опасности материалов // Пожаровзрывобезопасность. — 2008. — Т. 17, № 6. — С. 16–24.

Материал поступил в редакцию 28 января 2014 г.

English

RESEARCH OF JOINT LONG-TIME IMPACTS OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON FIRE SAFETY OF GLASS REINFORCED POLYMERS

BARBOTKO S. L., Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory "Research of Nonmetallic Materials on Climatic, Microbiological Resistance and Fire Safety", Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials", State Research Center of the Russian Federation (Radio St., 17, Moscow, 105005, Russian Federation; e-mail address: slbarbotko@yandex.ru)

BARBOTKO M. S., Engineer of 1st Category of Open Society Research-and-Production Association "Energomash" named after Academician V. P. Glushko (Burdenko St., 1, Khimki, 141401, Moscow Region, Russian Federation)

VOLNYI O. S., Leading Engineer of Laboratory "Research of Nonmetallic Materials on Climatic, Microbiological Resistance and Fire Safety", Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials", State Research Center of the Russian Federation (Radio St., 17, Moscow, 105005, Russian Federation)

SHVEDKOVA A. K., Leading Engineer of Laboratory "Research of Nonmetallic Materials on Climatic, Microbiological Resistance and Fire Safety", Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials", State Research Center of the Russian Federation (Radio St., 17, Moscow, 105005, Russian Federation)

ABSTRACT

The most modern high-tech products are designed for long time service life. During the operation of the product it affect various climatic factors, resulting in properties of the used materials can vary significantly. These changes may relate to the fire hazard characteristics of materials, which in turn affects the fire safety products and survival of people in case of emergency related to the presence of fire.

With the use of laboratory test methods to study the effect climate stability long-term (up to 90 days) the joint effects of factors of temperature and humidity on the change in the characteristics of fire danger on the glass-reinforced materials with polymer matrices of different chemical nature. Studies of the climate resilience are conducted on two modes: 1) simulation of the daily temperature and humidity in tropical climates; 2) exposure in chamber at increased temperature and humidity with the imposition of periodic thermal cycles (the impact of negative temperatures). The results obtained are compared with the characteristics of the starting materials and materials subjected to thermal aging only.

It is shown that after prolonged exposure to the joint elevated temperature and humidity depending on the chemical nature of the polymer matrix the characteristics of flammability, heat release and smoke generation of the materials can significantly change. Depending of the polymer matrix the changes in the characteristics can take place as in smaller and bigger side.

Keywords: fibreglass; polymeric composite material; fire safety; flammability; smoke density; heat release; heat-humidity aging; climatic aging.

REFERENCES

1. Kablov E. N. Khimiya v aviatsionnom materialovedenii [Chemistry in aviation materials science]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal — Russian Chemical Journal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.

2. Mishra G., Mohapatra S. R., Behera P. R., Dash B., Mohanty U. K., Ray B. C. Environmental stability of GFRP laminated composites: an emphasis on mechanical behavior. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2010, vol. 82, no. 4, pp. 258–266.
3. Efimov V. A., Shvedkova A. K., Korenkova T. G., Kirillov V. N. Issledovaniye polimernykh konstruktsionnykh materialov pri vozdeystvii klimaticheskikh faktorov i nagruzok v laboratornykh i naturnykh usloviyakh [Investigation of polymeric structural materials under the influence of climatic factors and stress in laboratory and field conditions]. *Trudy VIAM — Proceedings of All-Russian Science-Research Institute of Aviation Materials*, 2013, no. 1, pp. 37–44. Available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=5 (Accessed 15 January 2014).
4. Kirillov V. N., Efimov V. A., Shvedkova A. K., Nikolaev E. V. Issledovaniye vliyaniya klimaticheskikh faktorov i mekhanicheskogo nagruzheniya na strukturu i mekhanicheskiye svoystva PKM [Investigation of the influence of climatic factors and mechanical loading on the structure and mechanical properties of the PCM]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2011, no. 4, pp. 41–45.
5. Kablov E. N., Kirillov V. N., Zhirnov A. D., Startsev O. V., Vapirov Yu. M. Tsentry dlya klimaticheskikh ispytaniy aviatsionnykh PKM [Centers for climatic test aircraft PCM]. *Aviatsionnaya promyshlennost — Aviation Industry*, 2009, no. 4, pp. 36–46.
6. *Aviation rules. Chapter 25. Airworthiness norms of a transport category airplanes. Interstate Aviation Committee. Ed. 3 with amendments 1–6.* Moscow, Aviaizdat, 2009. 274 p. (in Russian).
7. Kablov E. N. Strategicheskiye napravleniya pazvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2012, no. S, pp. 7–17.
8. Barbotko S. L., Nagaev A. S. K voprosu ob obespechenii pozharnoy bezopasnosti vneshnego kontura samoletov [On the fire safety of the external contour planes]. *Reports of VIII Scientific Conf. of Hydroaviation "Gidroaviasalon 2010"*. Moscow, TsAGI Publ., 2010, part II, pp. 107–110.
9. Barbotko S. L., Shurkova E. N. O pozharnoy bezopasnosti materialov, ispolzuyemykh dlya izgotovleniya vneshnego kontura samoletov [About fire safety of the materials used for manufacturing of an external contour of aircrafts]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 10, pp. 19–24.
10. Barbotko S. L., Shurkova E. N., Volnyy O. S., Skrylev N. S. Otsenka pozharnoy bezopasnosti polimernykh kompozitsionnykh materialov dlya vneshnego kontura aviatsionnoy tekhniki [Estimation of fire safety of polymeric composite materials for an external contour of aviation technics]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2013, no. 1, pp. 56–59.
11. Aseeva R. M., Serkov B. B., Sivenkov A. B. *Goreniye drevesiny i yeye pozharoopasnyye svoystva* [Burning of wood and its fire-dangerous properties]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2010. 262 p.
12. Aseeva R. M., Barbotko S. L., Serkov B. B., Sivenkov A. B., Degtyarev R. V., Tarasov N. I. Vliyaniye vremeni ekspluatatsii drevesiny na yeye pozharoopasnyye svoystva [Effect of operating time wood on its fire behavior]. *Entsiklopediya inzhenera-khimika — Encyclopedia of Chemical Engineering*, 2010, no. 3, pp. 27–33.
13. The impact of thermal aging on the flammability of electric cables. Prepared by S. P. Nowlen. NUREG/CR-5619 SAND90-2121 Sandia National Laboratories, 1991. 44 p. Available at: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0625/ML062510133.pdf> (Accessed 14 November 2013).
14. Zaikov G. E. (ed.) *Goreniye, destruktziya i stabilizatsiya polimerov* [Burning, destruction and stabilization of polymers]. Saint Petersburg, Fundamentals and Technologies Publ., 2008. 422 p.
15. Clough R. L. Aging effects on fire-retardant additives in polymers. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 1983, vol. 21, pp. 767–780.
16. Krashenninnikova M. V. Oгнезашchitnyye vspuchivayushchiyesya pokrytiya dlya stroitelnykh konstruktsey i materialov. Spetsifika norm kontrolya [Fire retardant intumescent coatings for building structures and materials. Specificity control norms]. *Standarty i kachestvo — Standards and Quality*, 2007, no. 12, p. 78.
17. Bazhenov S. V., Naumov Yu. V. Opredeleniye sroka sluzhby ognezashchitnykh pokrytiy po rezultatam naturnykh i uskorennykh klimaticheskikh ispytaniy [Determine the remaining life of flame retardants on the results of field and accelerated climatic testing]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2005, no. 6, pp. 59–67.

18. Krashenninnikova M. V., Yeremina T. Yu., Dmitrieva Yu. N., Semenov D. S. Kontrol kachestva ognе-zashchitnykh pokrytiy i prognozirovaniye sokhraneniya ognеzashchitnoy effektivnosti v protsesse ikh ekspluatatsii [Quality control of flame retardants and flame retardant efficiency forecasting save during their operation]. *Rekonstruktsiya Sankt-Peterburga 2003. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Reconstruction of St. Petersburg 2003. International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2002, pp. 42–43. Available at: <http://www.stopfire.ru/en/content/438/743> (Accessed 14 November 2013).
19. Bibikhina T. Yu., Demekhin V. N. Ob ispytanii novykh ognеzashchitnykh pokrytiy na dolgovechnost [The testing of new flame retardants on the durability]. *Problemy pozharной bezopasnosti: sb. nauch. tr.* [The problem of fire safety. Scientific proceeding]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Higher Fire and Technical School of Ministry of the Interior of Russia Publ., 1992, pp. 49–52. Available at: <http://www.stopfire.ru/en/content/438/652> (Accessed 14 November 2013).
20. Bazhenov S. V. Prognozirovaniye sroka sluzhby ognеzashchitnykh pokrytiy. Problemy i puti resheniya [Prediction of life of flame retardants. Problems and solutions]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2005, no. 5, pp. 97–102.
21. Tian W., Hodgkin J. Long-term aging in a commercial aerospace composite sample: Chemical and physical changes. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, vol. 115, pp. 2981–2985.
22. Skrylev N. S., Volnyy O. S., Postnov V. I., Barbotko S. L. Issledovaniye vliyaniya teplovykh faktorov klimata na izmeneniye kharakteristik pozharobezopasnosti polimernykh kompozitsionnykh materialov [Investigation of the influence of thermal factors of climate on changes in the characteristics of fire polymer composites]. *Trudy VIAM — Proceedings of All-Russian Science-Research Institute of Aviation Materials*, 2013, no. 9, pp. 23–28. Available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=248 (Accessed 15 January 2014).
23. Barbotko S. L., Barbotko M. S., Volnyy O. S., Postnov V. I. Vliyaniye dlitelnogo teplovogo vozdeystviya na pozharobezopasnost polimernykh materialov [Influence of long-term thermal exposure on the fire safety of polymeric materials]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 12–20.
24. State Standard 9.707–81. Unified system of corrosion and aging protection. Polymeric materials. Methods of accelerated climatic aging tests. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1990. 80 p. (in Russian).
25. Barbotko S. L., Shvets N. I., Zastrogina O. B., Izotova T. F. Issledovaniye vliyaniya tolshchiny na kharakteristiki teplovydeleniya pri gorenii [The influence of fibreglasses thickness on heat release characteristics at burning]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 7, pp. 30–36.
26. Barbotko S. L., Izotova T. F. Vliyaniye struktury stekloplastika na teplovydeleniye pri gorenii [Influence of fibreglasses structure on heat release at burning]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 17–21.
27. Shurkova E. N., Volnyy O. S., Izotova T. F., Barbotko S. L. Issledovaniye vozmozhnosti snizheniya teplovydeleniya pri gorenii kompozitsionnogo materiala putem izmeneniya yego struktury [Research of an opportunity to reduction the heat release at burning for polymer composite material due to a changing of its structure]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2012, no. 1, pp. 27–30.
28. Barbotko S. L. Puti obespecheniya pozharной bezopasnosti aviatsionnykh materialov [Ways of ensuring fire safety of aviation materials]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal — Russian Chemical Journal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 121–126.
29. Barbotko S. L. Pozharnaya bezopasnost, klimaticheskkiye i mikrobiologicheskkiye issledovaniya materialov [Fire safety, climatic and microbiological researching of materials]. *Sbornik dokladov Vserossiyskoy konferentsii po ispytaniyam i issledovaniyam materialov “TestMat-2012”* [Proceedings of All-Russian Conference on Testing and Research Material Properties “TestMat 2012”]. Under the hands A. N. Lutsenko. Moscow, 2012.
30. Barbotko S. L. Pozharobezopasnost aviatsionnykh materialov [Fire safety of aviation materials]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technology*, 2012, no. 5, pp. 431–439.
31. Startsev O. V., Prokopenko K. O., Litvinov A. A., Krotov A. S., Anikhovskaya L. I., Dementyeva L. A. Issledovaniye teplovlazhnostnogo stareniya aviatsionnogo stekloplastika [Study of heat and humidity aging aircraft fiberglass]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii — Adhesives. Sealants. Technology*, 2009, no. 8, pp. 18–22.
32. Barbotko S. L., Golikov N. I. O kompleksnoy otsenke pozharной opasnosti materialov [About a complex estimation of fire danger of materials]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2008, vol. 17, no. 6, pp. 16–24.

В. А. УШКОВ, канд. техн. наук, заведующий лабораторией “Современные композиционные строительные материалы”, Институт строительства и архитектуры Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: VA.Ushkov@yandex.ru)

Д. И. НЕВЗОРОВ, аспирант кафедры технологии композиционных материалов и прикладной химии, Институт строительства и архитектуры Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: nevzorovdi@yandex.ru)

А. В. КОПЫТИН, аспирант кафедры технологии композиционных материалов и прикладной химии, Институт строительства и архитектуры Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

В. М. ЛАЛАЯН, канд. хим. наук, старший научный сотрудник, Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН (Россия, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 4)

УДК 678.06

ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТЬ И ДЫМООБРАЗУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПРОИЗВОДНЫЕ ФЕРРОЦЕНА

Рассмотрено влияние концентрации и химической природы производных ферроцена на термостойкость, воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных материалов на основе коксующихся полимеров. Показано, что использование указанных соединений не только снижает дымообразующую способность, но и уменьшает воспламеняемость полимерных материалов на основе ПВХ и эпоксидных олигомеров. Механизм действия производных ферроцена обусловлен образованием при их разложении высокодисперсных каталитически активных оксидов железа, ингибирующих образование бензола и дыма. Установлено, что оптимальная концентрация циклопентандиенильных сэндвичеобразных производных железа для материалов на основе коксующихся полимеров составляет 0,3–0,5 % масс. Выявлено, что химическое строение и содержание исследованных производных ферроцена практически не влияют на разложение эпоксидных полимеров и ПВХ-материалов в низкотемпературной области, но влияют на разложение коксующихся полимеров в высокотемпературной области, при температуре выше 310 °С. При этом производные ферроцена превосходят по эффективности сам ферроцен.

Ключевые слова: ПВХ-материалы; эпоксидные композиции; производные ферроцена; воспламеняемость; дымообразующая способность.

Существенное влияние на пожарную опасность полимерных материалов на основе коксующихся полимеров оказывает химическое строение и содержание синергистов и дымоподавителей. Среди дымоподавителей весьма перспективен ферроцен, который в отличие от многих других ингибиторов не только снижает горючесть пластифицированных ПВХ-материалов, но и способствует уменьшению их дымообразующей способности [1–3]. Причем максимальный эффект достигается при содержании ферроцена в ПВХ-материалах 0,4–0,5 % масс. [2, 3]. Это обусловлено увеличением выхода кокса и снижением в продуктах пиролиза ПВХ-материалов концентрации бензола, одного из основных сажеобразующих агентов. Отмечено, что при небольшом содержании ферроцен проявляет свойства катализатора гетерогенного окисления углерода, промотирует почти без-

дымное горение органических соединений и повышает полноту сгорания твердых и жидких топлив [4]. Высокая эффективность ферроцена обусловлена тем, что он является источником образования высокодисперсных каталитически активных оксидов железа в процессе окисления ферроценового цикла в волне горения топлива. Механизм катализа ферроценом горения твердых ракетных топлив с перхлоратом аммония в качестве окислителя детально рассмотрен в работе [5]. Ферроцен оказывает влияние на процессы пиролиза полимеров, ингибирует окисление полимерных материалов, легко взаимодействует с газообразным HCl с образованием хлористого и хлорного железа [2]. Благодаря низкой токсичности и высокой термической стабильности ферроцен и его производные широко применяются в различных областях науки и техники в качестве

термостойких полимеров, электронных материалов, регуляторов горения топлива [4–7]. Ферроценовый цикл термически стабилен, поэтому ферроцен устойчив на воздухе ($T_{\text{кип}} = 249\text{ }^{\circ}\text{C}$) и не разлагается при нагревании до $470\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6, 8], но уже при температуре выше $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ разлагается с заметной скоростью [9]. Отрицательным свойством ферроцена является его повышенная летучесть при температуре более $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6, 8], поэтому представлялось целесообразным исследовать влияние циклопентандиенильных сэндвичеобразных производных железа на термические свойства и пожарную опасность полимерных материалов на основе коксующихся полимеров.

В качестве объектов исследования использовали ферроцен (ТУ 6-02-964–78), ацетил-, диацетил- и α -оксиэтилферроцен, сополимер акрилоилферроцена и изопрена, полимер ди(α -оксиизопропенил)-ферроцена и ферроцендикарбоновую кислоту, синтезированные в лабораторных условиях в Институте элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова (ИНЭОС) РАН, методики синтеза которых рассмотрены в работах [10–12]. Структурная формула, физико-химические и термические свойства производных ферроцена приведены в табл. 1. Влияние циклопентандиенильных сэндвичеобразных производных железа на термостойкость, воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных материалов на основе коксующихся полимеров исследовали на примере эпоксидных полимеррастворов и ПВХ-композиций. Пластифицированные (20 % масс.) дибутилфталатом ПВХ-пленки толщиной 0,8–1,0 мм на основе суспензионного ПВХ марки С7058М (ГОСТ 14332–78Е) получали вальцеванием композиции при $150\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 15 мин. В качестве термостабилизаторов применяли смесь двухосновного стеарата свинца (ТУ 6-09-17-320–96) и одноосновного стеарата кальция (ТУ 6-09-4104–75). Исходные компоненты перемешивали в смесителе периодического действия при $30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин. Эпоксидные полимеррастворы получали на основе олигомеров ЭД-20 (ГОСТ 10587–84) и оксилена-6 (ТУ 6-02-1376–87), а в качестве наполнителей использовали диабазовую (ТУ 5716-001-41357914–2009) и андезитовую (ТУ 22263–76) муку.

Термические свойства производных ферроцена и термостойкость полимерных материалов определяли термогравиметрическим методом в динамическом режиме нагрева со скоростью 10 и $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ на воздухе (50 мл/мин) и в токе азота, используя для этих целей термоаналитический автоматизированный комплекс DuPont-9900. Термогравиметрический анализ (ТГА) проводили с учетом требований ГОСТ Р 53293–2009. В качестве критерия термостойкости полимерных материалов использовали

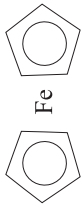
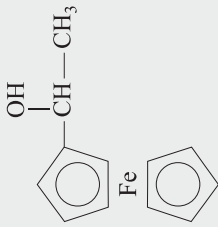
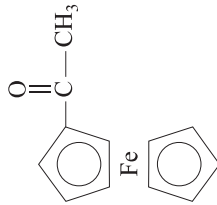
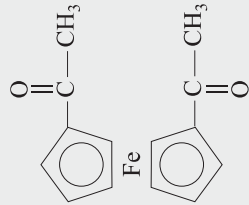
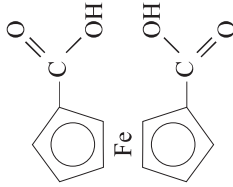
температуры начала интенсивного разложения ($T_{\text{н.р}}$) и максимальной скорости разложения (T_{max}). Кислородный индекс (КИ), температуру воспламенения ($T_{\text{в}}$) и самовоспламенения ($T_{\text{св}}$), коэффициент дымообразования (D_m) в режиме пиролиза и горения полимерных материалов определяли по ГОСТ 12.1.044–89*.

В результате исследований установлено, что среди изученных органических соединений железа высокой термостойкостью при нагреве на воздухе обладают сополимер акрилоилферроцена с изопреном и полимер ди(α -оксиизопропенил)ферроцена (см. табл. 1): $T_{\text{н.р}}$ указанных соединений составляет соответственно 314 и $340\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{max} — 419 и $465\text{ }^{\circ}\text{C}$. В то же время температура начала интенсивной потери массы и максимальной скорости потери массы при нагреве в токе азота со скоростью $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ферроцена, α -оксиэтил-, ацетил-, и диацетилферроцена не превышает соответственно 157 и $211\text{ }^{\circ}\text{C}$. Причем α -оксиэтилферроцен улетучивается с меньшей скоростью ($12,5\text{ } \%/ \text{мин}$), что оказывает решающее влияние на эффективность производных ферроцена как дымоподавателей галогенсодержащих полимерных материалов.

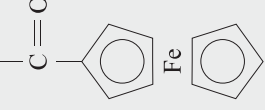
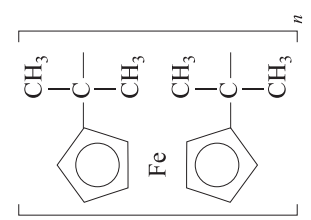
На термостойкость полимерных материалов, склонных к образованию карбонизованных структур, незначительное влияние оказывает химическое строение и содержание циклопентандиенильных соединений железа. В качестве примера на рис. 1 приведены ТГ- и ДТГ-кривые эпоксидных композиций, содержащих 0,29 % масс. производных ферроцена, а в табл. 2 — термические свойства исследованных полимеррастворов. Анализ данных табл. 2 показывает, что производные ферроцена практически не влияют на разложение эпоксидных композиций в низкотемпературной области: $T_{\text{н.р}} = 273\text{--}285\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{max}} = 300\text{--}306\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальная скорость разложения на первой стадии составляет $18,4\text{--}21,4\text{ } \%/ \text{мин}$.

Существенное влияние химическая природа производных ферроцена оказывает на разложение эпоксидных композиций в высокотемпературной области при температуре выше $310\text{ }^{\circ}\text{C}$. Причем чем выше эффективность производных ферроцена, тем больше скорость разложения композиций $V_{\text{разл}}$ на второй стадии. При этом T_{max} сдвигается в область более низких температур и возрастает степень карбонизации материала (табл. 2). Так, например, на второй стадии для исходной композиции T_{max} и $V_{\text{разл}}$ равны соответственно $485\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $18,9\text{ } \%/ \text{мин}$, а при введении 0,29 % масс. α -оксиэтилферроцена — $468\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $24,5\text{ } \%/ \text{мин}$. Для эпоксидной композиции, содержащей 0,29 % масс. ферроцена, на второй стадии T_{max} и $V_{\text{разл}}$ равны соответственно $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $24,2\text{ } \%/ \text{мин}$. При 10 %-ной конверсии эффективная энергия активации разложения исходной компози-

Таблица 1. Физико-химические и термические свойства производных ферроцена

Соединение	Структурная формула	M_n , г/моль	Содержание железа, %	Температура, °C			Максимальная скорость потери массы, %/мин	Теплоемкость при 40 °C, кДж/(кг·°C)	Потеря массы, %
				плавления	начала интенсивной потери массы	максимальной скорости потери массы			
Ферроцен		186	30,12	173	148	199	22,3	2,56	91,3
α -оксиптил- ферроцен		230	24,53	75	128	177	12,5	1,34	86,2
Ацетил- ферроцен		228	24,12	85	100	150	25,8	1,02	96,6
Диацетил- ферроцен		271	20,28	128	157	211	27,9	1,95	99,6
Ферроцен- дикарбоновая кислота*		275	20,38	240	219	248	77,8	—	71,4

Окончание табл. 1

Соединение	Структурная формула	M_n , г/моль	Содержание железа, %	Температура, °C			Максимальная скорость потери массы, %/мин	Теплоемкость при 40 °C, кДж/(кг·°C)	Потеря массы, %
				плавления	начала интенсивной потери массы	максимальной скорости потери массы			
Сополимер акрилоил- ферроцена с изопреном*	$\text{---}(\text{CH}_2\text{---CH})_n\text{---}(\text{CH}_2\text{---C}(\text{CH}_3)=\text{CH---CH}_2\text{---})$ 	—	9,62	250	314	419	26,5	—	87,9
Полимер ди(α-оксил- изопропенил)- ферроцена*		77000	20,98	300	340	465	29,9	—	75,3

Пр и м е ч а н и е. Термический анализ (ТА) проведен в токе азота при нагреве со скоростью 10 °C/мин, потеря массы при 300 °C. * обозначены соединения, для которых ТА проводился на воздухе при нагреве со скоростью 20 °C/мин, потеря массы при 700 °C.

ции и композиции с добавкой ацетилферроцена и ферроцена равна соответственно 170,5; 161,3 и 185,5 кДж/моль, а при 30 %-ной конверсии — 193,2; 189,3 и 207,5 кДж/моль. Это обусловлено, по-видимому, тем, что образовавшиеся при разложении производных ферроцена оксиды железа повышают скорость разложения конденсированной фазы $K_{\text{фаз}}$. Этот вывод согласуется с данными работы [5].

Химическая природа и концентрация производных ферроцена также практически не влияют на разложение ПВХ-композиций на воздухе: $T_{\text{н.р}}$ и T_{max} равны соответственно 240–250 и 285–290 °С, а потеря массы на 1-й стадии при температуре 240–380 °С составляет 64,5–67,0 % (табл. 3). Полученные данные свидетельствуют о том, что производные ферроцена не оказывают существенного влияния на процесс дегидрохлорирования ПВХ. Не влияют они и на разложение полимера на 2-й стадии, а также на самовоспламенение пластифицированных ПВХ-материалов ($T_{\text{св}} = 415 \div 430$ °С).

В присутствии производных ферроцена КИ эпоксидных композиций возрастает с 23,3 до 25,6–26,1 %. Более высокие значения КИ (28,3 %) имеют композиции, содержащие α -оксиэтилферроцен. Производные ферроцена практически не влияют на температуру воспламенения (220–230 °С) и на 20–35 °С снижают температуру самовоспламенения эпоксидных композиций (см. табл. 2). Причем чем более эффективен дымоподавитель, тем ниже

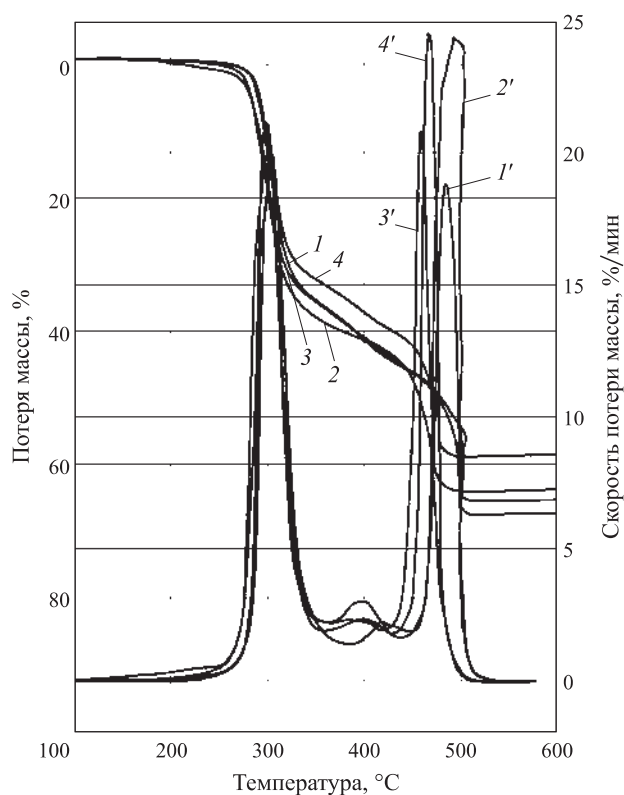


Рис. 1. Кривые ТГ ($I-4$) и ДТГ ($I'-4'$) полимеррастворов на основе ЭД-20 и оксилаина-6, содержащих ферроцен или его производные: I, I' — без добавки; $2, 2'$ — ферроцен; $3, 3'$ — ацетилферроцен; $4, 4'$ — α -оксиэтилферроцен

температура самовоспламенения $T_{\text{св}}$ полимеров. Следует отметить, что методом термического ана-

Таблица 2. Термостойкость и горючесть наполненных (35 % масс.) эпоксидных композиций на основе ЭД-20 и оксилаина-6, содержащих 0,29 % масс. производных ферроцена

Показатель	Без добавки	Ферроцен	α -Оксиэтилферроцен	Ацетилферроцен	Ферроценди-карбоновая кислота	Полимер ди(α -оксиизопропил)ферроцен	Оксид сурьмы Sb_2O_3
Температура, °С:							
– воспламенения	220	240	230	220	220	220	–
– начала интенсивного разложения $T_{\text{н.р}}$	284	276	285	273	284	282	284
– 10 %-ной потери массы	296	289	298	291	298	296	299
– максимальной скорости разложения T_{max} на стадии:							
первой	304	301	305	300	305	306	306
второй	485	500	468	459	483	481	496
– самовоспламенения	515	490	470	480	480	480	–
Максимальная скорость разложения, °С/мин, на стадии:							
первой	19,9	19,9	20,0	21,2	18,4	21,4	22,2
второй	18,9	24,2	24,5	20,8	18,8	16,0	22,9
Потеря массы при 600 °С, %	65,7	67,7	59,1	64,3	59,4	67,7	65,8
Тепловой эффект разложения, кДж/кг	4070	4300	3960	4300	4300	3300	4360
Кислородный индекс, %	23,3	27,6	28,3	25,6	26,1	25,8	27,9

Таблица 3. Термостойкость пластифицированных ПВХ-композиций

Показатель	Исходная ПВХ-композиция	Ферроцен	Ацетилферроцен	α -оксиэтилферроцен	Sb_2O_3 (6,5 % масс.)
Температура, °C:					
– начала интенсивного разложения $T_{н.р}$	240	240/240	250/240	245/250	250
– 10 %-ной потери массы	260	260/250	260/260	265/260	260
– максимальной скорости разложения на 1-й стадии T_{max}	285	280/280	285/285	290/290	280
– самовоспламенения $T_{св}$	420	420/420	415/425	440/430	420

Примечание. Над чертой указаны данные при содержании дымоподавителей 0,1 % масс., под чертой — 0,5 % масс.

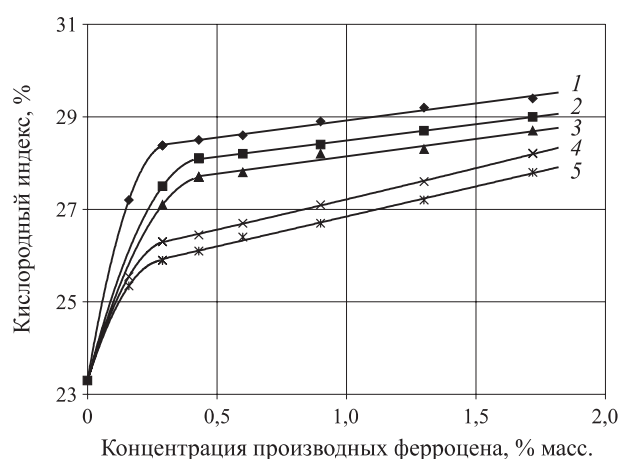


Рис. 2. Зависимость кислородного индекса эпоксидных композиций от концентрации ферроцена или его производных в исходной композиции: 1 — α -оксиэтилферроцен; 2 — ферроцен; 3 — диацетилферроцен; 4 — ферроцендикарбоновая кислота; 5 — ацетилферроцен

лиза можно определять $T_{св}$ полимерных материалов, не проводя испытания по ГОСТ 12.1.044–89*. В качестве критерия, характеризующего $T_{св}$ полимерных композиций по данным термического анализа, является скачок температуры на прямой, соответствующей температуре реакционной камеры прибора. Учитывая, что термостойкость полимеров

Таблица 4. Дымообразующая способность пластифицированных эпоксидных композиций

Производное ферроцена	Коэффициент дымообразования D_m , м ² /кг, в режиме	
	пиролиза	горения
Без добавки	1030	890
Ферроцен	720	480
Ацетилферроцен	660/620	340/290
Диацетилферроцен	560/480	430/390
α -оксиэтилферроцен	580/500	380/340

Примечание. Над чертой указаны данные при содержании производных ферроцена 0,23 % масс., под чертой — 0,45 % масс.

существенно зависит от скорости нагрева, можно подобрать такую скорость нагрева, при которой значения $T_{св}$ полимера, полученные по ГОСТ 12.1.044–89* и по данным термического анализа, будут близки.

С ростом концентрации производных ферроцена воспламеняемость эпоксидных композиций снижается. Так, например, увеличение концентрации ферроцена в композиции с 0,17 до 1,71 % масс. повышает КИ с 24,4 до 28,9 %. Причем более существенное повышение КИ таких композиций наблюдается при использовании α -оксиэтилферроцена (рис. 2). По-видимому, производные ферроцена способствуют образованию на поверхности горящего материала труднопроницаемого для летучих продуктов пиролиза полимеров карбонизованного слоя, препятствующего тем самым тепло- и массообмену и дальнейшему распространению пламени.

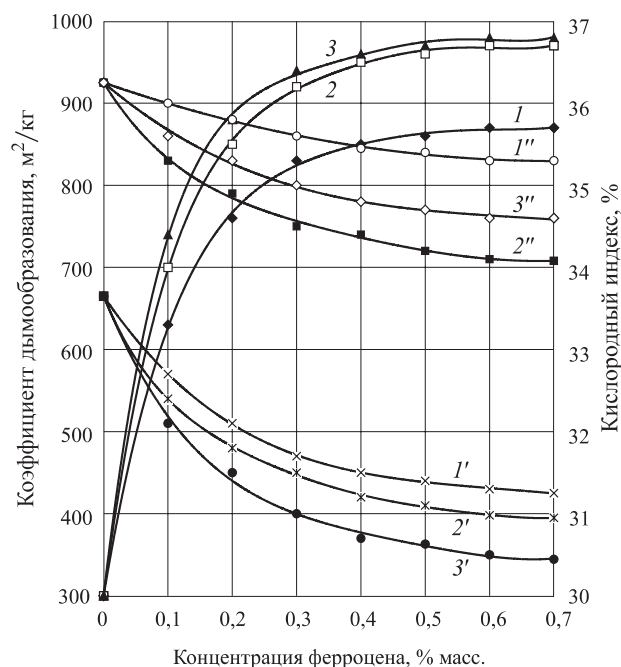


Рис. 3. Зависимость кислородного индекса (1–3) и дымообразующей способности в режиме пиролиза (1'–3') и горения (1''–3'') пластифицированных ПВХ-материалов от содержания ферроцена или его производных: 1, 1', 1'' — ферроцен; 2, 2', 2'' — α -оксиэтилферроцен; 3, 3', 3'' — ацетилферроцен

Резкое увеличение кислородного индекса полимеров наблюдается при повышении концентрации ферроцена до 0,6 % масс. Причем концентрация производных ферроцена не влияет на температуру воспламенения T_v и снижает температуру самовоспламенения T_{cv} композиций. Так, например, рост концентрации диацетилферроцена с 0,17 до 1,7 % масс. приводит к снижению T_{cv} с 505 до 490 °С. Это подтверждает вывод о том, что действие производных ферроцена проявляется в высокотемпературной области разложения эпоксидных полимеров. Влияние химической природы и концентрации производных ферроцена на дымообразующую способность эпоксидных композиций, пластифицированных парахлором-380 (4,52 % масс.) и наполненных андезитовой мукой (45,4 %), показано в табл. 4. Из табл. 4 следует, что из исследованных циклопентандиенильных производных железа наиболее эффективен α -оксиэтилферроцен.

С ростом концентрации производных ферроцена до 0,7 % масс. КИ пластифицированного ПВХ возрастает с 30,0 до 35,7–36,8 %, а D_m в режимах пиролиза и пламенного горения снижается соответствен-

но с 925 до 830–710 м²/кг и с 660 до 350–420 м²/кг (рис. 3). При этом производные ферроцена превосходят по эффективности сам ферроцен. Более высокая эффективность ацетил- и α -оксиэтилферроцена по сравнению с ферроценом обусловлена легкостью образования при их разложении ультрадисперсных каталитически активных оксидов железа (Fe_2O_3 , Fe_3O_4), которые влияют на механизм пиролиза коксующихся полимеров, повышают вероятность образования на поверхности полимерного материала карбонизованного слоя, ингибируют образование бензола и дыма. При этом оптимальная концентрация производных ферроцена в эпоксидных композициях и ПВХ-материалах составляет 0,3–0,5 % масс.

Таким образом, применение производных ферроцена в качестве дымоподавителей галогенсодержащих полимерных композиций позволяет снижать воспламеняемость и дымообразующую способность материалов и получать слабогорючие полимерные композиционные материалы с $D_m < 500$ м²/кг.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (задание № 7.2200.2014/К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головненко Н. И., Китайгора Е. А., Мозжухин В. Б., Николаев В. Г. Огнестойкие ПВХ-композиции с пониженным дымо- и газовыделением : обз. инф. Сер.: Акрилаты и поливинилхлорид. — М. : НИИТЭХИМ, 1984. — 41 с.
2. Кулев Д. Х., Китайгора Е. А., Головненко Н. И., Мозжухин В. Б. Проблемы снижения горючести и дымообразующей способности материалов на основе пластифицированного ПВХ : обз. инф. Сер.: Акрилаты и поливинилхлорид. — М. : НИИТЭХИМ, 1986. — 40 с.
3. Ушков В. А., Кулев Д. Х., Лалаян В. М., Антипова Б. М., Булгаков Б. И., Нагановский Ю. К. Производные ферроцена – ингибиторы дымообразования пластифицированных ПВХ-материалов // Пластические массы. — 1988. — № 7. — С. 50–51.
4. Решетова М. Д. Применение ферроцена в промышленности : обз. инф. Сер.: Кремнийорганические продукты и их применение. — М. : НИИТЭХИМ, 1975. — 35 с.
5. Синдицкий В. П., Чёрный А. Н., Марченков Д. А. Механизм катализа горения производными ферроцена. 1. Горение перхлората аммония и ферроцена // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 1. — С. 59–68.
6. Фомин В. М. Применение сэндвичевых комплексов переходных металлов в электронике и катализе. Реакции окисления. — Н. Новгород : НГУ им. Н. И. Лобачевского, 2007. — 73 с.
7. Несмеянов А. Н. Ферроцен и родственные соединения. — М. : Наука, 1982. — 439 с.
8. Энергетические конденсированные системы : краткий энциклопедический словарь / Под ред. Б. П. Жукова. — Изд. 2-е. — М. : Янус-К, 2000. — 596 с.
9. Dyagileva L. M., Mar'in V. P., Tsyganova E. I., Razuvaev G. A. Reactivity of the first transition row metallocenes in thermal decomposition reaction // J. Organometal. Chem. — 1979. — Vol. 175. — P. 63–72.
10. Сосин С. Л., Коршак В. В., Фрунзе Т. М. Синтез и полимеризация 1,1'-диизопропенилферроцена и 1,1'-ди-(α -оксиизопропенил)-ферроцена // Доклады АН СССР. — 1968. — Т. 179, № 5. — С. 1124–1126.
11. Сосин С. Л., Антипова Б. М., Ежова Т. М., Джаши Л. В., Коршак В. В. Синтез и полимеризация замещенных в ядре этильных производных винил- и дивинилферроцена // Высокомолекулярные соединения. — 1976. — Т. XVIII, № 1. — С. 34–39.
12. Несмеянов А. Н. Химия ферроцена. — М. : Наука, 1969. — 606 с.

Материал поступил в редакцию 27 марта 2014 г.

FLAMMABILITY AND SMOKE-FORMING ABILITY OF POLYMERIC MATERIALS CONTAINING FERROCENE DERIVATIVES

USHKOV V. A., Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory "The modern composite materials", Institute of Civil Engineering and Architecture Building of Moscow State Building University (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: VA.Ushkov@yandex.ru)

NEVZOROV D. I., Postgraduate of Polymer Building Materials and Applied Chemistry Department, Institute of Construction and Architecture of Moscow State Building University (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: nevzorovdi@yandex.ru)

KOPYTIN A. V., Postgraduate of Polymer Building Materials and Applied Chemistry Department, Institute of Construction and Architecture of Moscow State Building University (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

LALAYAN V. M., Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences (Kosygina St., 4, Moscow, 119991, Russian Federation)

ABSTRACT

The influence of the concentration and chemical nature of ferrocene derivatives on heat resistance, flammability and smoke-forming ability of polymer materials based on polymers of coking has been considered. It is shown that the use of these compounds not only reduces smoke-forming ability, but also reduces the flammability of polymeric materials based on PVC and epoxy oligomers. The mechanism of action was caused by the formation of ferrocene derivatives during their decomposition highly catalytically active iron oxides inhibit the formation of benzene and smoke. It has been established that the optimum concentration of iron derivatives cyclopentadienyl sandwiched materials for polymers on the basis of coking is 0.3–0.5 wt. %. It has been revealed that the chemical structure and content of the investigated ferrocene derivatives have almost no effect on the decomposition of epoxy resins and PVC materials at low temperatures, but they affect the coking degradation of polymers in the high temperature region at a temperature above 310 °C. Thus ferrocene derivatives are more effective than ferrocene.

Keywords: PVC materials; epoxy compositions; ferrocene derivatives; flammability; smoke-forming ability.

REFERENCES

1. Golovenko N. I., Kitaygora E. A., Mozhukhin V. B., Nikolaev V. G. Ognestoykiye PVKh-kompozitsii s ponizhennym dymo- i gazovydeleniyem. [Fire resistant PVC compositions with low smoke and gas emission]. *Obz. inf. NIITEKhIM. Ser. Akrilaty i polivinilkhlord* [Overview of NIITEKhIM. Series: Acrylates and polyvinyl chloride]. Moscow, NIITEKhIM Publ., 1984. 41 p.
2. Kulev D. Kh., Kitaygora E. A., Golovenko N. I., Mozhukhin V. B. Problemy snizheniya goryuchesti i dymobrazuyushchey sposobnosti materialov na osnove plastifitsirovannogo PVKh [Problems reduce the flammability and smoke-forming ability of materials based on plasticized PVC]. *Obz. inf. NIITEKhIM. Ser. Akrilaty i polivinilkhlord* [Overview of NIITEKhIM. Series: Acrylates and polyvinyl chloride]. Moscow, NIITEKhIM Publ., 1986. 40 p.
3. Ushkov V. A., Kulev D. Kh., Lalayan V. M., Antipova B. M., Bulgakov B. I., Naganovskiy Yu. K. Proizvodnyye ferrotsena — inhibitory dymobrazovaniya plastifitsirovannykh PVKh-materialov [Ferrocene derivatives — inhibitors smoke generation of plasticized PVC materials]. *Plasticheskiye massy — Plastic Masses*, 1988, no. 7, pp. 50–51.
4. Reshetova M. D. Primeneniye ferrotsena v promyshlennosti [Application in industry ferrocene]. *Obz. inf. NIITEKhIM. Ser. Kremniyorganicheskiye produkty i ikh primeneniye* [Overview of NIITEKhIM. Series: Organosilicon products and their application]. Moscow, NIITEKhIM Publ., 1975. 35 p.

5. Sinditskiy V. P., Chernyy A. N., Marchenkov D. A. Mekhanizm kataliza goreniya proizvodnymi ferrotsena. 1. Goreniye perkhlorata ammoniya i ferrotsena [Catalysis mechanism of combustion of ferrocene derivatives. 1. Combustion of ammonium perchlorate and ferrocene]. *Fizika goreniya i vzryva — Physics of Combustion and Explosion*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 59–68.
6. Fomin V. M. *Primeneniye sendvichevykh kompleksov perekhodnykh metallov v elektronike i katalize. Reaktsii okisleniya* [Application sandwich complexes of transition metals in the electronics and catalysis. Oxidation reaction]. Nizhni Novgorod, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod Publ., 2007. 73 p.
7. Nesmeyanov A. N. *Ferrotsen i rodstvennyye soyedineniya* [Ferrocene and related compounds]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 439 p.
8. Zhukov B. P. (ed). *Energeticheskiye kondensirovannyye sistemy. Kratkiy entsiklopedicheskiy slovar* [Condensed energy system: A Brief Encyclopedic Dictionary]. Moscow, Yanus-K Publ., 2000. 596 p.
9. Dyagileva L. M., Mar'in V. P., Tsyganova E. I., Razuvaev G. A. Reactivity of the first transition row metallocenes in thermal decomposition reaction. *J. Organometal. Chem.*, 1979, vol. 175, pp. 63–72.
10. Sosin S. L., Korshak V. V., Frunze T. M. Sintez i polimerizatsiya 1,1'-diizopropenilferrotsena i 1,1'-di-(α -oksiizopropenil)-ferrotsena [Synthesis and polymerization of 1,1'-diisopropenylferrocene and 1,1'-di-(α -oxyisopropenyl)-ferrocene]. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1968, vol. 179, no. 5, pp. 1124–1126.
11. Sosin S. L., Antipova B. M., Ezhova T. M., Dzhashi L. V., Korshak V. V. Sintez i polimerizatsiya zameshchennykh v yadre etilnykh proizvodnykh vinil- i divinilferrotsena [Synthesis and polymerization core-substituted derivatives of ethyl vinyl- and divinylferrocene]. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya — Polymer Science*, 1976, vol. XVIII A, no. 1, pp. 34–39.
12. Nesmeyanov A. N. *Khimiya ferrotsena* [Chemistry of ferrocene]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 606 p.



Издательство «ПОЖНАУКА»

ВНИМАНИЕ! Распространяется БЕСПЛАТНО!



А. Я. Корольченко, О. Н. Корольченко
СРЕДСТВА ОГНЕ- и БИОЗАЩИТЫ
 Изд. 3-е, перераб. и доп. — 2010. — 250 с.

В третье издание внесены существенные изменения: включена глава, посвященная механизму огнебиозащиты древесины, расширена глава по анализу требований, содержащихся в нормативных документах по средствам огнезащиты, и их применению в практике строительства. Приведена информация ведущих производителей средств, предлагаемых на отечественном рынке для огнезащиты: древесины (пропитки, лаки и краски), несущих металлических конструкций (средства для конструктивной огнезащиты, огнезащитные штукатурки, вспучивающиеся покрытия), воздухопроводов, кабелей и кабельных проходок, ковровых покрытий и тканей. Представлены также биозащитные составы для древесины.

Информация о средствах огне- и биозащиты включает данные о рекомендуемых областях их применения, эффективности, технологии нанесения, организации-производителях.

Издание предназначено для работников проектных организаций, специалистов в области огне- и биозащиты и пожарной безопасности.

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

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

А. Э. НИ, магистрант кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30)

УДК 614.841.12:533.6

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СЛОЯХ ПОЧВЫ КАК ИНСТРУМЕНТА ДИСТАНЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ПОЧВЫ

Дан анализ существующих математических моделей процесса теплопереноса в почвах при воздействии лесных пожаров. Установлено, что в рамках этих моделей не описывается весь спектр значимых факторов при воздействии лесных пожаров на почвы. Развитие ранее разработанных моделей позволит использовать их в системах экологического мониторинга, в частности для создания единой системы мониторинга, нацеленной только на предсказание и нейтрализацию вредных воздействий на почву и микроорганизмы при лесных пожарах.

Ключевые слова: математическое моделирование; тепломассоперенос; лесной пожар; мониторинг; почва.

Введение

Пожар с экологических позиций является стихийным, неконтролируемым распространением огня, который наносит вред всему окружающему (растениям, животным, микроорганизмам и т. п.) [1]. В первую очередь это относится к лесным пожарам. Проблемам изучения лесных пожаров с каждым годом уделяется все больше и больше внимания, так как они наносят огромный ущерб окружающей среде и экономике [2, 3]. В результате горения лесов образуются парниковые газы и соединения, которые пагубно влияют на озоновый слой Земли. Помимо этого, пирогенному воздействию подвергается почва, в результате чего в ней накапливаются токсичные вещества, снижается ферментативная и биологическая активность, уменьшается запас органического вещества и изменяется значение водородного показателя pH [4–6].

До настоящего времени исследованием состояния почв после лесных пожаров в основном занимались почвоведы. Для оценки состояния почв применяли физико-химический анализ проб почвы, взятых после пожара [7, 8]. Для исследования влияния лесного пожара на окружающую среду проводили натурные эксперименты. Для этого моделировали пожар разной интенсивности путем контролируемого выжигания [9]. Однако моделирование реального пожара требует значительных затрат средств и высококвалифицированных специалистов. Ранее была разработана методология прогностического

моделирования лесной пожарной опасности [10]. Полученные результаты могут быть использованы в качестве входных данных для систем оценки, мониторинга и прогнозирования экологических последствий лесных пожаров [11].

Цель работы — создание новой обобщенной концепции оценки влияния поражающих факторов лесных пожаров на окружающую среду, в частности на почвенные микробные сообщества, как инструмента дистанционного исследования состояния пирогенных почв.

При проведении исследований ставились следующие задачи:

- 1) анализ публикаций по тематике проекта;
- 2) разработка комплекса необходимых требований к новой системе оценки экологических последствий лесных пожаров;
- 3) разработка обобщенной структуры системы оценки и прогноза экологических последствий лесных пожаров;
- 4) разработка структуры модуля оценки поражающих факторов лесного пожара на почвы;
- 5) разработка плана проведения исследований с целью создания новой системы оценки экологических последствий лесных пожаров.

Предпроектное исследование

За последнее столетие процессы горения биомассы и изменения использования земли привели к глобальному увеличению концентрации CO₂ в атмо-

сфере (почти на 30 %) и температуры (приблизительно на 0,6 °C) [12]. Результаты большинства исследований показали, что температура почвы как функция времени, местоположения и глубины будет также меняться [13]. В связи с этим представляется перспективной разработка математических моделей, которые связывают температуру почвы с другими параметрами, например с температурой воздушной среды (в том числе в экстремальных условиях — при лесных пожарах). Лесные почвы могут быть биологически, химически и физически подвергнуты влиянию лесных пожаров. Основное воздействие пожаров на почвы определяется интенсивностью пожара и, как следствие, температурой самой почвы. Последствием непосредственного влияния пожара является потеря органического вещества при его сгорании, повышение температуры почвы, уменьшение влагосодержания, увеличение pH-фактора почвы, значительная подверженность эрозии и оползням [14]. Лесные пожары могут также вызывать серьезное нарушение динамики экосистемы из-за изменений в количестве питательных веществ и других элементов, так же как и их процессов рециркуляции [15].

В настоящее время широко развита база математического моделирования процессов теплопереноса. Важный импульс для развития теплофизики почв был сделан А. Ф. Чудновским [16], который разработал фундаментальную базу для исследования процессов теплопереноса в почвах. В своей работе А. Ф. Чудновский рассмотрел типичные случаи теплопереноса, такие как прямая и обратная задачи теплопроводности в почве, сопряженный теплообмен в системе *почва – приземный воздух*, теплоперенос в почве, осложненный движением почвенной влаги. Дифференциальные уравнения переноса решались аналитически, так как возможность проведения ресурсоемких вычислительных экспериментов появилась позже. Вследствие сложности получения аналитического решения в основном рассматривались простейшие одномерные линейные случаи. Дальнейшего развития его работа не получила.

Аналитический обзор литературы показал, что математическому моделированию процессов теплопереноса в почве при лесных пожарах уделялось недостаточно внимания. Обнаружена всего одна базовая математическая модель, разработанная в России [17], и две модели зарубежных ученых [18, 19]. Дефицит разработанных моделей объясняется сложностью численного решения уравнений переноса для специалистов, занимающихся исследованием почвы (биологи, экологи, почвоведы и т. д.). Сравнительные характеристики существующих моделей представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики математических моделей теплопереноса в почве при воздействии лесных пожаров

Источник	Год	Пиролиз ЛГМ	Пиролиз органического слоя почвы	Испарение почвенной влаги	Двумерная модель
[17]	2013	+	+	–	–
[18]	1997	–	–	–	+
[19]	2008	–	–	–	–

В математической модели, описанной в [18], был рассмотрен случай распространения тепла в сухой почве по двум координатам. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования показало их неплохое соответствие. Была разработана простая, но эффективная модель, несмотря на отсутствие в то время мощной вычислительной техники. Однако дальнейшего развития данная модель [18] не получила.

В работе [19] описано совместное проведение эксперимента и численного моделирования процессов теплопереноса в сухой почве. В ходе эксперимента сухая почва помещалась в калориметр с конусообразным электронагревателем, который генерирует тепловой поток, схожий с тепловым потоком от лесного пожара. В качестве математической модели была использована нелинейная одномерная модель с излучением на границе. Было рассмотрено два случая численного моделирования — с постоянными и зависящими от температуры теплофизическими характеристиками. В результате исследования были установлены распределения температуры в почве на разной глубине. Полученные данные были использованы для определения глубины летального поражения микроорганизмов. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования также показали неплохое соответствие. В заключение авторы работы отметили, что погрешность в численном моделировании вызвана допущением об отсутствии испарения почвенной влаги и пиролиза органического вещества.

Одномерная математическая модель теплопереноса в слоях почвы [17] наиболее приближена к реальным условиям. В данной модели почва представлена как двухслойная система, состоящая из глины и органики. На поверхности почвы присутствует лесной горючий материал (ЛГМ). Приняты следующие допущения: теплофизические свойства глины, органики, ЛГМ и воздуха не зависят от температуры; конвективным теплопереносом в слое воздуха пренебрегается. Рассмотрены несколько видов внешнего воздействия на слой почвы: огненный шторм, полевой верховой пожар, режим перехода низового пожара в верховой, низовый пожар и догорание коксового остатка. Несмотря на отсутствие экспе-

риментальных данных, получены распределения температур, которые качественно согласуются с результатами работ [18, 19]. Из вышесказанного можно сделать вывод, что все ранее разработанные математические модели имеют удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными. Однако для их применения в системах экологического мониторинга требуется дальнейшее развитие инструментов математического моделирования теплового воздействия лесных пожаров на почвы.

Новая концепция мониторинга почвы после лесных пожаров

Общие замечания

В настоящее время в мире реализуется ряд проектов по защите окружающей среды. Проект Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) [20], или Глобальная система изучения Земли, стал продолжением проекта Group of Earth Observation — GEO (Группа по наблюдениям за Землей). Проект развивается по 10-летнему плану (2005–2015 гг.). В нем участвуют 75 стран-членов и 51 организация. Данная система состоит из инструментов и моделей, предназначенных для измерения, мониторинга и прогнозирования физических, химических и биологических аспектов нашей планеты. Проект основан на аэрокосмическом (дистанционном) методе экологического мониторинга.

В России в данный момент действует Единая государственная система экологического мониторинга (ЕГСЭМ) [21], которая так же, как и GEOSS, включает в свой состав мониторинг почвенного покрова. В основе ЕГСЭМ лежит концепция комплексной характеристики состояния окружающей природной среды, которая учитывает все аспекты загрязнения окружающей среды, поведения загрязняющих веществ и проявления их воздействия. Комплексные исследования нацелены на определение источника загрязнения, оценку его интенсивности и время воздействия, а также на поиск способов оздоровления среды.

Современная система мониторинга базируется, в первую очередь, на математических или иных моделях контролируемых процессов [22]. Таким образом, расширение существующих моделей (многомерность, добавление таких эффектов, как движение почвенной влаги, учет конвекции воздуха и т. д.) позволит, с одной стороны, дополнить уже существующие системы экологического мониторинга, а с другой — создать единую систему, нацеленную только на предсказание и нейтрализацию вредных воздействий на почву и микроорганизмы при лесных пожарах. Для этого также потребуются серия экспериментов для подтверждения адекватности раз-

работанных эколого-математических моделей. Экспериментальное исследование необходимо не только для сравнения тепловых режимов в почве с данными, полученными при численном моделировании, но и для определения глубины летального поражения микроорганизмов [23].

Основные методы исследований

Исследования влияния повышенной температуры на почвы планируется выполнять с привлечением технологии математического моделирования и физического эксперимента на специально оборудованных стендах, а также посредством микробиологических исследований.

1. Математически процесс переноса тепла и массы в окружающей среде и очаге лесного пожара описывается с помощью уравнений теплопроводности и диффузии [24] с соответствующими начальными и граничными условиями. Эти уравнения математической физики (даже в трехмерном случае) могут быть успешно решены конечно-разностным методом. Для решения многомерных уравнений математической физики используется локально-одномерный метод [25]. Как правило, задачи прогноза лесной пожарной опасности и оценки экологических последствий требуют больших вычислительных ресурсов. В этом случае для решения поставленных задач может быть применен адаптированный подход ландшафтного распараллеливания [26] на многопроцессорных вычислительных системах [27].

2. Важным инструментом в решении задач теории лесной пожарной опасности и оценки экологических последствий является физическое моделирование. В процессе разработки теории лесной пожарной опасности созданы уникальные установки по моделированию воздействия источников локального нагрева на слои ЛГМ [28]. На основе этих установок может быть создано оборудование для исследования теплопереноса в природных слоистых средах типа почвы.

3. Микробиологические исследования в рамках настоящей концепции выделены в отдельный блок исследований.

Необходимые требования к новой системе

Результаты предпроектного исследования показывают, что создание в обозримой перспективе отечественной системы оценки, мониторинга и прогноза экологических последствий лесных пожаров, обладающей конкурентно-привлекательными качествами, потребует привлечения современных информационно-вычислительных технологий, физически содержательных моделей и вероятностных критериев. Основными требованиями, которые необходимо выполнить на пути создания такой системы

для оценки экологических последствий лесных пожаров, являются [11]:

1) наличие государственной концепции создания и развития отечественной системы оценки экологических последствий лесных пожаров;

2) наличие физико-математических моделей теплопереноса в слоистой структуре почвы при внешних воздействиях очагов лесных пожаров;

3) наличие сети метеостанций с возможностью измерения температуры почвы на конкретной территории;

4) наличие физико-математических моделей учета антропогенной нагрузки на лесопокрытых территориях;

5) наличие физически и математически обоснованного критерия оценки уровня лесной пожарной опасности;

6) наличие базы исходных данных для моделирования теплофизических и физико-химических процессов, протекающих в слое почвы при возникновении лесных пожаров;

7) реализация методики в виде программного комплекса, позволяющего прогнозировать экологические последствия лесных пожаров в режиме, опережающем реальное время развития процесса;

8) возможность модернизации и обновления отдельных моделей и подсистем в методике прогнозирования лесной пожарной опасности и ее программной реализации;

9) наличие государственного стандарта не на конкретную методику со всеми фиксированными компонентами, а на спецификацию соответствия методики определенным требованиям;

10) наличие стандартов, спецификаций на файлы входной, промежуточной и выходной информации в системе оценки, мониторинга и прогнозирования экологических последствий лесных пожаров;

11) наличие технологий, позволяющих потребителям оперативно получать оценочную и прогнозную информацию;

12) наличие технологий и методов, позволяющих отслеживать степень достоверности получаемых прогнозов;

13) наличие соответствующим образом подготовленных специалистов, способных обслуживать систему;

14) доступность и понятность прогнозной информации для лиц, принимающих управленческие решения (возможно, не имеющих специальной физико-математической подготовки).

Фундаментальный базис

Бурное развитие вычислительной техники позволяет численно решать уравнения переноса с достаточно низкой погрешностью, поэтому использо-

вание математического моделирования процессов теплопереноса в слоях почвы имеет свои перспективы.

В качестве базовой модели могут быть использованы [17]:

- уравнение энергии для слоя воздуха:

$$\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2}; \quad (1)$$

- уравнение энергии для слоя ЛГМ:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + q_p k_1 \rho_1 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right); \quad (2)$$

- уравнение энергии для верхнего слоя почвы:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}; \quad (3)$$

- уравнение энергии для нижнего слоя почвы:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2}. \quad (4)$$

Граничные условия для уравнений (1)–(4):

$$\Gamma_0: \quad \alpha_1 (T - T_{es}) = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}; \quad (5.1)$$

$$\Gamma_1: \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, \quad T_3 = T_2; \quad (5.2)$$

$$\Gamma_2: \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad T_2 = T_1; \quad (5.3)$$

$$\Gamma_3: \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z}, \quad T_1 = T_g; \quad (5.4)$$

$$\Gamma_4: \quad \alpha_2 (T_{ea} - T) = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z}. \quad (5.5)$$

Начальные условия для уравнений (1)–(4):

$$T_i|_{t=0} = T_{i0}. \quad (6)$$

Кинетическое уравнение и начальное условие:

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -k_p \rho_1 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right), \quad \varphi|_{t=0} = \varphi_0. \quad (7)$$

Здесь T_i , ρ_i , c_i , λ_i — температура, плотность, теплоемкость и теплопроводность; $i = g, 1, \dots, 3$ (g — слой воздуха; 1 — слой ЛГМ; 2 — верхний слой почвы; 3 — нижний слой почвы); t — временная координата; z — пространственная координата; q_p — тепловой эффект реакции пиролиза ЛГМ; k_1 — предэкспонента реакции пиролиза ЛГМ; φ — объемная доля сухого органического вещества ЛГМ; E_1 — энергия активации реакции пиролиза ЛГМ; R — универсальная газовая постоянная; α_1 — коэффициент теплопередачи; α_2 — коэффициент теплоотдачи; es , ea , 0 — индексы, соответствующие параметрам окружающей среды в глубине почвы и воздухе, а также в начальный момент времени.



Рис. 1. Область решения

Область решения представлена на рис. 1. Постепенно добавляя соответствующие эффекты и учитывая распределение тепла по дополнительным координатам, можно создать математическую модель, которая не будет иметь аналогов в мире.

Обобщенная структура системы экомониторинга лесных пожаров

К основным поражающим факторам лесного пожара относят физико-химические воздействия (повышенная температура воздуха окружающей среды, световое и тепловое излучение, наличие в дыме угарного газа и углекислоты, горящих частиц лесного горючего материала); психофизические нагрузки (нервно-психологические и физические) [29]. На рис. 2 представлена обобщенная структура системы оценки экологических последствий лесных пожаров, на рис. 3 — структура подсистемы оценки, мониторинга и прогнозирования экологических последствий лесных пожаров при их воздействии на почвы.

Структурированный план реализации концепции

Для реализации настоящей концепции в аспекте оценки, мониторинга и прогнозирования экологических последствий лесных пожаров в плане их воз-

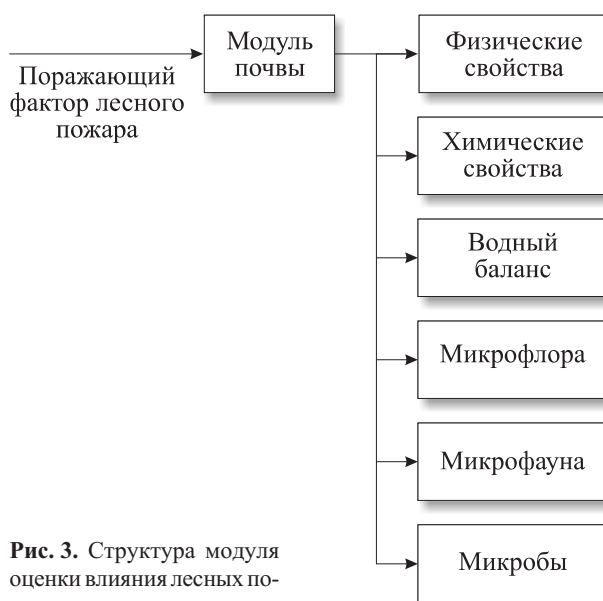


Рис. 3. Структура модуля оценки влияния лесных пожаров на почвы

действия на почвы следует выполнить, как минимум, следующие этапы исследований:

- 1) разработка спецификаций на методику оценки влияния лесных пожаров на почвы;
- 2) разработка физических моделей воздействия лесных пожаров на почвы;
- 3) разработка математических моделей влияния лесных пожаров на почвы с учетом основных физических процессов, протекающих в слоистой структуре почвы;
- 4) создание конечного программного продукта — системы оценки влияния лесных пожаров на почвы с использованием геоинформационных и спутниковых технологий и подходов эколого-математического мониторинга природных систем;
- 5) разработка геопортала, посредством интерфейса которого оценочная и прогнозная информация будет доставляться конечному пользователю;



Рис. 2. Обобщенная структура системы оценки экологических последствий лесных пожаров

6) систематизация файловой структуры программного продукта для его интеграции с другими информационно-вычислительными системами.

Выводы

Экологические последствия лесных пожаров многообразны, и их прогнозирование имеет важное народнохозяйственное значение, в частности прогнозирование влияния лесных пожаров на почвы. В настоящей статье разработана обобщенная концепция оценки экологических последствий лесных пожаров. Рассматривается также частный случай — оценка влияния тепловых режимов природных пожаров на почвы. Развитие этой концепции на основе методов

численного моделирования будет способствовать более глубокому пониманию влияния поражающих факторов лесного пожара на окружающую среду и минимизации экономического и экологического ущерба.

Анализ существующих математических моделей теплопереноса в почве показал, что все они несовершенны. Системы экологического мониторинга отслеживают загрязнение почв, но при лесном пожаре загрязнение почвы золой — вторичный фактор. В первую очередь почва подвергается тепловому воздействию, что грозит гибелью растительности и живым микроорганизмам. Восстановление же лесного покрова может занимать десятки лет [30, 31].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щеглова Е. Г., Нестеренко Ю. М., Шабает В. М. Лесные пожары и их роль в формировании и развитии лесных биоценозов в пойменных лесах степной зоны // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. — 2013. — № 2. — С. 8–13.
2. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. — 301 с.
3. Третьяков Н. Н. Лесные пожары и энтомофауна: негативные экологические последствия неизбежны // Прикладная энтомология. — 2011. — № 4. — С. 26–30.
4. Коган Р. М., Панина О. Ю. Исследование влияния лесных пожаров на почвы широколиственных лесов (на примере Еврейской автономной области) // Региональные проблемы. — 2010. — № 1. — С. 67–70.
5. Alvarez R., Valbuena L., Calvo L. Effect of high temperatures on seed germination and seedling survival in three pine species (*Pinus pinaster*, *P. sylvestris* and *P. nigra*) // International Journal of Wildland Fire. — 2007. — Vol. 16. — P. 63–70.
6. Garcia-Corona R., Benito E., de Blas E., Varela M. E. Effects of heating in some soil physical properties related to its hydrological behaviour in two North—Western Spanish soils // International Journal of Wildland Fire. — 2004. — Vol. 13. — P. 195–199.
7. Горбунова Ю. С., Девятова Т. А. Изменение химического состава чернозема, выщелоченного под влиянием пирогенного воздействия // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. — 2013. — № 1. — С. 9–14.
8. Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review // Oecologia. — Vol. 143. — P. 1–10.
9. Матвеев А. М., Матвеева Т. А. Роль пирогенного фактора в лесообразовательном процессе // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 4, ч. 4. — С. 914–918.
10. Барановский Н. В. Теплофизические аспекты прогностического моделирования лесной пожарной опасности : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Томск : ТПУ, 2012. — 436 с.
11. Барановский Н. В., Кузнецов Г. В., Нагорнова Т. А., Гвоздяков Д. В. Новая концепция оценки экологических последствий лесных пожаров, в частности при их влиянии на почвы // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6. URL : <http://www.science-education.ru/113-10844> (дата обращения: 12.03.2014 г.).
12. IPCC Climate Change (2007) Synthesis Report. Summary for Policymakers. URL : <http://www.ipcc.ch> (дата обращения: 25.10.2013 г.).
13. Mihalakakou G. On estimating soil surface temperature profiles // Energy Build. — 2002. — Vol. 34. — P. 251–259.
14. Macadam A. Effects of prescribed fire on forest soils. B. C. Min. For. Research Report 89001-PR. — Australia : Victoria, 1989.
15. DeBano L. F., Neary D. G., Ffolliott P. F. Fire's effects on ecosystems. — New York : Wiley, 1998. — 333 p.
16. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв. — М. : Наука, 1976. — 352 с.
17. Барановский Н. В., Тойчурев Р. М., Олалей А. О. Математическое моделирование теплопереноса в слое почвы при воздействии очага лесного пожара // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 4. — С. 317.

18. Oliveira L. A., Viegas D. X., Raimundo A. M. Numerical predictions on the soil thermal effect under surface fire conditions // International Journal of Wildland Fire. — 1997. — Vol. 7. — P. 51–63.
19. Ebenezer K. Enninful, David A. Torvi. A variable property heat transfer model for predicting soil temperature profiles during simulated wildland fire conditions // International Journal of Wildland Fire. — 2008. — Vol. 17. — P. 205–213.
20. Global Earth Observation System of Systems. Official page. URL : <https://www.earthobservations.org/geoss.shtml> (дата обращения: 10.03.2014 г.).
21. Об утверждении Положения о Единой государственной системе экологического мониторинга : приказ от 09.02.95 г. № 49. — М. : Мин-во охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 1995.
22. Кречетова Е. А., Иофис М. А. Организация комплексного геоэкологического мониторинга // Научный вестник Московского государственного горного университета. — 2011. — № 9. — С. 48–53.
23. Busse M., Hubbert K., Fiddler G., Shestak C., Powers R. Lethal soil temperatures during burning of masticated forest residues // International Journal of Wildland Fire. — 2005. — Vol. 14. — P. 267–276.
24. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Пространственная постановка и численное исследование задачи о зажигании слоя лесного горючего материала нагретой до высоких температур частицей // Бутлеровские сообщения. — 2010. — Т. 22, № 12. — С. 30–37.
25. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Аддитивные схемы для задач математической физики. — М. : Наука, 2001. — 320 с.
26. Барановский Н. В. Ландшафтное распараллеливание и прогноз лесной пожарной опасности // Сибирский журнал вычислительной математики. — 2007. — Т. 10, № 2. — С. 141–152.
27. Богданов А. В., Корхов В. В., Мареев В. В., Станкова Е. Н. Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем. Курс лекций : учебное пособие. — М. : ИНТУИТ.РУ “Интернет-Университет Информационных Технологий”, 2004. — 176 с.
28. Барановский Н. В. Экспериментальное исследование процесса зажигания в режиме тления растительного горючего материала в результате действия сфокусированного солнечного излучения // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 12. — С. 17–21.
29. Цай Ю. Т., Липина Л. А. Защита людей от воздействия опасных факторов лесного пожара при выполнении лесопожарных работ // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия : матер. 4-й Междунар. конф. — Томск : Изд-во Томского ун-та, 2001. — С. 157–159.
30. Ушатин И. П., Мамонов Д. М. Динамика лесовосстановительных процессов на гарях в центральной лесостепи // Воронежская государственная лесотехническая академия. — 2012. — № 3. — С. 59–69.
31. Il'icheva Yu. N., Ignat'ev L. A., Artymuk S. Yu. The effect of forest fires and clearing of fire-destroyed stands on pedoecological conditions of natural forest regeneration // Contemporary Problems of Ecology. — 2011. — Vol. 4, No. 6. — P. 634–640.

Материал поступил в редакцию 20 марта 2014 г.

English

DEVELOPMENT PROSPECTS OF MATHEMATICAL SIMULATION OF HEAT MASS TRANSFER PROCESSES IN THE SOIL LAYERS AS A TOOL OF REMOTE SENSING OF FOREST FIRE IMPACT

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

NI A. E., Student of Theoretical and Industrial Heating Engineering Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation)

ABSTRACT

The fire from ecological positions is spontaneous, uncontrollable spreading of fire which harms to all surrounding (plants, animal, microorganisms etc.). To problems of studying of forest fires every year it is given more and more attention as they cause a huge damage to environment and economy.

Till now after forest fires basically soil scientists were engaged in research of a condition of soils. For an estimation of a condition of soils carry out the physical and chemical analysis of tests of the soil taken after a fire. Also for research of influence of forest fire on environment natural experiment is made. The fire of different intensity by a controllable burning out is for this purpose modeled. Such kinds of research demands considerable expenses of means and highly skilled experts in case of modeling of a real fire. The methodology of prognostic modeling of forest fire danger is earlier developed. The obtained results can be used as entrance data for systems of an estimation, monitoring and forecasting of ecological consequences of forest fires.

The work purpose is creation of the new generalised concept of an estimation of influence of damaging factors of forest fires on environment, in particular on soil microbial communities as tool of remote research of a condition of pyrogenic soils.

The analysis of existing mathematical models of heat transfer process in soils is carried out at influence of forest fires. It is established, that within the limits of these models all spectrum of significant factors is not described yet at influence of forest fires on soils. Development before the developed models will allow to use them in ecological monitoring systems. As there is a prospect of creation of uniform system of the monitoring aimed at a prediction and neutralisation of harmful influences on soils and microorganisms at forest fires.

Keywords: mathematical simulation; heat and mass transfer; forest fire; monitoring; soil.

REFERENCES

1. Shcheglova E. G., Nesterenko Yu. M., Shabaev V. M. Lesnyye pozhary i ikh rol v formirovani i razviti i lesnykh biotsenozov v poymennykh lesakh stepnoy zony [Forest fires and their role in the formation and development of forest biocenoses in flood forests of the steppe zone]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta — Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*, 2013, no. 2, pp. 8–13.
2. Kuznetsov G. V., Baranovskiy N. V. *Prognoz vozniknoveniya lesnykh pozharov i ikh ekologicheskikh posledstviy* [Forecast of forest fire occurrence and their ecological consequences]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ., 2009. 301 p.
3. Tretyakov N. N. Lesnyye pozhary i entomofauna: negativnyye ekologicheskiye posledstviya neizbezhny [Forest fires and entomofauna: negative environmental impacts are unavoidable]. *Prikladnaya entomologiya — Insectology*, 2011, no. 4, pp. 26–30.
4. Kogan R. M., Panina O. Yu. Issledovaniye vliyaniya lesnykh pozharov na pochvy shirokolistvennykh lesov (na primere Yevreyskoy avtonomnoy oblasti) [Investigation of forest fires influence on the soils in deciduous woods (on the example of the Jewish autonomous region)]. *Regionalnyye problemy — Regional Problems*, 2010, no. 1, pp. 67–70.
5. Alvarez R., Valbuena L., Calvo L. Effect of high temperatures on seed germination and seedling survival in three pine species (*Pinus pinaster*, *P. sylvestris* and *P. nigra*). *International Journal of Wildland Fire*, 2007, vol. 16, pp. 63–70.
6. Garcia-Corona R., Benito E., de Blas E., Varela M. E. Effects of heating in some soil physical properties related to its hydrological behaviour in two North — Western Spanish soils. *International Journal of Wildland Fire*, 2004, vol. 13, pp. 195–199.
7. Gorbunova Yu. S., Devyatova T. A. Izmeneniye khimicheskogo sostava chernozema, vyshchelochennogo pod vliyaniem pirogennogo vozdeystviya [The change chemical composition of chernozem leaching under pyrogenic influence]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya — Proceedings of the Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2013, no. 1, pp. 9–14.
8. Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, vol. 143, pp. 1–10.
9. Matveev A. M., Matveeva T. A. Rol pirogennogo faktora v lesoobrazovatelnom protsesse [The role of the pyrogenic factor are established in the process of forest-forming]. *Fundamentalnyye issledovaniya — Fundamental Researches*, 2013, no. 4, part 4, pp. 914–918.
10. Baranovskiy N. V. Teplofizicheskiye aspekty prognosticheskogo modelirovaniya lesnoy pozharoy opasnosti. Dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk [Thermophysical aspects of prognostic modelling of forest fire danger. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2012. 436 p.

11. Baranovskiy N. V., Kuznetsov G. V., Nagornova T. A., Gvozdyakov D. V. Novaya kontseptsiya otsenki ekologicheskikh posledstviy lesnykh pozharov, v chastnosti pri ikh vliyaniy na pochvy [New concept of an estimation of forest fires ecological consequences, in particular at their influence on soils]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2013, no. 6. Available at: <http://www.science-education.ru/113-10844> (Accessed 12 March 2014).
12. IPCC Climate Change (2007) Synthesis Report. Summary for Policymakers. Available at: <http://www.ipcc.ch> (Accessed 25 November 2013).
13. Mihalakakou G. On estimating soil surface temperature profiles. *Energy Build*, 2002, vol. 34, pp. 251–259.
14. Macadam A. *Effects of prescribed fire on forest soils*. B. C. Min. For. Research Report 89001-PR. Australia, Victoria, 1989.
15. DeBano L. F., Neary D. G., Ffolliott P. F. *Fire's effects on ecosystems*. New York, Wiley, 1998. 333 p.
16. Chudnovskiy A. F. *Teplofizika pochv* [Soil thermopysics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 352 p.
17. Baranovskiy N. V., Toychuev R. M., Olaleye A. O. Matematicheskoye modelirovaniye teploperenosa v sloye pochvy pri vozdeystvii ochaga lesnogo pozhara [Mathematical modelling of heat transfer in soil layer at influence of the forest fire centre]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2013, no. 4, p. 317.
18. Oliveira L. A., Viegas D. X., Raimundo A. M. Numerical predictions on the soil thermal effect under surface fire conditions. *International Journal of Wildland Fire*, 1997, vol. 7, pp. 51–63.
19. Ebenezer K., Enniful, David A., Torvi. A variable property heat transfer model for predicting soil temperature profiles during simulated wildland fire conditions. *International Journal of Wildland Fire*, 2008, vol. 17, pp. 205–213.
20. *Global Earth Observation System of Systems. Official page*. Available at: <https://www.earthobservations.org/geoss.shtml> (Accessed 20 March 2014).
21. *About the Position statement about Uniform state system of ecological monitoring. The order on 9 February 1995 No. 49*. Moscow, the Ministry of preservation of the environment and natural resources of the RF Publ., 1995. (in Russian).
22. Krechetova E. A., Iofis M. A. Organizatsiya kompleksnogo geoekologicheskogo monitoringa [Creating a comprehensive geo-ecological monitoring]. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta — Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University*, 2011, no. 9, pp. 48–53.
23. Busse M., Hubbert K., Fiddler G., Shestak C., Powers R. Lethal soil temperatures during burning of masticated forest residues. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, vol. 14, pp. 267–276.
24. Kuznetsov G. V., Baranovskiy N. V. Prostranstvennaya postanovka i chislennoye issledovaniye zadachi o zazhiganiy sloya lesnogo goryuchego materiala nagretoy do vysokikh temperatur chastitsey [Spatial statement and numerical research of a problem about ignition of forest fuel layer by heated up to high temperatures particle]. *Butlerovskiyе soobshcheniya — Butlerov Communications*, 2010, vol. 22, no. 12, pp. 30–37.
25. Samarskiy A. A., Vabishchevich P. N. *Additivnyye skhemy dlya zadach matematicheskoy fiziki* [Additive schemes for problems of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 2001. 320 p.
26. Baranovskiy N. V. Landshaftnoye rasparallelivaniye i prognoz lesnoy pozharnoy opasnosti [Landscape parallelization and forecast of forest fire danger]. *Sibirskiy zhurnal vychislitel'noy matematiki — Siberian Journal of Numerical Mathematics*, 2007, vol. 10, no. 2, pp. 141–152.
27. Bogdanov A. V., Korkhov V. V., Mareev V. V., Stankova E. N. *Arkhitektury i topologii mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh sistem. Kurs lektsiy: uchebnoye posobiye* [Architecture and topology of multi-processing computing systems. A course of lectures. Manual]. Moscow, INTUIT.RU “Internet University of Information Technologies” Publ., 2004. 176 p.
28. Baranovskiy N. V. Eksperimentalnoye issledovaniye protsessa zazhiganiya v rezhime tleniya rastitelnogo goryuchego materiala v rezultate deystviya sfokusirovannogo solnechnogo izlucheniya [Experimental research of ignition process in a mode of decay of a vegetative combustible material as a result of action of the focused sunlight]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 12, pp. 17–21.

29. Tsaj Yu. T., Lipina L. A. Zashchita lyudey ot vozdeystviya opasnykh faktorov lesnogo pozhara pri vypolnenii lesopozharnykh rabot [Protection of people from influence of dangerous factors of forest fire at forest fire works execution]. *Lesnyye i stepnyye pozhary: vzniknoveniye, rasprostraneniye, tusheniye i ekologicheskiye posledstviya: materialy 4-y mezhdunarodnoy konferentsii* [Forest and steppe fires: occurrence, distribution, suppression and ecological consequences. Materials of 4th International Conference]. Tomsk, Publishing House of Tomsk University, 2001, pp. 157–159.
30. Ushatin I. P., Mamonov D. M. Dinamika lesovosstanovitelnykh protsessov na garyakh v tsentralnoy lesostepi [Dynamics of reforestation processes on burnings in the central forest-steppe]. *Voronezhskaya gosudarstvennaya lesotekhnicheskaya akademiya — Voronezh State Timber Academy*, 2012, no. 3, pp. 59–69.
31. Il'icheva Yu. N., Ignat'ev L. A., Artymuk S. Yu. The effect of forest fires and clearing of fire-destroyed stands on pedoecological conditions of natural forest regeneration. *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, vol. 4, no. 6, pp. 634–640.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Предлагает вашему вниманию

Л. П. Пилюгин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВНУТРЕННИХ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ



Настоящая книга посвящена проблеме прогнозирования последствий внутренних взрывов газо-, паро- и пылевоздушных горючих смесей (ГС), образующихся при аварийных ситуациях на взрывоопасных производствах. В книге материал излагается применительно к дефлаграционным взрывам, которые обычно имеют место при горении ГС на этих производствах.

В качестве основных показателей при прогнозировании последствий аварийных взрывов ГС рассматриваются ожидаемый характер и объем разрушений строительных конструкций в здании (сооружении), в котором происходит аварийный взрыв.

Книга продолжает исследования автора в области проектирования зданий взрывоопасных производств и оценки надежности строительных конструкций (на основе метода преобразования рядов распределения случайных величин).

С использованием методов теории вероятностей разработаны методики: определения характеристик взрывной нагрузки как случайной величины; оценки вероятностей разрушения конструкций, характера и объема разрушений в здании при внутреннем аварийном взрыве. Приведенные методики сопровождаются примерами расчетов для зданий различных объемно-планировочных решений.

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

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

А. Г. МАРКОВ, старший преподаватель кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4; e-mail: markov01@yandex.ru)

УДК 621.316.9

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ

Представлено обобщенное описание процессов электризации, в том числе в процессах, аппаратах и оборудовании ряда производств. Рассмотрен вопрос о необходимости сертификации материалов и технологического оборудования с целью обеспечения безопасного применения неметаллических конструкционных материалов, эксплуатация которых порой сдерживается необоснованной осторожностью в связи с недостаточной изученностью опасных последствий их электризации. Приведены данные, характеризующие электропрочностные свойства воздуха и соответствующие им предельные значения параметров процессов электризации в зависимости от параметров пограничного воздушного слоя. Показана возможность применения данных, характеризующих предельные параметры электризации в среде воздуха в нормативных документах, направленных на обеспечение пожарной безопасности технологических процессов во взрывоопасных средах.

Ключевые слова: электризация; статическое электричество; электрическая прочность; искробезопасность; электростатика; разряд; электрод; диэлектрик.

Общие положения

Концептуальный документ [1] Технического Комитета 101 “Электростатика” Международной электротехнической комиссии (МЭК ТК 101) отражает принятые в системе МЭК принципиальные основы представлений об электростатических явлениях. Отмечается, что из-за множества налагающихся факторов электростатика все еще остается “черной магией”, а не наукой, поэтому в той или иной ситуации трудно предвидеть полярность и величину проявляющихся зарядов. Отчасти такое положение объясняется двойственной природой процессов электризации. Назовем их явлениями первого и второго рода.

Явления первого рода характеризуются определенностью знаков заряда, которая проявляется, например, в формировании двойных электрических слоев, что позволяет строить трибоэлектрические ряды. Это же характерно и для многих других процессов первоначального пространственного разделения положительных и отрицательных электрических зарядов.

В последующих процессах генерирования, преобразования различных форм энергии в энергию электростатического поля, в явлениях второго рода, знак электрических зарядов не имеет значения. “Черная магия” исчезает, и электростатика в своей кон-

цептуальной основе становится наукой, особенно в аспекте определенности значений предельных параметров процессов электризации, если интересующие нас объекты рассматривать как электростатические генераторы.

Простейший пример такого генератора — случай, когда два человека поднимают полиэтиленовую скатерть размером 1,4×1,4 м. Такой генератор формирует в ее центральной части потенциал в сотни киловольт, а передний фронт его нарастания достигает миллионов вольт в секунду. Знаки и величина зарядов, импульсные характеристики генератора, а также импульсные характеристики разнообразных параметров, включая зажигающую способность возникающих при этом разрядов на смежные предметы, вполне контролируемы и измеряемы.

Другим примером генератора может быть электрофорная машина — одно из пособий школьных физических кабинетов. Возбуждение этого генератора обеспечивается сообщением электростатического заряда, возникающего от соприкосновения наэлектризованного предмета с полосками из фольги на одном из его дисков. При последующем встречном вращении дисков обеспечивается электризация по индукции остальных полосок и последующая подпитка полюсов этого генератора. Механическая энергия вращения дисков преобразуется в электри-

ческую энергию заряжаемых конденсаторов на полюсах электрофорной машины. Первоначальная полярность полюсов однозначно определяется знаком начального заряда возбуждения генератора. Однако она предсказуема только до первого искрового разряда между сферическими полюсными электродами, образующими разрядный промежуток. После первого же разряда знак полюсов может поменяться, и в дальнейшем полярность электрофорной машины становится непредсказуемой, но предельные параметры остаются стабильными. Максимальное напряжение задается длиной разрядного промежутка между образующими его разрядными электродами и их геометрической формой. Этот же разрядный промежуток и емкость заряжаемых конденсаторов определяют энергию, запасенную перед разрядом. Максимальный ток и мощность генератора, как показано ниже, определяются воздушным зазором между дисками и другими геометрическими параметрами конструкции генератора, влияющими на степень задействованного объема слоя воздуха между вращающимися дисками.

Ну и еще один пример электростатического генератора — земной шар и его атмосфера (далее — З–А). Основным фактором, выполняющим роль возбуждения генератора, является положительный адсорбционный потенциал капли воды, обусловленный дипольным моментом молекулы воды и преимущественной ориентацией отрицательного полюса диполя к поверхности капли. Благодаря этому качеству в зонах спокойной атмосферы восходящий поток уносит от приземного слоя капли воды, заряженные преимущественно отрицательно. Это приводит к образованию грозовых облаков, из которых в зонах грозовой активности возникают молнии, 80 % которых переносят к земле отрицательный электрический заряд. Именно поэтому земной шар заряжен отрицательно. Так протекает замкнутый кругооборот электрических зарядов. Масштабы источника возбуждения генератора З–А микроскопичны — диполь молекулы воды; динамика его — вся грозовая активность и электричество Земли и атмосферы.

В процессах и аппаратах также необходим анализ возбуждения процессов электризации и последующей динамики процессов генерирования, ее возможных опасных проявлений, прежде всего на основании электропрочностных свойств воздуха и конструкционных материалов. Так, в процессах электризации пневмотранспортных потоков в металлических трубопроводах в определенных случаях через смотровые щели даже визуально наблюдается искрящийся пограничный слой, обеспечивающий предельные параметры процессов электризации основного двухфазного потока *воздух – твердая фаза*.

При пневмотранспортировании по трубам из полиэтилена с электрической прочностью, которая в

20 раз превосходит электрическую прочность слоя воздуха эквивалентной толщины, наблюдается примерно 20-кратная вспышка коронного разряда у наружной поверхности трубопровода. Если труба из полиэтилена достаточно большого диаметра, то в ее стенке возникают мелькающие светящиеся пятна прежде, чем происходит ее сквозной пробой. Если диаметр трубопровода недостаточен, чтобы обеспечить пробой стенки, то возникают одновременно два зеркальных по отношению друг к другу скользящих искровых канала вдоль внутренней и наружной поверхностей трубопровода.

В случае сквозного пробоа стенки образовавшийся тончайший воздушный канал становится источником образования двусторонней короны, так что ток электризации основного ядра пневмотранспортного потока многократно возрастает. В результате образовавшегося дефекта при приближении к нему электрода возможно возникновение искрового разряда, способного, например, зажечь ватку, смоченную бензином.

Эти данные позволяют полагать, что более детальное и специализированное изучение электропрочностных свойств воздуха будет более востребованным и даст практически важные результаты.

В настоящее время изучается электрическая прочность тех конструкционных материалов, которые применяются в электротехнике, информатике или электронике, но не в аппаратах, устройствах или оборудовании технологического назначения или применяемого в средствах сбора, транспортирования и хранения разнообразных продуктов. При сертификации материалов такого назначения будут востребованы данные и по их электрической прочности, что обеспечит обоснованные возможности применения изделий и продукции из этих материалов. В 80-х годах XX века требование по электрической прочности при расчете электростатических нагрузок уже учитывалось в стандарте [2]. До настоящего времени применение неметаллических конструкционных материалов сдерживается необоснованной осторожностью в связи с недостаточной изученностью опасных последствий их электризации.

При разработке методов и устройств для испытания могут оказаться полезными данные, характеризующие электропрочностные свойства воздуха, и соответствующие им предельные значения параметров процессов электризации в зависимости от параметров пограничного воздушного слоя.

Предельные параметры процессов электризации в среде воздуха

Нередко после взаимного соприкосновения тела оказываются заряженными равными по величине положительным и отрицательным зарядами. На рис. 1

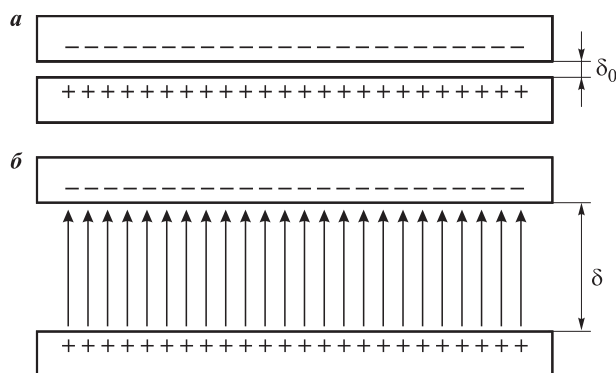


Рис. 1. Схема процесса электризации: а — микроразделение зарядов; б — макроразделение зарядов

схематично представлены две стадии процесса электризации — микро- и макроразделение слоев зарядов противоположных знаков на номинальной площади соприкосновения S .

На рис. 1,а показано состояние микроразделения двойного слоя зарядов, при котором расстояние между слоями будет δ_0 , начальная разность потенциалов U_0 , площадь слоя зарядов S_0 , напряженность поля $E (E = U_0/\delta_0)$, энергия электростатического поля $W_0 (W_0 = W_v S \delta_0)$ (где W_v — объемная плотность энергии электростатического поля, Дж/м³).

На рис. 1,б показано состояние макроразделения, при котором после разделения двойного слоя зарядов на расстояние между слоями δ разность потенциалов будет U , площадь слоя зарядов S , напряженность поля $E (E = U_0/\delta_0 = U/\delta)$, т. е. условно неизменна, а энергия возрастает во столько же раз, во сколько увеличивается объем между разделяемыми слоями электрических зарядов.

Это наиболее часто проявляющаяся схема процесса электризации. Первая стадия (микроразделение) определяется свойствами электризующихся фаз, а вторая (макроразделение) — еще и свойствами среды, в которой протекает электризация.

Наибольшие предельные значения физических величин, характеризующих процессы электризации, совпадают со значениями, соответствующими электропрочностным свойствам среды, в которой происходит электризация, или электропрочностным свойствам взаимно электризующихся материалов.

В общем случае предельные значения параметров процессов электризации соответствуют параметрам, характеризующим электропрочностные свойства среды, в которой происходит разделение положительных и отрицательных зарядов, или электропрочностные свойства твердых материалов, подвергающихся электризации [3]:

$$E_{\text{пр}} - \sigma_{\text{пр}} - j_{\text{пр}} - W_{\text{впр}} - N_{\text{впр}}; \tau(\varepsilon, \rho), \quad (1)$$

где $E_{\text{пр}}$ — напряженность, соответствующая электрической прочности, В/м;

$\sigma_{\text{пр}}$ — поверхностная плотность электрических зарядов, соответствующая электрической прочности, Кл/м²;

$j_{\text{пр}}$ — плотность тока электризации, соответствующая электрической прочности, А/м²;

$W_{\text{впр}}$ — объемная плотность электрической энергии электростатического поля, соответствующая электрической прочности, Дж/м³;

$N_{\text{впр}}$ — объемная плотность мощности электростатического поля, соответствующая электрической прочности, Вт/м³;

τ — собственное время релаксации электрических зарядов, с;

ε — относительная диэлектрическая проницаемость;

ρ — удельное сопротивление, Ом·м.

При этом для воздуха в условиях международной стандартной атмосферы на уровне моря за нормативные приняты следующие значения: $E_{\text{пр}} = 3 \cdot 10^6$ В/м; $\sigma_{\text{пр}} = 26,4$ мкКл/м²; $j_{\text{пр}} = 100$ мкА/м²; $W_{\text{впр}} = 40$ Дж/м³; $N_{\text{впр}} = 300$ Вт/м³; $\tau = 0,26$ с.

Эти значения проявились в процессах электризации двухфазных потоков (*воздух — твердая фаза*) при проведении многолетних исследований на лабораторных, опытных и производственных пневмотранспортных установках, а также в процессах электризации при трении скольжения.

Однако нельзя не учитывать, что значение $E_{\text{пр}} = 3 \cdot 10^6$ В/м характерно для плоского пограничного слоя воздуха с $\delta \sim 10$ мм, а в общем случае численные значения, соответствующие соотношению (1), будут другими, поскольку функционально зависят от δ (см. таблицу).

Значения $E_{\text{пр}}$, представленные во второй графе таблицы и на рис. 2, взяты из таблиц, содержащихся в книге Г. И. Сканиви [4].

Значения предельных параметров процессов электризации в среде воздуха в условиях нормальной атмосферы в зависимости от толщины пограничного слоя

δ , мм	$E_{\text{пр}}$, МВ/м	$\sigma_{\text{пр}}$, мкКл/м ²	$j_{\text{пр}}$, мкА/м ²	$W_{\text{впр}}$, Дж/м ³	$N_{\text{впр}}$, Вт/м ³
0,06	12,5	111	427	692	5337,5
0,08	10,7	95	365	507	3905,5
0,10	9,7	86	331	417	3210,7
0,20	7,4	66	254	242	1879,6
0,40	5,9	52	200	154	1180,0
0,48	5,6	50	192	139	1075,2
0,60	5,3	47	181	124	959,3
1,00	4,0	40	153	90	688,5
4,00	3,4	30	115	51	391,0
10,0	3,1	27	104	43	322,4
180	2,3	20	77	23	177,1
3700	1,1	10	38	5,4	41,8

Из рис. 2 следует, что зависимость $E_{\text{пр}}$ от δ выражается функцией

$$E_{\text{пр}} = 0,75 \cdot 10^6 \delta^{-0,274}. \quad (2)$$

Значения величин, представленные в таблице в графах 3–6, вычислены с учетом данных первой графы при допущении, что электростатические свойства воздуха в процессах электризации остаются неизменными, что оправдано задачей отслеживания качественной картины динамики процессов электризации.

График зависимости плотности зарядов электризации $\sigma_{\text{пр}}$ от разрядного промежутка δ приведен на рис. 3.

С увеличением разрядного промежутка от 0,06 до 10 мм плотность зарядов уменьшается согласно зависимости

$$\sigma_{\text{пр}} = 6,65 \cdot 10^{-6} \delta^{-0,274}. \quad (3)$$

Величина δ на рис. 3 и в формуле (3) по физическому смыслу уже отличается от аналогичной величины на рис. 2 и в формуле (2). На рис. 2 это — расстояние между электродами и, следовательно, между эквипотенциально заряженными поверхностями, на рис. 3 это — обобщенное условие процессов электризации, расстояние между разделяемыми поверх-

ностями плотностями зарядов, показанными, например, на рис. 1.

Допустим, что разделение поверхностей (см. рис. 1) происходит во взрывоопасных средах, для которых безопасный экспериментальный максимальный зазор зажигания (БЭМЗ) составляет порядка 0,2 мм, а оптимальный по условиям зажигания критический зазор — 1,5–4,0 мм. Тогда на основе рис. 3 заключаем, что опасность зажигания надо оценивать уже на стадии разделения поверхностей, на которой БЭМЗ составляет от 0,2 до 1,5–4,0 мм. При этом в разрядах расходуется заряд 25–35 мкКл/м². При минимальном заряде зажигания в импульсном разряде 0,012–0,070 мкКл [3, 5] для зажигания оказывается достаточен разряд с площади $3 \cdot 10^{-4}$ – $3 \cdot 10^{-3}$ м².

Таким образом, при схеме электризации, представленной на рис. 1, может оказаться, что основная опасность зажигания может проявляться непосредственно в процессе электризации, а последующее сближение заряженной поверхности с пробником зажигания уже не будет нести информацию о реальной опасности. Тем более такая особенность может проявляться при подготовке испытуемого образца изделия или материала к испытанию на пожарную опасность путем предварительной электризации, например трением скольжения. Поэтому в особо ответственных случаях следует проводить стендовые и опытные натурные испытания оборудования, процессов и аппаратов, а также испытания на представительных взрывоопасных средах по аналогии с испытанием взрывозащищенного электрооборудования.

График зависимости плотности тока электризации $j_{\text{пр}}$ от параметра δ приведен на рис. 4. С увеличением разрядного промежутка от 0,06 до 10 мм плотность тока электризации уменьшается согласно зависимости

$$j_{\text{пр}} = 2,56 \cdot 10^{-5} \delta^{-0,274}. \quad (4)$$

Параметр δ на рис. 4 и в формуле (4) по физическому смыслу может быть толщиной пограничного

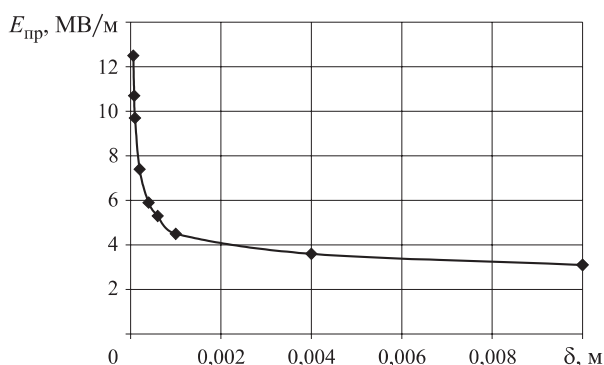


Рис. 2. Зависимость напряженности поля $E_{\text{пр}}$ от толщины слоя воздуха δ между плоскопараллельными электродами при нормальных условиях

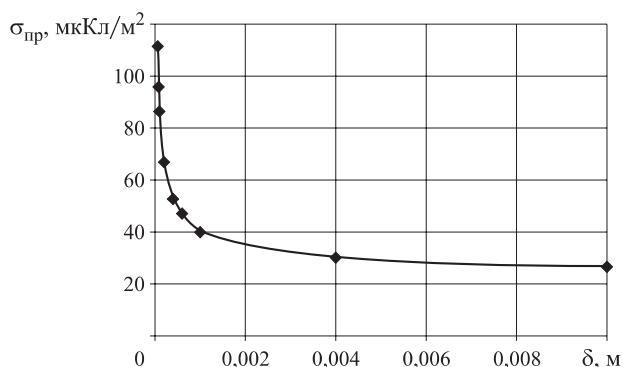


Рис. 3. Зависимость предельной поверхностной плотности зарядов $\sigma_{\text{пр}}$ от толщины пограничного слоя воздуха δ при нормальных условиях

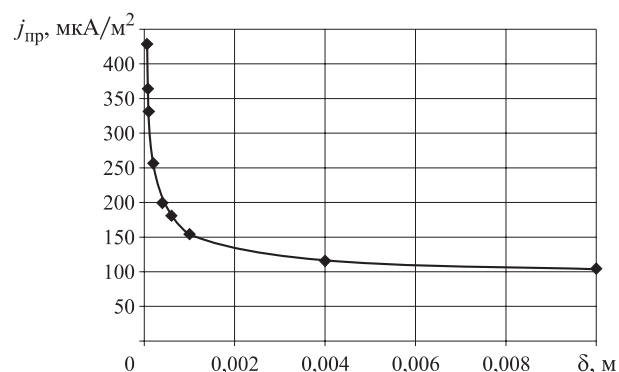


Рис. 4. Зависимость предельной плотности тока электризации $j_{\text{пр}}$ от толщины пограничного слоя воздуха δ при нормальных условиях

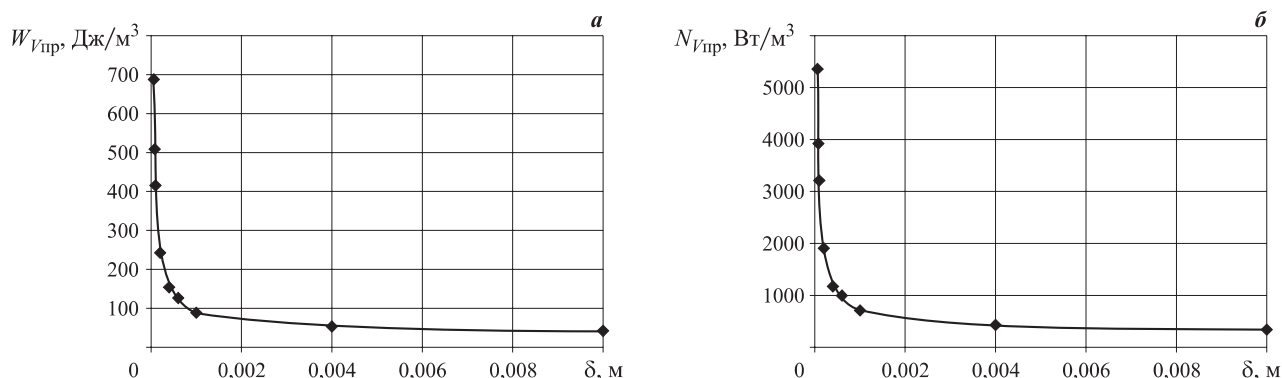


Рис. 5. Зависимость объемной плотности энергии $W_{впр}$ (а) и мощности $N_{впр}$ (б) от толщины пограничного слоя воздуха δ при нормальных условиях

слоя в процессе электризации, который разделяет уносимый поток электростатического заряда и тем самым соответствует как плотности тока электризации потока, так и плотности тока электризуемой потоком стенки. Это одна и та же величина. Плотность тока — величина векторная, а контур тока замкнут.

Зависимости, представленные в таблице, на рис. 4 и формулой (4), целесообразно учитывать при выборе моделей создания электростатических нагрузок в процессах электризации, например, в целях оценки пожарной опасности этих процессов.

Подтверждается практичность применения соотношения (1) в аспекте принятия стандартного значения $j_{пр} = 100 \text{ мкА/м}^2$ при моделировании электростатических нагрузок при испытании материалов и изделий [5].

Обычно одновременно проявляется и ток электризации, и ток обратного разряда. Ток электризации самолета и ток специальных коронирующих устройств (аналогов заземлителей), обеспечивающих утечку зарядов с него в окружающее пространство, существуют одновременно. То же наблюдается и при действии углекислотных огнетушителей. При сверхзвуковом выбросе снегообразной массы углекислоты измеряемый ток электризации корпуса огнетушителя достигает 100 мкА. Это на несколько порядков больше, чем ток электризации потоков жидкостей или сыпучих материалов в обычных промышленных установках. Однако применение коронирующего острия на выпускном устройстве позволяет снизить ток электризации корпуса огнетушителя в десят-

ки раз. Процесс электризации потока и его обратное разряжение в пограничном слое протекают одновременно.

Зависимости $W_{впр} = f(\delta)$ и $N_{впр} = f(\delta)$ функционально выражаются формулами

$$W_{впр} = 2,45\delta^{-0,548}, \quad (5)$$

$$N_{впр} = 19,2\delta^{-0,548} \quad (6)$$

и графиками, представленными на рис. 5.

Выводы

Выполненный анализ показал, что в процессах электризации, характерных для производственной и бытовой практики, в основном проявляются электропрочностные свойства воздуха, выраженные параметрами: $E_{пр} = 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$; $\sigma_{пр} = 26,4 \text{ мкКл/м}^2$; $j_{пр} = 100 \text{ мкА/м}^2$; $W_{впр} = 40 \text{ Дж/м}^3$; $N_{впр} = 300 \text{ Вт/м}^3$.

Однако при разработке материалов, изделий, аппаратов и оборудования, предназначенных для применения во взрывоопасных средах, необходимо учитывать, что основная опасность может проявляться прежде всего непосредственно в процессах электризации, в пограничном слое, соизмеримом с оптимальными критическими расстояниями зажигания.

При этом постановку такой продукции на производство следует осуществлять в порядке, установленном для электрооборудования, по результатам проведения натурных испытаний и опытной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC/TR 61340-1. Edition 1.0 (2012–06–26). Electrostatics — Part 1: Electrostatic phenomena — Principles and measurements. URL : <http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/artnum/046596!open-document> (дата обращения: 20.12.2013 г.).
2. ГОСТ 12.1.018–79*. ССБТ. Статическое электричество. Искробезопасность. Общие требования. — Введ. 01.07.80 г. — М. : Издательство стандартов, 1979.

3. Верёвкин В. Н., Смелков Г. И., Черкасов В. Н. Электростатическая искробезопасность и молниезащита. — М. : МИЭЭ, 2006. — 170 с.
4. Сканава Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). — М. : Физматгиз, 1958.
5. ГОСТ 31613–2012. Электростатическая искробезопасность. Общие технические требования и методы испытания. — Введ. 05.02.2013 г. URL : <http://protect.gost.ru/document.aspx> (дата обращения: 20.12.2013 г.).

Материал поступил в редакцию 31 января 2014 г.

English

ELECTRIC STRENGTH OF DIELECTRICS AND THE LIMITING PARAMETERS OF PROCESSES OF ELECTRIZATION

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

MARKOV A. G., Senior Lecturer of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: markov01@yandex.ru)

ABSTRACT

The generalized description of processes of an electrization, including in processes, devices and the equipment of some manufactures is presented. Processes of an electrization occurring at the enterprises with air lift application are described. The question of need of certification of materials and processing equipment for the purpose of ensuring safe application of the nonmetallic constructional materials which operation, sometimes restrains not proved caution in connection with poor study of dangerous consequences of their electrization is considered. The data characterizing electrostrength properties of air, and the limiting values of parameters of processes of an electrization corresponding to them depending on parameters of a boundary air bed are provided. The graphic and formular dependences displaying the experimental dependences of parameters of an electrization from electrode separation are presented.

Possibility of application of data characterizing the limiting parameters of an electrization of air is shown in normative documents aimed at providing fire safety of technological processes in explosive environments.

Keywords: electrification; static electricity; electrical strength; spark safety; electrostatic; spark; electrode; insulator.

REFERENCES

1. IEC/TR 61340-1. Edition 1.0 (2012–06–26). *Electrostatics — Part 1: Electrostatic phenomena — Principles and measurements*. Available at: <http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/artnum/046596!opendocument> (Accessed 20 December 2013).
2. *State Standard 12.1.018–79*. Static electricity. Spark safety. General requirements*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1979 (in Russian).
3. Verevkin V. N., Smelkov G. I., Cherkasov V. N. *Elektrostaticheskaya iskrobepaznost i molniyezashchita* [Electrostatic spark safety and lightning protection]. Moscow, MIEE Publ., 2006. 170 p.
4. Skanavi G. I. *Fizika dielektrikov (oblast silnykh poley)* [Physics of dielectrics (area the strong water)]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1958.
5. Interstate Standard 31613–2012. Static electricity spark safety. General technical requirements and test methods. Available at: <http://protect.gost.ru/document.aspx> (Accessed 20 December 2013) (in Russian).

В. П. НАЗАРОВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4; e-mail: npbtp@bk.ru)

А. А. КИРШЕВ, преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4; e-mail: Kirschew@yandex.ru)

УДК 621.642.033.004.55

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЯЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ С НЕФТЕПРОДУКТАМИ

Проведен анализ статистических данных по пожарам на резервуарах нефтегазового комплекса. Дана оценка эффективности исследуемых способов вентилирования резервуаров перед проведением на них огневых и ремонтных работ. С учетом экспериментальных данных предложено математическое описание и инженерные методы расчета процесса испарения исследуемых жидкостей при подготовке резервуаров нефтегазового комплекса к ремонту путем принудительной вентиляции воздухом горючих газов в их внутреннем пространстве.

Ключевые слова: пожарная опасность; очистка; ремонтные работы; огневые работы; резервуар; вентиляция.

Техническое перевооружение и реконструкция промышленных предприятий практически всегда связаны с проведением ремонта, антикоррозийной защиты и огневых работ на резервуарах.

С каждым годом количество аварий на резервуарах возрастает. Основной причиной роста является то, что большой процент резервуаров уже выработал свой проектный ресурс. Износ эксплуатируемых вертикальных стальных резервуаров (РВС) согласно [1] составляет 60–80 %.

Основными причинами выхода из строя стальных резервуаров являются [2]:

- коррозия корпуса резервуаров;
- повышение давления или образование вакуума в газовом пространстве резервуара сверх допустимых величин;
- склонность основного материала корпуса резервуара, сваренного из “кипящей” стали, к хрупкому разрушению в условиях резкого перепада температур хранимого продукта и окружающего воздуха в районах с низкой температурой и сильными ветрами;
- неравномерная осадка резервуаров в процессе эксплуатации, особенно в районах с неустойчивыми грунтами;
- образование концентраций напряжений, особенно опасных, в нижнем поясе и его сопряжение с днищем резервуара.

Выполнен анализ пожаров, происшедших на резервуарах с 2001 по 2012 гг. За этот период на территории России зарегистрирован 61 пожар (рис. 1) на резервуарах, из них около 90 % — на резервуарах, заполненных сырой нефтью и бензином.

Данные рис. 1 позволяют сделать вывод о сохранении достаточно напряженной обстановки с пожарами резервуаров и резервуарных парков.

Основные причины пожаров на резервуарах по данным статистики представлены на рис. 2.

Очистка резервуаров от остатков нефтепродуктов при подготовке к огневым работам является

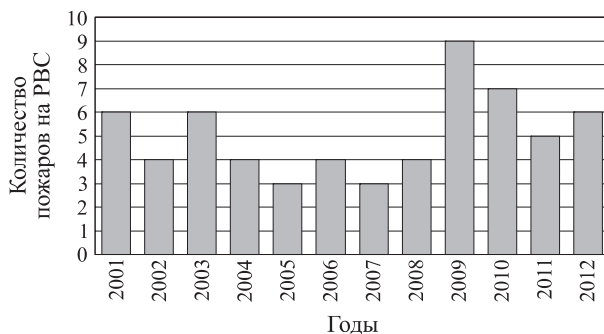


Рис. 1. Количество пожаров на резервуарах за период 2001–2012 гг.

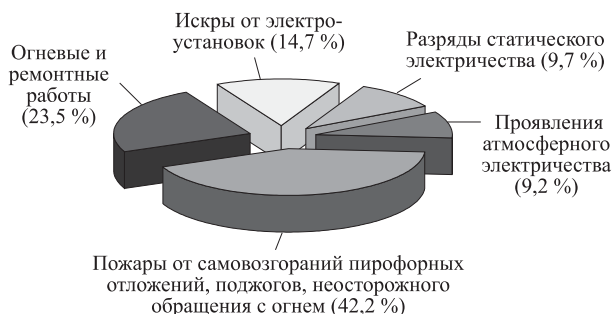


Рис. 2. Распределение пожаров на резервуарах по причинам их возникновения

сложной и пожаровзрывоопасной технологической операций. В настоящее время на практике широко распространена очистка резервуаров методом принудительной вентиляции. Результаты, посвященные исследованию пожаровзрывоопасности резервуаров с остатками нефтепродуктов в процессе их вентиляции, были представлены ранее в трудах В. П. Назарова, В. В. Рубцова, В. П. Сорокоумова и др.

Анализ способов подготовки резервуаров к огневым и ремонтным работам показал необходимость исследования новых способов принудительной вентиляции резервуаров и проведения научных исследований с использованием современных средств

измерения на применяемых в настоящее время и новых видах топлива.

С этой целью проведен ряд экспериментов по принудительной вентиляции резервуаров с остатками нефтепродуктов воздухом в экспериментальном резервуаре (ЭР) и на экспериментальном полупромышленном стенде (ЭПС) [3, 4]. Экспериментальные исследования процессов массообмена при вентиляции внутреннего пространства ЭР и ЭПС проводились при постоянной производительности вентилятора по следующим схемам подачи приточного воздуха: № 1 — инновационным способом (рис. 3,а); № 2 — “навстречу” (рис. 3,б); № 3 —

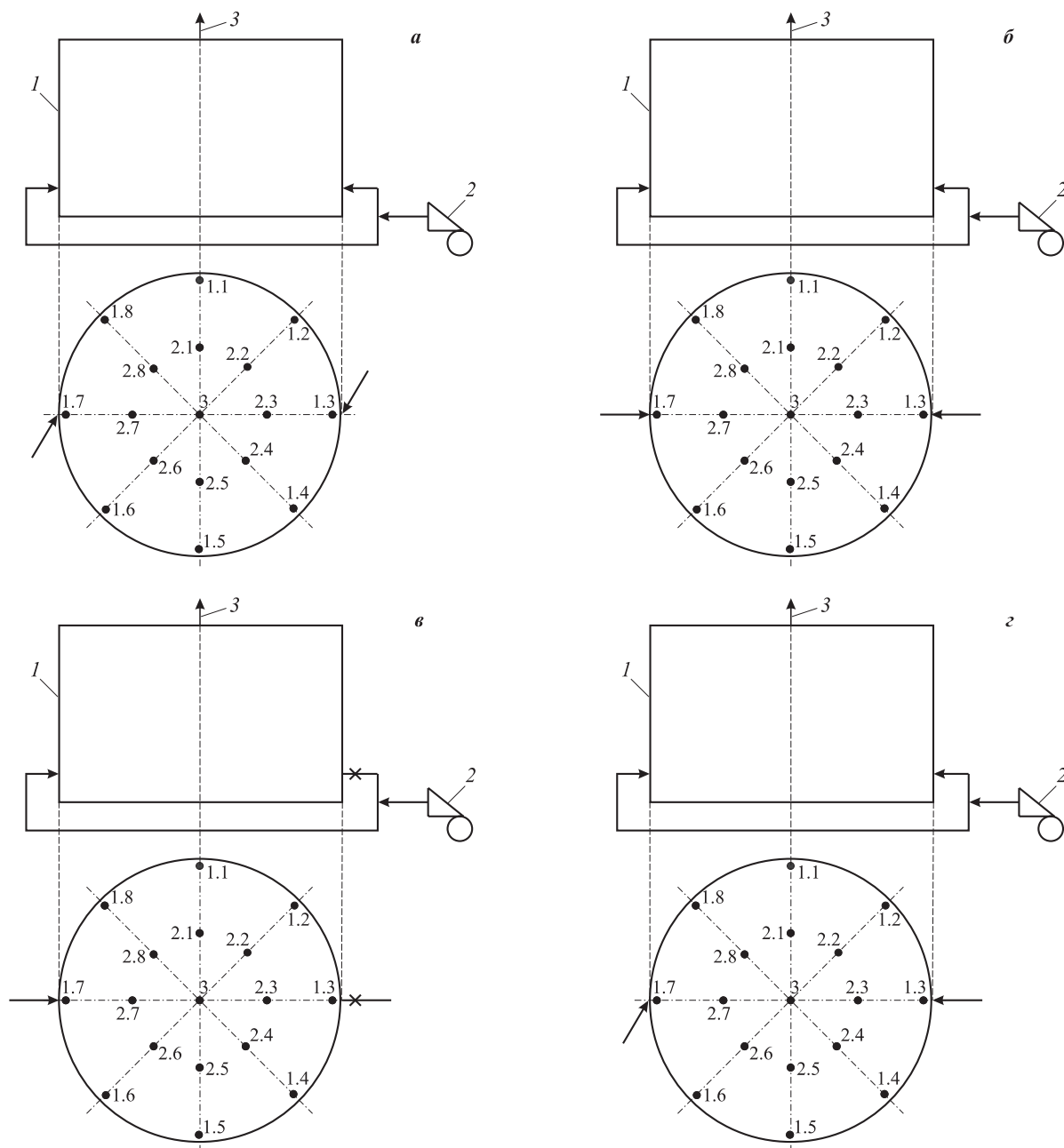


Рис. 3. Схемы подачи приточного воздуха во внутреннее пространство резервуара: 1 — резервуар; 2 — вентилятор; 3 — линия удаления паров; 1.1–1.8, 2.1–2.8, 3 — точки измерений подвижности воздуха и потери массы жидкостями

традиционным способом (рис. 3,б); № 4 — смешанным способом (рис. 3,з).

В процессе обработки результатов экспериментов установлены закономерности изменения различных гидродинамических условий, таких как: концентрация, плотность потока массы, подвижность подаваемого воздуха внутри резервуара и мощность выброса при вентиляции резервуара.

На основании экспериментально-теоретического исследования разработаны инженерные методы расчета интенсивности испарения нефтепродуктов в пространстве резервуара.

Средняя теоретическая подвижность воздуха ω (м/с) во внутреннем пространстве резервуара определялась по формуле [5]:

$$\omega = 0,7 \varepsilon_n^{1/3} (V/F_o), \quad (1)$$

где ε_n — энергия приточной струи, $\text{м}^2/\text{с}^3$;

$$\varepsilon_n = f_n \vartheta_n^3 / (2V); \quad (2)$$

f_n — площадь приточного отверстия, м^2 ;

$$f_n = 0,785 d_{\text{пр.от}}^2; \quad (3)$$

$d_{\text{пр.от}}$ — диаметр приточного отверстия, м;

ϑ_n — скорость подачи воздуха в приточное отверстие, м/с;

V — объем резервуара, м^3 ;

F_o — общая площадь поверхности резервуара, м^2 .

Результаты расчета и экспериментальные значения средней подвижности воздуха при исследуемых способах подачи приточных струй во внутреннее пространство резервуара приведены в табл. 1.

Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей изменения относительной плотности потока массы в плоскости вентилирования экспериментального резервуара, ограниченной точками измерения 1.3, 2.3, 3, 2.7 и 1.7 (плоскость вентилирования № 3), при организации схемы вентиляции инновационным способом по однокомпонентной жидкости — толуолу представлены на рис. 4, традиционным — на рис. 5.

Установлено, что изменение схемы подачи приточного воздуха во внутреннее пространство резервуара при практически одинаковой подвижности воз-

духа в нем, за исключением схемы № 1 (см. табл. 1), оказывает незначительное влияние на интенсивность испарения нефтепродуктов [3, 4].

В результате анализа теоретических разработок и экспериментальных опытов получена эмпирическая формула по определению интенсивности испарения при использовании исследуемых способов подачи приточного воздуха. Данная формула имеет вид:

$$M = A_0 \pi_p \left(\frac{\rho \nu F_o}{V} \right) \text{Re}^{0,8} \theta^2 \text{Pr}_d \pi_d \mu^{0,5}, \quad (4)$$

где A_0 — коэффициент эффективности схемы вентиляции;

π_p — число, учитывающее поперечный поток массы;

$$\pi_p = j l / (\rho \nu); \quad (5)$$

j — плотность потока массы, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$;

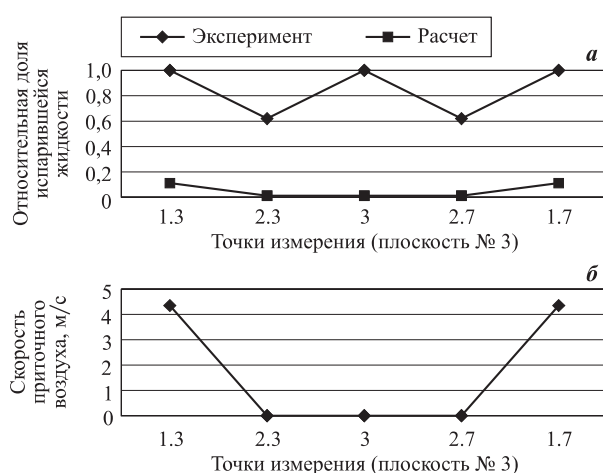


Рис. 4. Изменение потери массы толуола (а) и скорости приточного воздуха (б) в зависимости от подвижности воздуха над поверхностью испарения в экспериментальном резервуаре при подаче приточного воздуха инновационным способом

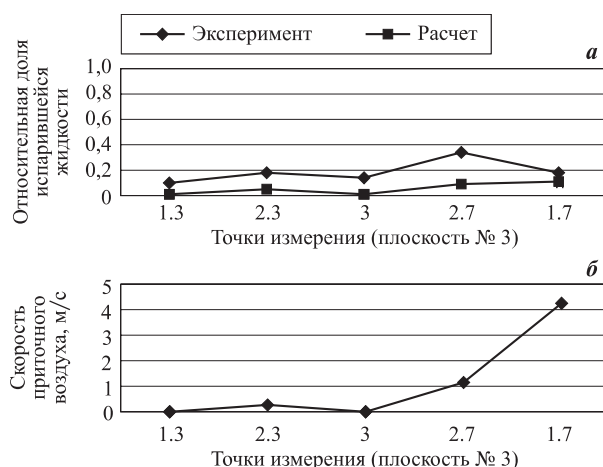


Рис. 5. Изменение потери массы толуола (а) и скорости приточного воздуха (б) в зависимости от подвижности воздуха над поверхностью испарения в экспериментальном резервуаре при подаче приточного воздуха традиционным способом

Таблица 1. Значения средних скоростей воздуха во внутреннем пространстве резервуаров

Схема подачи струи приточного воздуха	ЭР		ЭПС	
	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
№ 1	0,55	2,9	0,23	0,88
№ 2	0,60	3,5	0,21	0,70
№ 3	0,50	2,7	0,11	0,42
№ 4	0,57	3,0	0,22	0,74

l — характерный линейный размер, м;

$$l = V/F_0; \quad (6)$$

ρ — плотность воздуха, кг/м³;

ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

$$\nu = [14,7 + 0,09(T_B - 283)] \cdot 10^{-6}; \quad (7)$$

T_B — температура окружающего воздуха, К;

Re — аналог числа Рейнольдса;

$$Re = \omega l / \nu; \quad (8)$$

θ — температурный фактор;

Pr_d — число Прандтля диффузионное;

$$Pr_d = \nu / D_i; \quad (9)$$

D_i — коэффициент диффузии, м²/с;

π_d — параметрическое число парциального давления;

μ — относительная молекулярная масса нефтепродукта.

Коэффициент диффузии пара или газа в воздухе при рабочей температуре определяют по формуле

$$D_i = D_0 (T_B / 273)^n, \quad (10)$$

где D_0 — значение коэффициента диффузии, приведенное в справочной литературе, м²/с;

n — показатель степени, принимаемый по справочной литературе; $n = 2$.

Температурный фактор определяется по формуле

$$\theta = T_{\text{пов.исп}} / T_{\text{окр.ср}}, \quad (11)$$

где $T_{\text{пов.исп}}$ — температура поверхности испарения нефтепродукта, К;

$T_{\text{окр.ср}}$ — температура окружающей среды, К.

Параметрическое число парциального давления

$$\pi_d = P_s / P_0, \quad (12)$$

где P_s — давление насыщенного пара, Па;

P_0 — абсолютное давление в газовом пространстве резервуара, Па.

Относительная молекулярная масса нефтепродукта вычисляется по выражению

$$\mu = 1,55 + 0,0207(T_{\text{н.к}} - 293), \quad (13)$$

где $T_{\text{н.к}}$ — температура начала кипения жидкости, К.

Коэффициент эффективности схемы вентиляции A_0 в формуле интенсивности испарения (4), как эффективность вентиляции исследуемых схем подачи приточного воздуха, характеризуется отношением экспериментальной интенсивности испарения при исследуемом способе к интенсивности испарения при традиционном способе:

$$A_0 = W_{\text{э(схем)}} / W_{\text{э(трад)}}, \quad (14)$$

где $W_{\text{э(схем)}}$ — экспериментальная интенсивность испарения исследуемой схемы подачи приточного воздуха, кг/(м²·с);

Таблица 2. Значения коэффициента эффективности A_0 для исследуемых жидкостей

Способ подачи воздуха	Коэффициент эффективности			
	Вода	ДТ (евро)	АИ-92/95 (евро)	Толуол
№ 1	4,00	4,00	2,52	6,36
№ 2	0,50	0,50	1,40	2,90
№ 3	1,00	1,00	1,00	1,00
№ 4	0,50	0,50	1,36	1,36

$W_{\text{э(трад)}}$ — экспериментальная интенсивность испарения при традиционном способе подачи приточного воздуха, кг/(м²·с).

Основным критерием эффективности рассматриваемого метода подготовки резервуаров к огненным и ремонтным работам является время вентиляции. Продолжительность вентиляции зависит от подачи вентилятора, температуры приточного воздуха, площади поверхности испарения, вида нефтепродукта и схемы подачи приточного воздуха во внутреннее пространство резервуара.

Количественным критерием для сравнения различных схем подачи воздуха принят коэффициент эффективности, который для схемы подачи воздуха № 3 (традиционный способ) равен 1. При уменьшении времени испарения остатков нефтесодержащих жидкостей в исследуемых схемах вентиляции коэффициент эффективности увеличивается по сравнению со схемой № 3.

Результаты расчета коэффициента эффективности A_0 для формулы интенсивности испарения (4) для каждой схемы подачи приточного воздуха представлены в табл. 2.

При вентиляции газового пространства внутри резервуара можно использовать способы подачи приточного воздуха, приведенные в данной статье. Однако их эффективность оценивается путем сравнения значений среднеобъемных потерь массы жидкостями при одинаковой подаче вентилятором приточного воздуха, а также по материальным затратам.

На основании полученных данных по оценке эффективности исследуемых способов подготовки резервуаров нефтегазового комплекса к ремонту путем принудительной вентиляции можно сделать вывод, что наиболее интенсивно процессы испарения протекают при организации воздухообмена по схеме № 1. На данный способ от 04.03.2014 г. получено решение Федеральной службы по интеллектуальной собственности о выдаче патента на изобретение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В. П. Обеспечение пожаровзрывобезопасности при ликвидации аварий и ЧС на объектах транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов // Актуальные проблемы пожарной безопасности : матер. XXI Междунар. науч.-практ. конф. — М. : ВНИИПО, 2009. — Ч. 1. — С. 166–169.
2. Волков О. М., Назаров В. П., Шатров Н. Ф., Шухатович А. Д. Исследование процесса вентиляции резервуаров с остатками нефтепродукта // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья: сб. научн. тр. — М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1980. — № 2. — С. 9–12.
3. Киришев А. А. Результаты сравнительных экспериментальных исследований способов вентиляции вертикальных цилиндрических резервуаров перед ремонтными работами // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2013. — С. 38–41.
4. Киришев А. А. Разработка экспериментального стенда для оценки интенсивности испарения углеводородных жидкостей // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 12. — С. 38–42.
5. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. — М. : Химия, 1971. — 238 с.

Материал поступил в редакцию 18 апреля 2014 г.

English

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF VENTILATION IN TANKS WITH OIL-PRODUCTS

NAZAROV V. P., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Fire Safety of Technological Processes Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: npbtp@bk.ru)

KIRSHEV A. A., Lecturer of the Fire Safety of Technological Processes Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: Kirschew@yandex.ru)

ABSTRACT

Technical modernization and reconstruction of industrial enterprises are fast always connected with performance of repair works, anti-rusting coating and performance of hot works on tanks.

Each year the quantity of accidents on tanks increases. The main reason for such growth is the fact, that large percentage of the tanks is overaged. The aging of the operated upright steel tanks amounts to 60–80 %.

This article set out the main reasons for breakdown of the steel tanks. The fires, happened in tanks from 2001 to 2012, and their courses have been analyzed. Cleaning of the tanks from oil residues at preparation for hot works is a complex and explosion/fire hazardous process step. In the present time, as a matter of practice, cleaning of the tanks by means of forced ventilation is widely spread.

The article is devoted to efficiency improvement of ventilation in the tanks with oil-products. In order to find and study new ways of cleaning (degassing) of the tanks with oil residues, a number of experiments for forced ventilation with air of combustible gases in an experimental tank and experimental pilot stand. Experimental researches of the mass exchanging processes at ventilation inside the experimental tank and experimental stand were carried out under conditions of fixed capacity of the ventilator according to the following inlet-air circuits: no. 1 — air-stream feed “innovative”; no. 2 — air-stream feed “counterflowing”; no. 3 — air-stream feed “traditional”; no. 4 — air feed “mixed”.

In the course of processing of the outcomes of the experiments the following common factors of changes in various hydrodynamic conditions have been recognized: concentration, mass flow density, supply-air motion inside the tank and emission rate at ventilation of the tank.

Basing on the experimental-theoretical research engineering approaches for estimation of evaporation rate of oil-products at the bottom of the ventilated tank were developed.

The main efficiency criterion of the considered approach for preparation of the tanks for hot works is ventilation time. The duration of ventilation depends on ventilator capacity, temperature of the incoming air, evaporation surface, type of oil product and method of incoming-air feed to the inside of the tank.

Efficiency ratio is taken as the quantitative value for comparison of different inlet-air circuits.

On the basis of the resulting data concerning efficiency estimation of the investigated approaches for preparation of the oil-and-gas complex tanks for repair, by means of forced ventilation, it may be concluded, that most intensively evaporation progresses at organization of air exchange according to circuit no. 1. For this approach on 04.03.2014 the decision on grant was obtained at the Federal Service for Intellectual Property (Rospatent).

The article presents estimation and efficiency ratio is determined in the estimation formula of the evaporation rate.

Keywords: fire danger; cleaning; repair work; hot work; tank; ventilation.

REFERENCES

1. Nazarov V. P. Obespecheniye pozharovzryvbezopasnosti pri likvidatsii avari i ChS na ob'yektakh transporta i khraneniya nefi i nefteproduktov [Securing fire and explosion safety during breakdown and emergencies elimination at oil storage and oil transportation facilities]. *Aktualnyye problemy pozharnoy bezopasnosti : materialy XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Acute problems of fire safety: Proceedings of XXI International Scientific Conference]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2009, part 1, pp. 166–169.
2. Volkov O. M., Nazarov V. P., Shatrov N. F., Shukhatovich A. D. Issledovaniye protsessa ventilyatsii rezervuarov s ostatkami nefteprodukta [Research of the ventilation process of the tanks with oil residues]. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syrya: sb. nauchn. tr.* [Transport and storage of the oil products and raw hydrocarbons. Collection of research papers]. Moscow, Central Research Institute of Information and Feasibility Studies in Oil-Refining and Petrochemical Industry Publ., 1980, no. 2, pp. 9–12.
3. Kirshev A. A. Rezultaty sravnitelnykh eksperimentalnykh issledovaniy sposobov ventilyatsii vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov pered remontnymi rabotami [Results of the comparative experimental studies of ventilation methods in the upright cylindrical tanks before repair works]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya* [Fires and emergencies: prevention, elimination]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2013, pp. 38–41.
4. Kirshev A. A. Razrabotka eksperimentalnogo stenda dlya otsenki intensivnosti ispareniya uglevodorodnykh zhidkostey [Development of an experimental stand to estimate the evaporation rate of hydrocarbon liquids summary]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 38–42.
5. Elterman V. M. *Ventilyatsiya khimicheskikh proizvodstv* [Ventilation in chemical industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 238 p.

А. А. КОМАРОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры гидравлики, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

Г. В. ВАСЮКОВ, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры процессов горения, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129301, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4; e-mail: gl-v@yandex.ru)

Р. А. ЗАГУМЕННИКОВ, адъюнкт, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129301, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4)

Е. В. БУЗАЕВ, аспирант, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

УДК 614.835.4

ВЗРЫВ ГАЗА НА ГАЗОНАПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ В ПОСЕЛКЕ ЧАГОДА. ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ

Проведен анализ явлений, которые привели к взрыву и гибели людей, на примере взрыва газа на газонаполнительной станции в пос. Чагода Вологодской обл. Проведена оценка последствий взрыва, восстановлена приблизительная физическая картина происшедших явлений. Сделан вывод о необходимости совершенствования расчетных методик для оценки величины избыточного давления при взрывах газозавоздушных смесей.

Ключевые слова: утечка газа; взрыв; взрывоопасное облако; газонаполнительная станция; дефлаграционное горение.

Горючие газы давно используются как в промышленности, так и в быту. Они являются удобным источником энергии, а также ценным сырьем для химической промышленности. Однако, наряду с полезными свойствами, горючие газы несут и массу проблем, связанных с их высокой пожарной опасностью. Так, каждый год в нашей стране происходят аварии, связанные со взрывами горючих газов, как на промышленных объектах, так и в жилом секторе. Наиболее распространенными горючими газами являются природный газ и пропан-бутан. Они обладают различными физическими свойствами, из них важное значение имеет плотность (природный газ в 1,8 раз легче воздуха, а пропан-бутан в 1,6 раза тяжелее воздуха), что вносит некоторые особенности в механизм возникновения аварийных ситуаций. Однако наиболее тяжелые последствия аварий в зданиях, где обращаются эти газы, возникают по одинаковому сценарию: происходит утечка газа, вследствие чего формируется взрывоопасное газозавоздушное облако, которое при появлении источника зажигания воспламеняется и сгорает с ростом избыточного давления. Следует отметить, что наиболее часто причиной аварийных ситуаций становится “человеческий фактор”.

Одним из ярких примеров аварий, возникших по этой причине, является взрыв, происшедший 7 февраля 2014 г. в 07:15 утра на газонаполнительной станции в пос. Чагода Вологодской обл. Ситуационный план объекта представлен на рис. 1.

В 07:18 к месту вызова прибыл первый руководитель тушения пожара (РТП-1). Им было обнаружено полностью разрушенное здание административного корпуса ООО “НоваКомПКСВ” (рис. 2). Разрушенное здание одноэтажное, прямоугольной формы имело следующие характеристики: общая высота 4,2 м, размеры в плане 13×30,5 м, высота до потолка 3,9 м, степень огнестойкости II, стены и перегородки кирпичные, перекрытия — плиты железобетонные, покрытие шиферное по деревянной обрешетке. Модель административного корпуса представлена на рис. 3.



Рис. 1. Ситуационный план объекта: 1, 2, 3 — места нахождения пострадавших после взрыва



Рис. 2. Здание административного корпуса ООО «НоваКомПСВ» после аварии

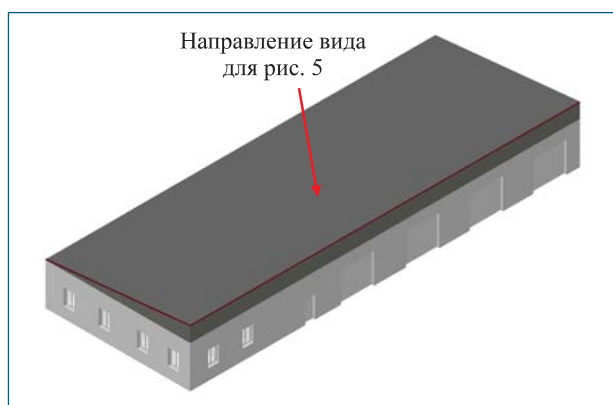


Рис. 3. Модель здания административного корпуса ООО «НоваКомПСВ»

В результате взрыва административного здания стены обрушились наружу, железобетонные перекрытия рухнули вниз, накрыв собой хранившуюся в боксах технику. Доски и их части разлетелись на сотни метров. В зданиях, расположенных в радиусе нескольких сотен метров, было разрушено остекление.

Вследствие взрыва под завалами здания оказались двое пострадавших. Один из них находился в сознании и дал информацию о том, что на момент взрыва с ними был еще один человек. Со слов пострадавшего, все трое зашли в бокс, после чего сразу почувствовали специфический запах пропан-бутана. Двое из них (поз. 1 и 2 рис. 4) решили открыть ворота и проветрить помещение, один (поз. 3 рис. 4), находясь в дверном проеме, нажал выключатель света, в результате чего и произошло воспламенение газозвоздушной смеси. Впоследствии его нашли мертвым на расстоянии более 20 м от разрушенного здания в районе стальных ограждений. Модели и алгоритмы поиска людей под завалами описаны в работе [1].

На месте разрушенного здания была обнаружена автоцистерна АЦТ-8(130) для транспортировки

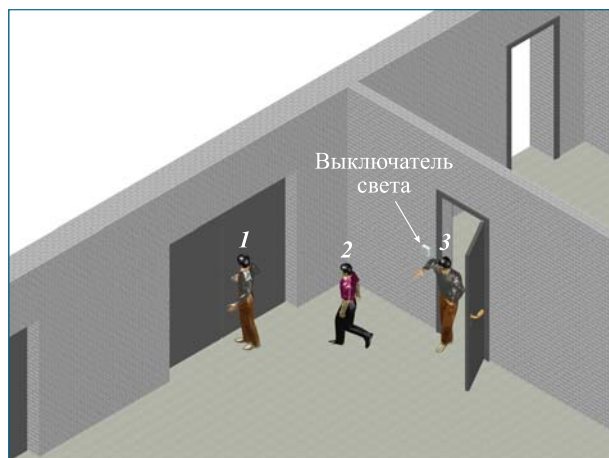


Рис. 4. Схема расположения людей в момент взрыва



Рис. 5. АЦТ-8(130) после аварии (вид слева)

сжиженного пропан-бутана (рис. 5), из фланца на заднем торце которой был виден факел исходящего газа. Отсюда был сделан вывод, что причиной взрыва стала утечка пропан-бутана из автоцистерны. Об этом свидетельствовал факел пламени газа, утечка которого продолжалась и после взрыва. Взрыв произошел утром, а цистерна была поставлена в гаражный бокс накануне, около восьми часов вечера. Таким образом, утечка газа в бокс продолжалась около 11 ч. Проведем анализ аварийной ситуации и определим основные параметры взрыва, которые привели к гибели человека и разрушению всего здания.

Основным показателем, характеризующим разрушения при сгорании газозвоздушных облаков, является избыточное давление. Существует несколько способов для расчета давления взрыва. Предпочтительной для данного случая является методика, разработанная специалистами МГСУ [2–4], которая основана на ранее проведенных исследованиях [5] и наиболее полно учитывает физические явления, протекающие в процессе дефлаграционного горения:

$$\frac{dP}{dt} = \left[\alpha S(t)(\varepsilon - 1)U_n - \mu \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_j}} S_{\text{пр}} f(t, \Delta P) \right] \times [V_1/\gamma_1 + V_2/\gamma_2]^{-1} P(t), \quad (1)$$

где α — коэффициент интенсификации процесса горения;

$S(t)$ — текущее значение площади поверхности фронта пламени;

ε — степень расширения смеси при сгорании;

U_n — нормальная скорость распространения пламени;

μ — коэффициент расхода истекающих через сбросной проем газов;

ΔP — избыточное давление;

ρ_j — плотность холодной газовой смеси (ρ_1) или продуктов сгорания (ρ_2);

$S_{\text{пр}}$ — суммарная площадь сбросных проемов;

$f(t, \Delta P)$ — функциональная зависимость вскрытия предохранительных конструкций;

V_1, V_2 — текущий объем соответственно холодной смеси или продуктов сгорания;

γ_1, γ_2 — показатель адиабаты соответственно холодной смеси или продуктов сгорания;

$P(t)$ — текущее значение давления.

По опыту последствий аварий в зданиях, связанных с воспламенением газовой смеси, известно, что разрушение происходит при относительно малой величине избыточного давления. Двери в аварийном помещении открыты с момента воспламенения. Как известно, оконные проемы разрушаются при низком давлении, немногим больше 1 кПа, поэтому принимаем, что заполнение оконных проемов отсутствует. Тогда выражение (1) можно упростить, приняв равными объемы образующихся в процессе сгорания смеси продуктов сгорания и истекающих через сбросные проемы газов:

$$\alpha S(t)(\varepsilon - 1)U_n = S_{\text{пр}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_1}}. \quad (2)$$

Отсюда можно выразить избыточное давление:

$$\Delta P = \frac{\rho_1}{2} \left(\frac{\alpha S(t)(\varepsilon - 1)U_n}{S_{\text{пр}}} \right)^2. \quad (3)$$

Плотность холодной газовой смеси составит $\rho_1 = 1,3 \text{ кг/м}^3$.

Степень расширения смеси ε при сгорании рассчитаем по формуле из [2]:

$$\varepsilon = 4 + 4(C_{\text{НКПР}}/C_{\text{стх}}) = 4 + 4(2/3,5) = 6,3, \quad (4)$$

где $C_{\text{НКПР}}$ — нижний концентрационный предел воспламенения горючего газа в воздухе, % об.;

$C_{\text{НКПР}} = 2 \text{ % об.}$;

$C_{\text{стх}}$ — стехиометрическая концентрация горючего газа в воздухе, % об.; $C_{\text{стх}} = 3,5 \text{ % об.}$

Нормальная скорость распространения пламени для пропан-бутан-воздушной смеси стехиометрического состава $U_n = 0,4 \text{ м/с}$.

Общая площадь проемов в аварийном помещении будет равна сумме площадей дверного и оконных проемов. Но так как через окна истекает холодная смесь, а через дверной проем — продукты сгорания, имеющие плотность в ε раз ниже по сравнению с холодной смесью, будем использовать следующее соотношение:

$$S_{\text{пр}} = \sqrt{\varepsilon} S_{\text{дв}} + \sum_{i=1}^n S_i^{\text{ок}} = \sqrt{6,3} \cdot 1,6 + 3 \cdot 1,04 = 7,14 \text{ м}^2, \quad (5)$$

где $S_{\text{дв}}$ — площадь дверного проема, м^2 ;

$S_i^{\text{ок}}$ — площадь оконного проема, м^2 .

Зная особенности распространения фронта пламени по газовой смеси в замкнутых объемах [2, 3], можно предположить, что его распространение происходило следующим образом. Фронт пламени, распространяясь от источника зажигания (выключателя), имел сначала сферическую форму. Однако по мере приближения к оконным проемам он начал вытягиваться в сторону сбросных оконных проемов, замедляя вместе с тем движение вдоль пола и потолка.

Пик давления при сохранении целостности здания возникал при прохождении фронтом пламени ближайшего оконного проема, расположенного на расстоянии 12 м от места воспламенения. В результате этого через оконный проем начали истекать продукты сгорания, плотность которых была в 6,3 раза меньше, чем у холодной смеси. Форма фронта пламени в помещении гаражного бокса представлена на рис. 6.

Площадь поверхности фронта пламени должна составить около 267 м^2 при условии, что поверхность гладкая. Однако в действительности поверхность фронта пламени имеет ячеистую структуру (рис. 7), вследствие чего произошла стихийная интенсификация его развития. Ячеистая структура фронта пла-

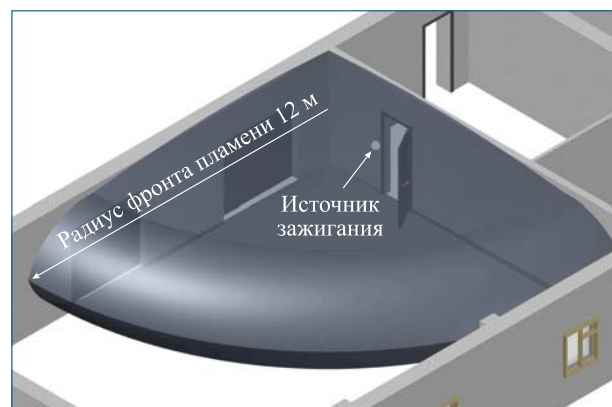


Рис. 6. Форма фронта пламени в аварийном боксе

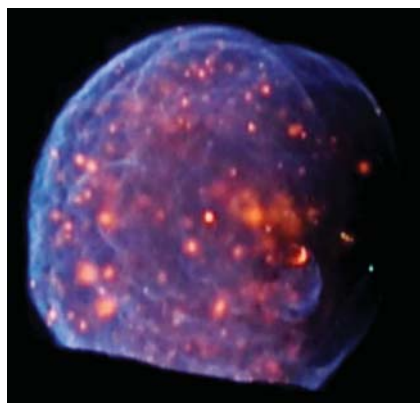


Рис. 7. Ячеистая структура фронта пламени

мени обусловила интенсификацию процесса горения, увеличив его площадь до 2 раз [2, 6]. Мы приняли коэффициент турбулизации в рассматриваемой аварийной ситуации равным среднему значению — $\alpha = 1,5$.

Подставляя вычисленные значения в выражение (3), определим избыточное давление, которое могло возникнуть при взрыве газозвушной смеси в аварийном помещении:

$$\Delta P = \frac{1,3}{2} \left(\frac{1,5 \cdot 267 \cdot (6,3 - 1) \cdot 0,4}{7,14} \right)^2 = 9,2 \text{ кПа.} \quad (6)$$

Расчет воздействия потока газов на людей

Как отмечалось ранее, в момент взрыва в помещении находилось 3 чел. В результате аварии первый пострадавший (см. рис. 1, поз. 1) получил термические ожоги 1–3-й степени рук, ног и головы, перелом правой плечевой кисти и находился в состоянии травматического шока. Второй пострадавший (см. рис. 1, поз. 2) получил закрытую черепно-мозговую травму, ушиб головного мозга, термические ожоги 1–2-й степени обеих кистей рук, ушибленную рану на височной области головы и находился без сознания. Третий пострадавший (см. рис. 1, поз. 3) получил травмы, несовместимые с жизнью.

По сведениям очевидцев на всех троих пострадавших одежда в местах неплотного прилегания к телу была сильно разорвана. Это объясняется тем, что продолжительность сгорания газозвушной смеси при ламинарном распространении фронта пламени составляет:

$$\tau = \frac{L_{\phi}}{\varepsilon U_{\text{н}}} = \frac{12}{6,3 \cdot 0,4} \approx 4,8 \text{ с,} \quad (7)$$

где L_{ϕ} — длина распространения фронта пламени от источника зажигания до ближайшего оконного проема.

При взрыве формируются мощные газодинамические потоки, которыми и вызваны такие травмы

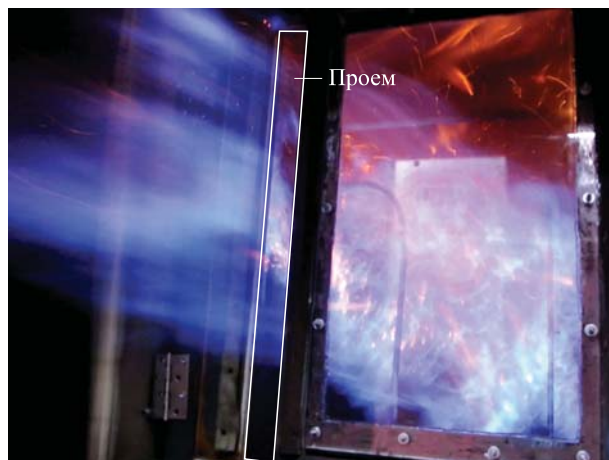


Рис. 8. Газодинамический поток, формируемый в проеме

людей [7]. Пример истечения газовых потоков через проем представлен на рис. 8.

Дверной проем располагался в непосредственной близости от выключателя света, послужившего источником зажигания, поэтому через него почти сразу начали истекать продукты сгорания. Так как расчетное избыточное давление взрыва небольшое, допустимо рассчитывать скорость истечения продуктов сгорания $V_{\text{ист}}$ (м/с) по формуле

$$V_{\text{ист}} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9200}{0,21}} \approx 296 \text{ м/с,} \quad (8)$$

где ρ_2 — плотность продуктов сгорания; $\rho_2 = \rho_1/\varepsilon = 1,3/6,3 = 0,21 \text{ кг/м}^3$.

В наибольшей степени истекающий поток газов оказывал воздействие на человека, вошедшего в помещение последним и оказавшегося фактически в дверном проеме (см. рис. 4, поз. 3). При давлении $\Delta P = 9,2 \text{ кПа}$, массе человека $m_{\text{ч}} = 80 \text{ кг}$ и площади вертикальной проекции $S_{\text{ч}} = 0,7 \text{ м}^2$ ускорение, сообщаемое потоком газов человеку, $a_{\text{ч}}$ (м/с) составит:

$$a_{\text{ч}} = \frac{\Delta P S_{\text{ч}}}{m_{\text{ч}}} = \frac{9200 \cdot 0,7}{80} \approx 80,5 \text{ м/с.} \quad (9)$$

Под действием такого скоростного потока газов человек, стоящий в дверном проеме, был вынесен из здания и, пролетев более 20 м, столкнулся со стальными ограждениями, вследствие чего и погиб.

Расчет параметров образования взрывоопасной смеси

Из представленных выше данных можно установить, что утечка газа из фланца АЦТ-8(130) продолжалась порядка $\tau_{\text{ут}} = 11 \text{ ч}$. Отсюда можно оценить величину утечки [8].

Для заполнения всего помещения пропан-бутаном до стехиометрической концентрации необходимо его количество:

$$m_{п-б,стх} = \frac{V_{пом} \varphi_{стх} \rho_{п-б}}{100} = \frac{807 \cdot 3,5 \cdot 2,4}{100} \approx 68 \text{ кг}, \quad (10)$$

где $V_{пом}$ — объем помещения гаражного бокса;

$$V_{пом} = 807 \text{ м}^3;$$

$$\rho_{п-б} \text{ — плотность пропан-бутана; } \rho_{п-б} = 2,4 \text{ кг/м}^3.$$

Так как в процессе горения продукты сгорания расширяются относительно исходной смеси, в помещении сгорает не вся смесь, а только небольшая часть ее, а остальная истекает через проемы. Поэтому такие же последствия будут и при количестве газа $m_{п-б,экв}$:

$$m_{п-б,экв} = m_{п-б,стх} / \varepsilon = 68 / 6,3 = 10,8 \text{ кг}. \quad (11)$$

После выливания жидкой фазы в АЦТ-8(130), послужившей причиной утечки газа, остался пропан-бутан в паровой фазе в количестве:

$$m_{п-б,цист} = V_{цист} \rho_{п} = 6,2 \cdot 14,035 \approx 87 \text{ кг}, \quad (12)$$

где $V_{цист}$ — полезный объем цистерны, м^3 ;

$$V_{цист} = 6,2 \text{ м}^3;$$

$\rho_{п}$ — плотность паровой фазы пропан-бутана в цистерне при рабочем давлении; $\rho_{п} = 14,035 \text{ кг/м}^3$.

Оценим величину утечки газа G (кг/с):

1) для создания стехиометрической концентрации во всем объеме гаражного бокса:

$$G_1 = \frac{m_{п-б,стх}}{3600 \tau_{ут}} = \frac{68}{3600 \cdot 11} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}; \quad (13)$$

2) для создания локального объема стехиометрической смеси, сгорание которой даст эквивалентное избыточное давление:

$$G_2 = \frac{m_{п-б,экв}}{3600 \tau_{ут}} = \frac{10,8}{3600 \cdot 11} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}. \quad (14)$$

Следовательно, диапазон утечки находится между $2,7 \cdot 10^{-4}$ и $1,7 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Так как по прибытии пожарных подразделений газ, истекающий через фланец, горел, а высота факела, со слов руководителя тушения пожара, состав-

ляла порядка 0,6 м, согласно формуле (ПЗ.71) [9] рассчитаем высоту факела пламени при этих расходах:

- при расходе $1,7 \cdot 10^{-3}$ кг/с:

$$L_{фак} = KG^{0,4} = 13,5(1,7 \cdot 10^{-3})^{0,4} \approx 1 \text{ м}; \quad (15)$$

- при расходе $2,7 \cdot 10^{-4}$ кг/с:

$$L_{фак} = KG^{0,4} = 13,5(2,7 \cdot 10^{-4})^{0,4} \approx 0,5 \text{ м}, \quad (16)$$

где K — эмпирический коэффициент, принимаемый равным 13,5 при истечении паровой фазы СУГ.

Как видно из расчетов, полученные результаты подтверждают показания очевидцев.

Рассмотренный случай аварии, связанный с утечкой и воспламенением газозовоздушной смеси, лишний раз подтверждает необходимость выполнения требований пожарной безопасности, игнорирование которых может привести к самым трагическим последствиям.

В заключение следует отметить, что существующие понятия и расчетные методики теории горения газопаровоздушных смесей позволяют с достаточной точностью прогнозировать параметры и последствия взрывов в замкнутых объемах. В то же время все существующие методики имеют ряд допущений и не в полной мере учитывают такой сложный и многофакторный процесс, как дефлаграционное горение. Например, значительные трудности возникают при определении площади фронта пламени из-за его сложной структуры, поэтому методы оценки параметров взрывов газопаровоздушных смесей требуют дальнейшего развития и совершенствования.

Таким образом, при рассмотрении данной аварии была выявлена физическая картина происходящих явлений вследствие сгорания газозовоздушной смеси в помещении. Установлены причины, повлекшие за собой такие последствия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мокшанцев А. В., Тетерин И. М., Топольский Н. Г. Модели, методы и алгоритмы поддержки принятия управленческих решений при поиске и обнаружении пострадавших под завалами, образующимися в результате чрезвычайных ситуаций, аварий, пожаров и взрывов // Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности". — 2013. — Т. 51, № 5. — С. 1. URL : <http://academy-gps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-5> (дата обращения: 05.05.2014 г.).
2. Комаров А. А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М. : МГСУ, 2001. — 36 с.
3. Казеннов В. В. Динамические процессы дефлаграционного горения во взрывоопасных зданиях и помещениях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М. : МГСУ, 1997. — 36 с.
4. Громов Н. В. Совершенствование технической системы обеспечения взрывоустойчивости зданий при взрывах газо-паровоздушных смесей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М. : МГСУ, 2007. — 25 с.

5. Bradley D., Mitcheson A. The venting of gaseous explosion in spherical vessels. I-Theory // Combustion and Flame. — 1978. — Vol. 32. — P. 221–236.
6. Lohrer C., Drame C., Schallau B., Gratz R. Propane/air deflagration and CTA measurements of turbulence inducing elements in closed pipes // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2008. — Vol. 21. — P. 1–10.
7. Catlin C. A. Scale effects on the external combustion caused by venting of a confined explosion // Combustion and Flame. — 1991. — Vol. 83, No. 3–4. — P. 399–411.
8. Васюков Г. В. Пожарная безопасность помещений хранения и технического обслуживания газобаллонных автомобилей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М. : АГПС МЧС России, 2006. — 28 с.
9. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приказ МЧС России от 10.07.2009 г. № 404; введ. 10.07.2009 г. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.

Материал поступил в редакцию 13 мая 2014 г.

English

GAS EXPLOSION AT THE GAS-FILLING STATION IN THE SETTLEMENT OF CHAGODA. CAUSES AND CONSEQUENCES

KOMAROV A. A., Doctor of Technical Sciences, Professor of Hydraulics Department, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

VASYUKOV G. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of Combustion Processes Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: gl-v@yandex.ru)

ZAGUMENNIKOV R. A., Postgraduate Student, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

BUZAEV E. V., Postgraduate Student, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

Burning gases are used in everyday life and in manufacturing. However, it should be considered, that along with beneficial properties burning gases represent a large fire hazard and may lead to the most serious emergency situations. The most common are propane-butane and natural gas. Propane-butane is 1.6 times heavier than air, natural gas is 1.8 times lighter, and it brings certain features to mechanism of forming explosive cloud during leakage.

The most common cause of explosions is human factor, when neglect of basic fire safety requirements leads to the most serious impact. An example of such an accident was the explosion at a gas-filling station in Chagoda (Vologodskiy region). During the explosion the administrative building along with a garage box was completely destroyed. Two people were injured, one died.

The reason of emergency was gas leakage occurred through the flange at one of the pipelines of transportable gas filling tank trucks, that was places in enclosed space.

Based on the analysis of the emergency situation was developed a possible scenario of an accident, defined the approximate pressure of explosion inside the garage box, that was 9.2 kPa, as well as the flow rate of combustion products in the doorway that led to the death and amounted to 296 m/s. Thus the acceleration that got the man was about 80.5 m/s.

In conclusion was noted, that considerable difficulties appear while analyzing the area of the flame, taking into account its difficult structure. That's why methods of analyzing different parameters of gas mixtures' explosion require further development and improvement of the system.

Keywords: gas leakage; explosion; explosive cloud; gas-filling station; deflagration burning.

REFERENCES

1. Mokshantsev A. V., Teterin I. M., Topolskiy N. G. Modeli, metody i algoritmy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh resheniy pri poiske i obnaruzhenii postradavshikh pod zavalami, obrazuyushchimisya v rezultate chrezvychaynykh situatsiy, avariyn, pozharov i vzryvov [Models, methods and algorithms of support of decision-making in the search and find survivors under the rubble, formed in the result of emergency situations, accidents, fires and explosions]. *Internet-zhurnal "Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti"* — *Internet Journal "Technospheric Safety Technology"*, 2013. vol. 51, no. 5. Available at: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-5> (Accessed 5 May 2014).
2. Komarov A. A. *Prognozirovaniye nagruzok ot avariynnykh deflagratsionnykh vzryvov i otsenka posledstviy ikh vozdeystviya na zdaniya i sooruzheniya: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Prediction loads against deflagration explosions accidental and impact assessment of their effects on buildings and structures. Abstracts of dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 2001. 36 p.
3. Kazennov V. V. *Dinamicheskiye protsessy deflagratsionnogo goreniya vo vzryvoopasnykh zdaniyakh i pomeshcheniyakh: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Dynamic processes deflagration burning in potentially explosive the buildings and premises. Abstracts of dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 1997. 36 p.
4. Gromov N. V. *Sovershenstvovaniye tekhnicheskoy sistemy obespecheniya vzryvoustoychivosti zdaniy pri vzryvakh gazo-parovozdushnykh smesey: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the explosion proof technical system of buildings of gas-vapor mixtures explosions. Abstracts of cand. tech. sci. diss.]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 2007. 25 p.
5. Bradley D., Mitcheson A. The venting of gaseous explosion in spherical vessels. I-Theory. *Combustion and Flame*, 1978, vol. 32, pp. 221–236.
6. Lohrer C., Drame C., Schalaus B., Gratz R. Propane/air deflagration and CTA measurements of turbulence inducing elements in closed pipes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2008, vol. 21, pp. 1–10.
7. Catlin C. A. Scale effects on the external combustion caused by venting of a confined explosion. *Combustion and Flame*, 1991, vol. 83, no. 3–4, pp. 399–411.
8. Vasyukov G. V. *Pozharnaya bezopasnost pomeshcheniy khraneniya i tekhnicheskogo obsluzhivaniya gazoballonnykh avtomobiley: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Fire safety of premises maintenance and storage gas-ballon cars. Abstracts of cand. tech. sci. diss.]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2006. 28 p.
9. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk on production objects. Order of Emercom of Russia on 10.07.2009 No. 404*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009 (in Russian).

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

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

УДК 614.84.664

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ТУШЕНИЯ ПЛАМЕНИ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПЕНОЙ НИЗКОЙ КРАТНОСТИ

Исследован процесс тушения нефтепродуктов пеной низкой кратности. Экспериментально определено время тушения пламени в широком интервале интенсивностей подачи пены. Построены зависимости времени тушения от интенсивности подачи пены. Рассмотрена зависимость основных параметров, характеризующих процесс тушения, — времени тушения пламени и удельного расхода пены на примере тушения пламени гептана углеводородным (ПО-ЗАИ) и фторсинтетическими (Гидрал, Петрофильм) пенообразователями. Показано, что характер зависимости времени тушения пламени от интенсивности подачи пены обусловлен накоплением пены на поверхности горящей жидкости и ее разрушением под действием теплового потока от пламени и из-за контакта с горючей жидкостью. Рассмотрены факторы, определяющие интенсивность термического разрушения пены. Получена формула, позволяющая проследить за изменением скорости потерь пены за счет термического разрушения под действием теплового потока от пламени. Сделан вывод, что интенсивность разрушения пены под действием теплового потока из зоны горения зависит от степени покрытия пеной горящей поверхности, вида пенообразователя, природы горючей жидкости. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных по времени тушения и удельному расходу пены в зависимости от интенсивности подачи пены.

Ключевые слова: тушение нефтепродуктов; интенсивность подачи пены; удельный расход пены; время тушения; пена низкой кратности; углеводородный пенообразователь; фторсинтетический пенообразователь.

Исследование процесса тушения пламени нефтепродуктов пеной низкой кратности проводили на экспериментальных установках, описанных в ГОСТ Р 53280.2–2010 [1] и ГОСТ Р 50588–2012 [2], в которых предусматривается использование лабораторных и полигонных методов для испытания качества и огнетушащей эффективности пенообразователей.

В отличие от методик, предусмотренных стандартами [1, 2], основным способом исследования процесса тушения пламени нефтепродуктов пеной является экспериментальное определение времени тушения пламени в широком диапазоне интенсивностей подачи водного раствора пенообразователя, а не при одном, фиксированном, расходе пены. По результатам измерений строятся графики зависимости времени тушения от интенсивности, полученные в результате обработки первичных данных по времени тушения пламени.

Форма кривых, характеризующих зависимость времени тушения пожара от интенсивности подачи, определяется соотношением процессов разрушения пены и ее подачи. Установлено, что при низких расходах пены весь ее приток уничтожается тепловым потоком от пламени и время тушения становится

бесконечно большим. В этом случае интенсивность подачи будет критической.

По мере увеличения расхода пены, которая представляет собой вязкоупругую среду, обладающую неньютоновской вязкостью [3], она поступает в резервуар, где происходит формирование ее слоя, который растекается, покрывая все большую площадь поверхности гептана.

Растекание пены может происходить послойно, при этом преодолевается сдвиговое напряжение, которое обусловлено существованием в пене капиллярного давления. Движение пены происходит за счет гидравлического перепада давления, который возникает в месте подачи или подъема пены. Чем больше площадь, покрытая слоем пены, тем выше должен быть перепад высот.

В качестве независимого параметра, характеризующего процесс тушения пламени, выступает интенсивность подачи пены. Этот параметр не является однозначным, поскольку фактически меняется в процессе тушения, по мере растекания пены по горящей поверхности. Интенсивность рассчитывается как отношение расхода пенообразующего раствора к площади поверхности, а в первый момент пло-

щадь, находящаяся под пеной, очень мала, поэтому первоначально фактическая интенсивность подачи пены будет очень большой, а затем начнет постепенно снижаться.

По мере покрытия пеной поверхности фактическая интенсивность будет приближаться к расчетной, которая определяется делением секундного расхода пены на общую площадь поверхности горючей жидкости (ГЖ) в резервуаре или в нефтяных амбарах. Это позволяет объяснить, почему при критической интенсивности подачи пены часть поверхности горячей жидкости будет покрыта пеной, хотя вся подаваемая пена разрушается пламенем. Вначале фактическая интенсивность подачи пены больше расчетной, и пена беспрепятственно продвигается вперед, покрывая все большую поверхность. Движение пены останавливается, когда фактическая интенсивность становится равной расчетной (рис. 1).

Типичная зависимость основных параметров, характеризующих процесс тушения, — времени тушения пламени и удельного расхода пены представлена на рис. 2 на примере тушения пламени гептана углеводородным (ПО-3АИ) и фторсинтетическими (Гидрал, Петрофильм) пенообразователями. Форма кривых, характеризующих зависимость времени тушения пламени от интенсивности подачи пены, обусловлена двумя процессами — накоплением пены при ее подаче на поверхность горячей жидкости и ее разрушением под действием пламени и из-за контакта с горючей жидкостью.

Интенсивность, при которой пена преимущественно продвигается вперед по поверхности, не накапливаясь, и толщина ее слоя не увеличивается, принимается в качестве оптимальной. При этом оптимум тушения может быть выявлен двумя способами:

- 1) по положению минимума на кривой удельного расхода пенообразующего раствора Q_f , рассчитываемого умножением времени тушения на интенсивность подачи пены;
- 2) по положению максимума на кривой удельной скорости тушения пламени W_T при различной интенсивности подачи пены.

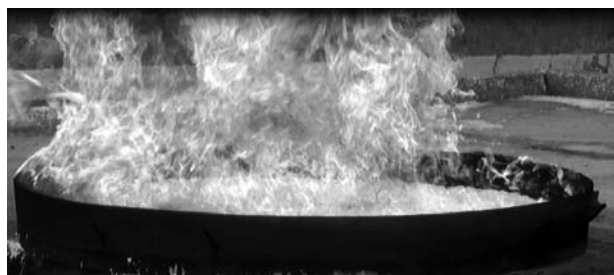


Рис. 1. Критическая ситуация при тушении гептана: движение пены прекратилось, и новые порции пены компенсируют пену, разрушенную тепловым потоком от пламени

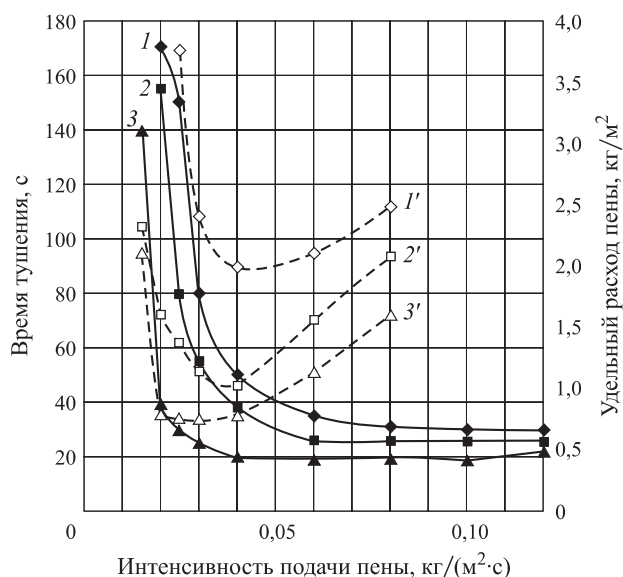


Рис. 2. Зависимость времени тушения пламени гептана (1–3) и удельного расхода (1'–3') пены, полученной из углеводородных (ПО-3АИ) и фторсинтетических (Гидрал, Петрофильм) пенообразователей: 1, 1' — ПО-3АИ; 2, 2' — Гидрал; 3, 3' — Петрофильм

Удельный расход пенообразователя на тушение единицы площади горячей поверхности Q_f является также показателем, характеризующим “экономическую” сторону процесса тушения пламени. Величина, обратная Q_f (т. е. $1/Q_f$), будет характеризовать огнетушащую способность 1 кг пенообразующего раствора P_f в отношении тушимой поверхности.

Динамический показатель огнетушащей эффективности пенообразователя — приведенную (или удельную) скорость тушения пламени W_T ($\text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{кг})$) определяют по формуле

$$W_T = \frac{1/Q_f}{\tau} = \frac{1}{J\tau^2}, \quad (1)$$

где J — интенсивность подачи пены, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;
 τ — время тушения, с.

Критическая интенсивность, определяемая при тушении пламени нефтепродуктов, зависит от удельной массовой скорости выгорания нефтепродукта U_T , кратности пены и природы пенообразователя, на основе которого получена пена. Влияние скорости выгорания нефтепродукта на процесс тушения пламени представлено на рис. 3.

Наряду с временем тушения, на рис. 3 показана зависимость удельной скорости тушения от интенсивности подачи пены. Величина W_T , так же как и интенсивность, является усредненной величиной, характеризующей процесс тушения. При переходе от гептана к пентану, по мере увеличения удельной массовой скорости выгорания жидкости, критическая интенсивность подачи пены возрастает. На рис. 3 можно видеть, что значения $J_{кр}$ для различных уг-

леводородов различаются: $J_{кр} = 0,01$ кг/(м²·с) при $U_r = 0,02$ г/(с·м²) и $J_{кр} = 0,035$ кг/(м²·с) при $U_r = 0,07$ г/(с·м²). Кривые, отражающие расчет приведенной скорости тушения для всех потушенных углеводородов, проходят через максимум, который сдвигается в сторону больших значений для углеводородов с более высокой удельной скоростью выгорания. Оптимальная интенсивность подачи пены, определенная по положению максимума на кривых удельной скорости тушения, растет при использовании нефтепродукта с большей удельной скоростью выгорания.

На рис. 4 показано изменение одновременно параметров Q_f и W_T , определенных экспериментально. Эти параметры изменяются разнонаправленно с ростом интенсивности подачи пены: если удельный расход пенообразователя Q_f убывает, то удельная скорость тушения пламени W_T возрастает.

Положение минимума на кривой удельного расхода (см. рис. 4) указывает на оптимальную интенсивность подачи пены, если в качестве критерия принято минимальное количество пены, использованной на тушение пламени. Если в качестве критерия выбрать приведенную скорость тушения пламени, то оптимальная интенсивность будет соответствовать максимуму на кривой приведенной скорости тушения пламени. Как правило, положение максимума на кривой удельной скорости тушения W_T (см. рис. 4) всегда соответствует большей интенсивности, чем минимум на кривой удельного расхода пены Q_f . Для всех потушенных углеводородов оптимальная интенсивность, определенная по максимуму W_T , больше, чем по минимуму расхода пены Q_f .

Дальнейшее повышение интенсивности подачи пены практически не сказывается на времени тушения пламени. Поэтому кривая, характеризующая зависимость времени тушения от интенсивности подачи пены, имеет характерную форму: от “критической” интенсивности, при которой время тушения стремится к бесконечности, до предельно низкой, но постоянной величины, которая устанавливается после превышения оптимальной интенсивности подачи пены.

Роль природы пенообразователя в процессе тушения пламени показана на рис. 5. В зависимости от состава пенообразователей, и в первую очередь от вида фторированных стабилизаторов, пенообразователи могут быть предназначены для тушения пламени определенного класса горючих жидкостей: только нефтепродуктов (целевые) или нефтепродуктов и растворимых в воде горючих жидкостей (универсальные). Как правило, эффективность универсальных пенообразователей ниже, чем целевых. Так, для пены на основе пенообразователя “Фторпротеиновый” критическая интенсивность $J_{кр}$ силь-

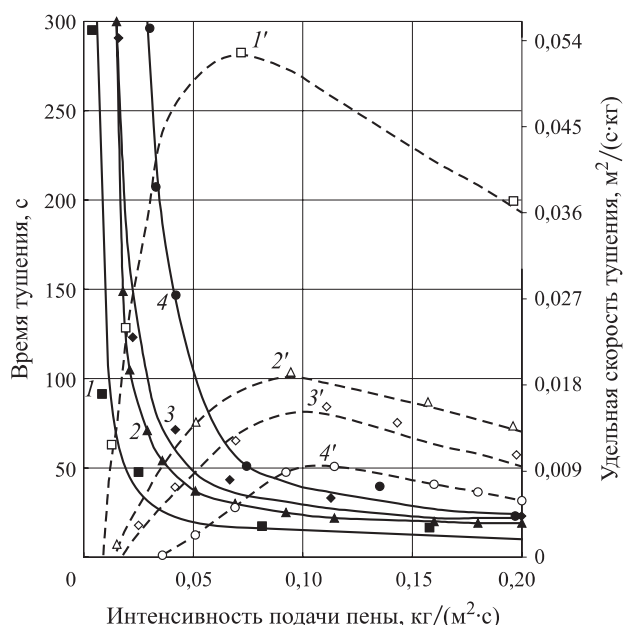


Рис. 3. Зависимость времени тушения τ (1–4) и удельной скорости тушения W_T (1'–4') от интенсивности подачи пены J из пенообразователя ФС-203А при тушении различных нефтепродуктов: 1, 1' — гептан; 2, 2' — нефть; 3, 3' — бензин; 4, 4' — пентан

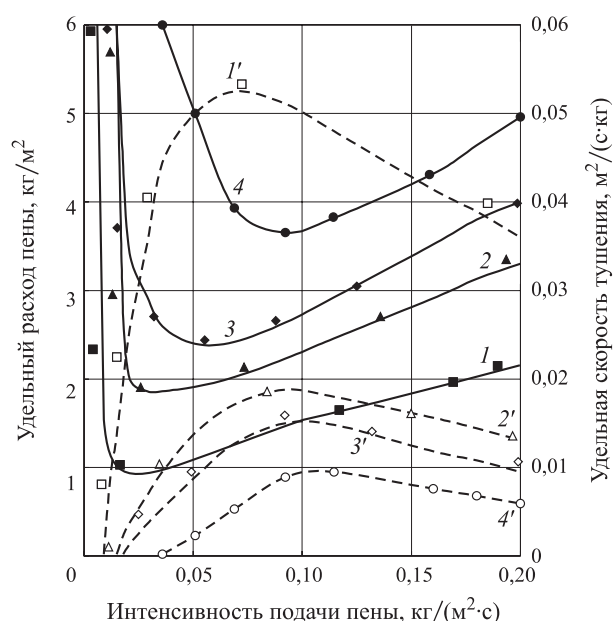


Рис. 4. Зависимость удельного расхода пены Q_f (1–4) и приведенной удельной скорости тушения W_T (1'–4') от интенсивности подачи пены J при тушении различных видов нефтепродуктов пенообразователем ФС-203А: 1, 1' — гептан; 2, 2' — нефть; 3, 3' — бензин; 4, 4' — пентан

но повышается — с 0,01 до 0,05 кг/(м²·с) с возрастанием U_r с 0,02 до 0,07 г/(с·м²).

Время тушения пламени однозначно увеличивается с повышением удельной массовой скорости выгорания. Минимум удельного расхода $Q_{уд}$ постепенно сдвигается в область больших интенсивностей подачи пены. Если в качестве критерия опти-

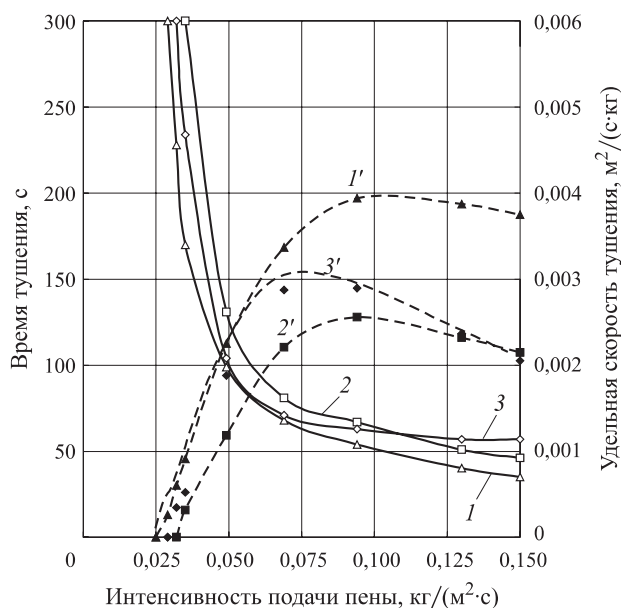


Рис. 5. Время тушения τ пламени бензина АИ-92 (1–3) и удельная скорость тушения W_τ (1'–3') при подаче различных пенообразователей: 1, 1' — Гидрал; 2, 2' — Петрофильм; 3, 3' — Фторпротеиновый

мальности процесса тушения нефтепродукта принять минимизацию расхода пенообразователя на тушение единицы площади поверхности нефтепродукта, то интенсивность, соответствующая положению минимума на кривой удельного расхода, является оптимальной ($J_{\text{опт}}$).

При тушении пламени нефтепродуктов скорость контактного разрушения пены углеводородом намного меньше, чем от термического воздействия факела пламени. Рассмотрим факторы, определяющие интенсивность термического разрушения пены.

Скорость термического разрушения пены пропорциональна величине теплового потока, поступающего из зоны горения. При этом тепловой поток от факела пламени изменяется от максимальной величины, соответствующей условиям стационарного горения жидкости, до значений, которые постепенно снижаются по мере покрытия горячей поверхности слоем пены.

Тепловой поток, поступающий к поверхности горячей жидкости q_τ , можно оценить по затратам тепла, необходимого для поддержания определенной скорости испарения горючего. Принимая, что весь пар углеводорода сгорает в зоне горения за счет взаимодействия с кислородом воздуха, можно считать, что удельная скорость испарения Q_τ численно равна скорости выгорания жидкости. Полагая, что удельная теплота испарения остается неизменной в процессе тушения пламени, получим соотношение для численной оценки величины исходного теплового потока, падающего на открытую поверхность зеркала ГЖ q_0 .

По мере продвижения пены площадь открытой поверхности горячей жидкости сокращается, уменьшается поток пара горючего вещества в зону горения и, соответственно, снижается плотность теплового потока к поверхности от факела пламени, поэтому удельная скорость разрушения пены будет переменной величиной.

Причина термического распада пены, стабилизированной обычными углеводородными ПАВ, заключается в утрате поверхностной активности их молекулами при температуре раствора 50...60 °С. При этих температурах молекулы ПАВ десорбируются с границы раздела *раствор – воздух*, пленка пены теряет устойчивость, и слой пузырьков разрушается.

Величина удельной скорости термического разрушения пены снижается в процессе тушения. Разрушение пены происходит при нагревании водного раствора до определенной температуры, при которой молекулы пенообразователя теряют поверхностную активность на границе раздела фаз.

В первый момент тушения удельный тепловой поток от факела пламени на поверхность пены имеет максимальную величину, соответствующую установившемуся тепловому равновесию между затратами тепла на испарение горючей жидкости и тепловым потоком, который лучистым путем поступает на поверхность горячей жидкости.

По мере нагревания водного раствора в пенных пленках потоком тепла от факела пламени молекулы стабилизатора пены десорбируются с поверхности *раствор – воздух*. Пены, полученные из фторированных ПАВ (ФПАВ), обладают повышенной термической устойчивостью. В отличие от углеводородных ПАВ молекулы фторированных утрачивают поверхностную активность при более высоких температурах нагревания раствора — 90...95 °С. При этом происходит частичное испарение воды из пенных пленок, что требует дополнительных затрат тепла на разрушение пены из ФПАВ. Поэтому пены из растворов ФПАВ разрушаются в два-три раза медленнее, чем пены из углеводородных пенообразователей.

Несмотря на это, характер зависимости удельной скорости термического разрушения пен, стабилизированных различными типами пенообразователей, от степени покрытия поверхности горячей жидкости одинаков. Однако количественно параметры, входящие в расчетные соотношения, будут различными. Параметр Q_τ для обычных пен будет означать удельное количество тепла, необходимое для нагревания раствора до температуры, при которой утрачивается поверхностная активность, а для фторированных — удельное количество тепла, необходимое для нагревания и частичного испарения

воды при высокой температуре. В установившемся режиме горения тепло, поступающее от пламени к жидкости, расходуется на ее испарение, прогревание внутри слоя жидкости и потери в окружающую среду. Количество тепла, поступающее от факела пламени к поверхности горючей жидкости, в стационарном режиме горения q_o , можно определить путем умножения удельной массовой скорости выгорания U_r на удельную теплоту испарения жидкости Q_r и площадь испарения ГЖ S_o . При этом необходимо учесть, что примерно половина теплового потока расходуется на прогрев жидкости в глубину, поэтому в расчетную формулу (2) введен коэффициент, равный 2:

$$q_o = 2U_r Q_r S_o, \quad (2)$$

где S_o — начальная площадь испарения ГЖ, m^2 .

По мере растекания пены величина теплового потока будет снижаться по мере уменьшения площади поверхности испарения горючего и составит только часть от q_o , поэтому

$$q = 2U_r Q_r S_o (S_r/S_o), \quad (3)$$

где S_r — площадь поверхности испарения горючей жидкости, не покрытой пеной, m^2 .

Этот поток равномерно распределяется по всей поверхности резервуара, включая площадь, покрытую пеной. Поток тепла q_f , падающий на пену, определится как:

$$q_f = q_r S_f/S_o = 2q_o Q_r S_r S_f/S_o^2, \quad (4)$$

где S_f — площадь поверхности горючего, покрытой пеной, m^2 .

Если часть поверхности покрыть пеной, то уменьшится площадь открытой поверхности ГЖ, сократится поток пара в зону горения и, как следствие, снизится тепловой поток к поверхности, т. е. он составит только часть от q_o :

$$q_s = q_o (S_r/S_o), \quad (5)$$

где q_s — поток тепла, падающий на единицу площади поверхности пены.

Введем понятие степени покрытия поверхности ГЖ пеной θ , которая характеризуется отношением площади, покрытой пеной, к общей площади поверхности ГЖ до тушения S_o , т. е. к начальной площади испарения ГЖ:

$$\theta \equiv S_r/S_o. \quad (6)$$

Величина потока тепла, падающего на единицу площади поверхности ГЖ, с учетом предыдущих выражений

$$q_f = q_s/S_o. \quad (7)$$

Количество жидкости в пленках пены составляет только третью часть объема жидкости в пене, по-

этому удельная массовая скорость разрушения пены в три раза превышает скорость испарения воды.

Суммарное количество пены, разрушенной в единицу времени, может быть рассчитано с учетом удельной теплоты Q_f , необходимой для разрушения пены путем нагревания или испарения верхнего слоя пенных пленок. С учетом того что в пене кратностью 5–10 на долю верхних пленок пузырьков приходится только третья часть водного раствора в пене, величину Q_f мы можем использовать как треть ее величины. С учетом выражений (2) и (4) получим формулу для расчета общей скорости термического разрушения пены G_f (кг/с):

$$G_f = \frac{6q_o}{Q_f} \frac{S_r S_f}{S_o^2}. \quad (8)$$

Подставляя выражение для соответствующих площадей с учетом степени покрытия поверхности θ , получим формулу, которая позволяет проследить за изменением скорости потерь пены вследствие термического разрушения под действием теплового потока от факела пламени. Суммарное количество пены, разрушенной в единицу времени, на всей поверхности ГЖ, покрытой пеной, может быть рассчитано по формуле

$$G_f = \frac{6U_r Q_r S_o}{Q_b} (1 - \theta) \theta. \quad (9)$$

Влияние степени покрытия поверхности пеной на удельную скорость термического разрушения пены g_f (кг/($m^2 \cdot c$)) иллюстрируется формулой

$$g_f = \frac{6U_r Q_r S_o (1 - \theta)}{Q_b}, \quad (10)$$

где Q_b — количество тепла, необходимое для нагревания воды до температуры, при которой при использовании углеводородных пенообразователей утрачивается поверхностная активность ПАВ, или общее количество тепла, необходимое для испарения воды из пенных пленок для фторосодержащих стабилизаторов.

Зависимости общей и удельной скорости термического разрушения пены от степени покрытия пеной горячей поверхности нефтепродукта, рассчитанные по формулам (9) и (10), представлены на рис. 6.

Формулы (9) и (10) получены для пены низкой кратности — не более 10.

С использованием формулы (10) проведена оценка величины g_f для пен, полученных из пенообразователей АБСН на основе алкилбензолсульфонатов натрия (температура потери поверхностной активности 50 °C), ВАСН — смеси вторичных алкилсульфатов (температура потери поверхностной активности 55 °C) и фторированных пенообра-

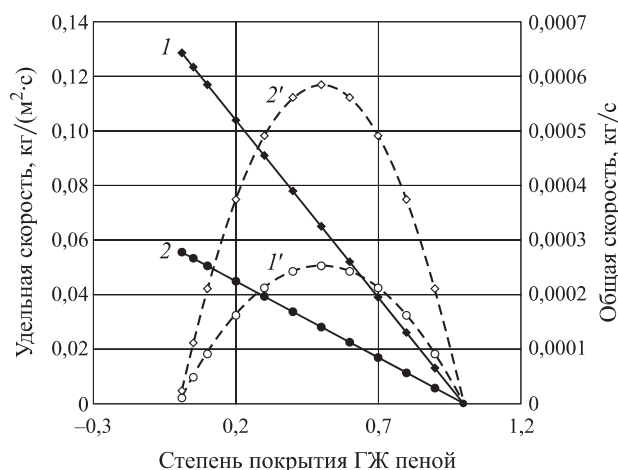


Рис. 6. Зависимости удельной g_f (1, 2) и общей G_f (1', 2') скорости термического разрушения пены, рассчитанной по формулам (10) и (9) для типичных пенообразователей: 1, 1' — фторсодержащих; 2, 2' — углеводородных

зователей “Гидрал” и “Подслойный” (температура потери поверхностной активности 90 °С).

Чем выше кратность пены, тем меньше жидкости в структуре пены приходится на пленки пены, поэтому можно ожидать, что с увеличением кратности удельная термическая скорость разрушения пены повысится. Расчетная удельная скорость термического разрушения пены при тушении пламени гептана составляет в зависимости от вида пенообразователя:

АБСК — $g_f = 141,2 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с);

ВАСН — $g_f = 103,4 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с);

Гидрал — $g_f = 12,3 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с).

Средняя удельная массовая скорость выгорания гептана равна 0,02 кг/(м²·с). Общая масса пены, разрушающейся по всей поверхности пенного слоя, имеет двойственную зависимость от степени покрытия поверхности ГЖ пеной: с одной стороны, с ростом параметра θ снижается величина теплового потока от факела пламени, а с другой — увеличивается суммарная площадь поверхности слоя пены. Двойственное влияние степени покрытия может быть прослежено по формуле (9).

При $\theta = 0$ (в начале тушения) $G_f = 0$, потому что пены еще нет, но и при $\theta = 1$ также $G_f = 0$, поскольку прекратился поток тепла из зоны горения.

Для пенообразователей “Гидрал” и “Подслойный” при $\theta = 0,5$ удельная массовая скорость разрушения пены составляет соответственно 0,031 и 0,350 кг/(м²·с).

Максимальная удельная скорость теплового разрушения пены будет достигаться при минимальной степени покрытия поверхности ГЖ пеной, когда пламя поддерживается парами горючего, исходящими со всей поверхности зеркала жидкости. Тепловой поток будет постепенно уменьшаться по мере по-

крытия поверхности горючего пеной. В первый момент пена покрывает маленький участок горячей поверхности, и поток тепла от факела пламени практически тот же, что и до тушения, т. е. определяется скоростью испарения жидкости в установившемся режиме горения. Поскольку отсчет времени тушения начинается с момента попадания первой порции пены на горящую поверхность, то при $\tau = 0$ на поверхности жидкости образуется небольшой островок пены, который определяется расходными характеристиками генератора пены и диаметром пенной струи.

Синхронно с изменением удельной скорости разрушения пены изменяется фактическая интенсивность подачи пены J_t , которая определяется как отношение секундного расхода пены к площади поверхности ГЖ, покрытой пеной: $J_f = q_f/S_f$, или $J_f = J/\theta$.

Таким образом, интенсивность разрушения пены под действием теплового потока, поступающего из зоны горения, зависит от степени покрытия пеной горячей поверхности, вида пенообразователя, природы горючей жидкости. Численное значение удельной скорости термического разрушения пены можно оценить по формуле (10). Максимальная скорость термического разрушения пены достигается при покрытии пеной половины площади зеркала горючей жидкости.

Рассмотрим упрощенный анализ материального баланса пены, поданной в резервуар на тушение пламени. Вариант является упрощенным, поскольку не учитывает изменение в процессе тушения удельной скорости разрушения пены под действием меняющегося теплового потока от факела пламени, контактного воздействия, постепенно разогревающейся горючей жидкости и меняющегося профиля толщины слоя пены. Кроме того, в процессе тушения могут меняться свойства и самой пены. Полагая, что поданная в единицу времени на тушение пламени пена q накапливается на площади поверхности нефтепродукта S_f слоем со средней толщиной h , а вторая часть утрачивается в результате разрушения пены с усредненной удельной скоростью термического разрушения g_f , получим уравнение

$$q \, d\tau = \rho_f h \, dS_f + S_f g_f \, d\tau, \quad (13)$$

(расход пены) (пенный слой) (разрушено)

где ρ_f — плотность пены, кг/м³;

h — средняя толщина пенного слоя, м.

Уравнение материального баланса при начальных условиях $\tau = 0$, $S_f = 0$ может быть преобразовано к виду, удобному для определения зависимости площади, покрытой пеной, от времени тушения пламени:

$$S_f = \frac{q}{g_f} \left(e^{-\frac{g_f \tau}{\rho_f h}} - 1 \right). \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что в процессе тушения в начальный период времени скорость покрытия поверхности ГЖ пеной максимальна, а затем, по мере завершения процесса тушения, на последних участках горячей поверхности движение пены замедляется.

Если $S_f = S_o$, то $\tau = \tau_T$. Преобразуя формулу (14) относительно времени тушения пламени, получим простое соотношение для количественной оценки времени тушения и характера зависимости времени тушения от интенсивности подачи пены.

Формула, передающая характер зависимости времени тушения от интенсивности подачи пены, получена преобразованием формулы (14). Интенсивность подачи пены J определяется отношением секундного расхода пены к площади горячей жидкости перед тушением, т. е. $J = q/S_o$:

$$\tau_T = -\frac{\rho_f h}{g_f} \ln \left(1 - \frac{J_o}{J} \right). \quad (15)$$

На рис. 7 приведены результаты расчета по формуле (15) и результаты эксперимента по тушению гептана. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по времени тушения гептана пеной проведено с использованием пенообразователя “Гидрал”. Заметное различие расчетных и экспериментальных данных наблюдается в области больших интенсивностей подачи пены. Это можно отнести на счет использования в расчетах средней удельной термической скорости разрушения пены, которая выбрана по расположению максимума на кривой суммарного разрушения пены (см. рис. 6).

Для уточненного расчета времени тушения вместо постоянной величины удельной скорости термического разрушения пены использовали формулу (10), в которой дана явная зависимость g_f от J , а вместо h — зависимость толщины пенного слоя в месте подачи пены от суммарного расхода пены.

При этом минимальная толщина пенного слоя h_o определяется кратностью и предельным напряжением сдвига пены [3], а высота ее слоя в месте падения h_q пропорциональна расходу или интенсивности подачи пены:

$$h = \frac{1}{2} (h_o + h_q) = \frac{1}{2} (h_o + \beta q), \quad (16)$$

где β — коэффициент пропорциональности.

С учетом формул (10) и (16) уравнение материального баланса пены примет следующий вид:

$$q d\tau = \rho_f h S_o d\theta + 3(U_r Q_r / Q_b)(1 - \theta)\theta d\tau. \quad (17)$$

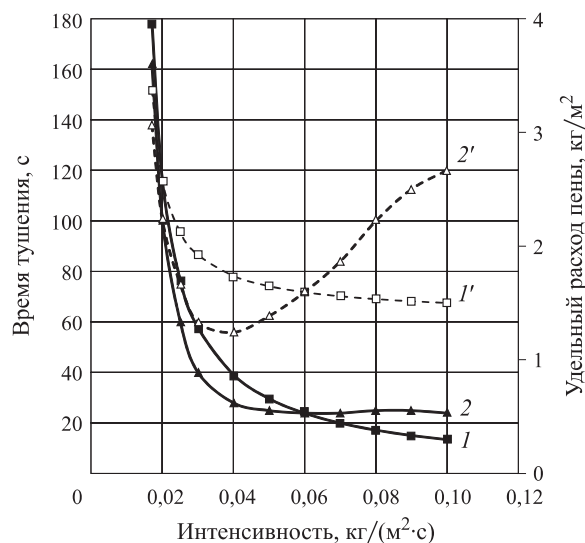


Рис. 7. Зависимость времени тушения гептана (1, 2) и удельного расхода пены из пенообразователя “Гидрал” (1', 2') от интенсивности подачи пены: 1, 1' — расчет по формуле (15); 2, 2' — эксперимент

Преобразуем уравнение материального баланса, предварительно разделив обе его части на исходную площадь поверхности жидкости S_o и обозначив $Q/S_o = J$:

$$U_o = 6U_r Q_r / Q_b. \quad (18)$$

После деления переменных и приведения дифференциального уравнения к виду, удобному для интегрирования, получим:

$$d\tau = \frac{h \rho_f d\theta}{\theta^2 U_o + (-U_o)\theta + J}. \quad (19)$$

Проинтегрировав уравнение (19) в пределах от $\tau = 0, \theta = 0$ до $\tau = \tau_T$ и $\theta = 1$, получим выражение для определения времени тушения с учетом зависимости удельной скорости термического разрушения пены от интенсивности подачи пены:

$$\tau_T = \frac{4h\rho_f}{\sqrt{(4J - U_o)U_o}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{U_o}{4J - U_o}}. \quad (20)$$

Критическая ситуация тушения пламени, когда $\tau_T \rightarrow \infty$, реализуется в случае равенства нулю подкоренного выражения в знаменателе первой дроби в уравнении (20). В этом случае $4J - U_o = 0$ при $\tau \rightarrow \infty$. В результате получим выражение для расчета критической интенсивности подачи пены:

$$J_{кр} = \frac{U_o}{4} = \frac{U_r Q_r}{4Q_b}, \quad (21)$$

Выразив U_o через $J_{кр}$ в выражении (20), после упрощения получим:

$$\tau_T = \frac{h \rho_f}{\sqrt{(J - J_{кр})J_{кр}}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{J_{кр}}{J - J_{кр}}}. \quad (22)$$

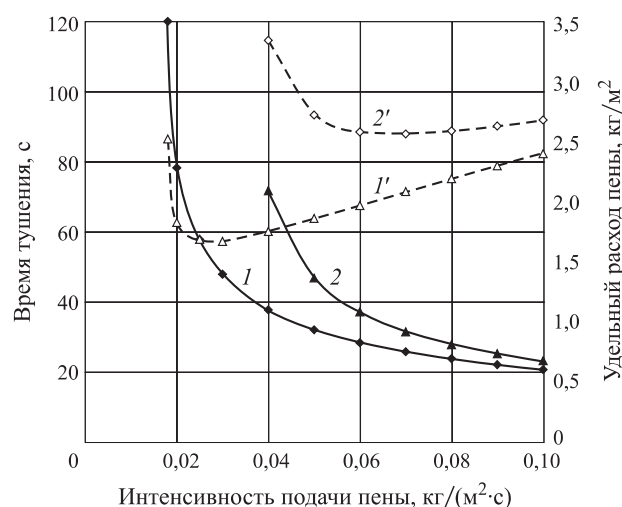


Рис. 8. Зависимость времени тушения (1, 2) и удельного расхода (1', 2') пены из фторированных (1, 1') и углеводородных (2, 2') пенообразователей

Для практических расчетов времени тушения для случаев, когда $J \geq 2J_{кр}$, выражение тригономет-

рической функции может быть представлено первым членом степенного ряда:

$$\tau_t = \frac{h_o \rho_f (3J - 2J_{кр})}{3U_o (J - J_{кр})}. \quad (23)$$

Удельный расход пены на тушение пламени

$$Q_t = \frac{h_o \rho_f J (3J - 2J_{кр})}{3U_o (J - J_{кр})}. \quad (24)$$

Зависимость времени тушения пламени и удельного расхода пены по формулам (23) и (24) для углеводородных и фторированных пенообразователей представлена на рис. 8. Как и следовало ожидать, по величине температуры, при которой утрачивается поверхностная активность, минимум удельного расхода пены при использовании углеводородного пенообразователя соответствует интенсивности в три раза больше, чем фторированного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 53280.2–2010. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 2. Пенообразователи для подслоного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах. Общие технические требования и методы испытаний. — Введ. 01.07.2010 г. — М.: Стандартинформ, 2010.
2. ГОСТ Р 50588–2012. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний. — Введ. 01.09.2012 г. — М.: Стандартинформ, 2012.
3. Шароварников А. Ф., Шароварников С. А. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение. — М.: Пожнаука, 2005. — 335 с.

Материал поступил в редакцию 29 мая 2014 г.

English

MAIN PARAMETERS OF EXTINGUISHING OF THE OIL FLAME BY LOW EXPANSION FOAM

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

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

ABSTRACT

Process of suppression of oil products by low expansion foam is investigated in this article. Time of flame suppression in a wide range of foam supply intensities is experimentally defined. Dependences of suppression time on foam supply intensity are formulated. Dependence of main extinguishing parameters — time of suppression and specific foam rate — in terms of suppression of a heptane flame by hydrocarbon (PO-3AI) and fluorine containing (Gidral, Petrofilm) foam agents is considered. It is shown that the nature of dependence of suppression time on foam supply intensity is

caused by accumulation of foam on a burning liquid surface and its destruction under influence of a flame heat flow and contact with flammable liquid. The factors defining intensity of thermal destruction of foam are considered. The formula allowing to backtrace the foam losses speed changing by thermal destruction under the influence of a flame heat flow is obtained. It is concluded that intensity of foam destruction under the influence of a heat flow from combustion zone depends on degree of foam coating on a burning surface, type of foam agent, nature of flammable liquid. The comparison of calculated and experimental data on suppression time and specific foam rate depending on foam supply intensity is carried out.

Keywords: extinguishing of oil products; foam supply intensity; specific foam rate; suppression time; low expansion foam; hydrocarbon foam agent; fluorine containing foam agent.

REFERENCES

1. *National Standard of Russian Federation 53280.2–2010. Automatic fire extinguishing systems. Fire extinguishing media. Part 2. Foam concentrates for subsurface extinguishing of fires of oil and petroleum products in tanks. General technical requirements and test methods.* Moscow, Standartinform Publ., 2010 (in Russian).
2. *National Standard of Russian Federation 50588–2012. Foaming agents for fire extinguishing. General technical requirements and test methods.* Moscow, Standartinform Publ., 2012 (in Russian).
3. Sharovarnikov A. F., Sharovarnikov S. A. *Penoobrazovateli i peny dlya tusheniya pozharov. Sostav, svoystva, primeneniye* [Foam concentrates and fire extinguishing foams. Structure, properties, application]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2005. 335 p.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу

А. Я. Корольченко, Д. О. Загорский
КАТЕГОРИРОВАНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ И ЗДАНИЙ ПО ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ
И ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ. — М. : Пожнаука, 2010. — 118 с.



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

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

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

Д. Ф. КОЖЕВИН, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: Yagmort-KDF@mail.ru)

А. С. ПОЛЯКОВ, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры физики и теплотехники, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: poljakov_as@mail.ru)

УДК 614.845.1

ЕДИНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ОГNETУШАЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЕРЕНОСНЫХ ПОРОШКОВЫХ ОГNETУШИТЕЛЕЙ

Предложена новая кодификация переносных порошковых огнетушителей, в основе которой лежит баланс теплот, выделяемой с 1 м² типовых помещений и отбираемой типоразмером огнетушителя. Определена удельная пожарная нагрузка для типовых помещений различных классов функциональной пожарной опасности. Рассмотрена параметризация огнетушителей по огнетушащей способности, определяемой единым показателем для пожаров классов А и В, вместо принятого в настоящее время критерия — массы заряда.

Ключевые слова: огнетушитель; единый показатель; параметризация; модельный очаг пожара; типоразмер; огнетушащая способность.

При анализе параметризации переносных порошковых огнетушителей выявлено отсутствие зависимости между огнетушащей способностью огнетушителей и массой заряда огнетушащего порошкового состава (ОПС) [1]. Следовательно, масса заряда ОПС для типизации огнетушителей не является приоритетным параметром. Типизация должна осуществляться по огнетушащей способности как основной величине, характеризующей процесс тушения.

Огнетушащая способность огнетушителя (только для пожаров классов А и В) определяется рангом и классом модельных очагов пожара (МОП), для пожаров других классов нормированных МОП не существует [2–4], поэтому они обозначаются только буквами (С, D, E). Однако такая кодификация не отражает огнетушащего эффекта.

Для пожаров класса А согласно [3] численное значение ранга никак не характеризует МОП, хотя в параметризации МОП по европейским нормам [4] прослеживается четкая привязка к количеству и размеру длинных брусков в штабеле, причем числовое обозначение ранга ориентировочно равно площади поверхности штабеля [1]. Для пожаров класса В числовое обозначение ранга характеризует МОП только по объему горючей жидкости [1].

Исходя из вышеизложенного, необходимо ввести новую классификацию огнетушителей, которая будет характеризовать огнетушащую способность порошковых огнетушителей с учетом их способности тушить твердые и жидкие горючие вещества и будет понятна потребителям, не имеющим специального пожарно-технического образования.

Горение фактически прекращается, когда количество теплоты, отбираемой ОПС, превышает количество теплоты, выделяемой очагом горения [5], в частности МОП. Исходя из этого, количество теплоты, выделяемой МОП класса А соответствующего ранга, должно соответствовать количеству теплоты, выделяемой МОП класса В. При этом количество теплоты, выделяемой зоной горения, численно равно произведению низшей теплоты сгорания материала на его массу (для упрощения модели берется общая масса горючего в МОП).

Из анализа огнетушащей способности отечественных и зарубежных порошковых огнетушителей определено соответствие рангов МОП классов А и В, которое представлено в табл. 10 [1].

Исходя из вышеизложенного, очевидно соответствие теплот, выделяемых из МОП классов А и В, по-

Таблица 1. Группировка рангов МОП по количеству выделяемой ими теплоты

№ п/п	МОП класса А				МОП класса В	
	по EN		по ГОСТ (ISO)		по ГОСТ (ISO)	
	Ранг	Количество теплоты, МДж	Ранг	Количество теплоты, МДж	Ранг	Количество теплоты, МДж
1	5	401	1	413	13	325
2	13	1044	2	815	34	857
3	21	1687	4	1653	55	1377
4	27	2267	6	2442	89	2229
5	55	4862	10	4092	183	4584

Таблица 2. Типовая пожарная нагрузка помещений классов функциональной пожарной опасности Ф1–Ф4

Источник пожара	Пожарная нагрузка [7]	Весовой коэффициент*	Низшая теплота сгорания, МДж/кг [8]	Плотность материала, кг/м ³ [8]	Линейная скорость выгорания, м/с [9]	Время обнаружения пожара, с [10]	Удельная пожарная нагрузка, МДж/м ²	
							по материалу	средняя
Школы	ДСП	0,83	18,00	680,00	0,02	30	5100	1145
	Пластмасса (по полиэтилену)	0,04	47,00	965,00	0,02	30	945	
	Бумага	0,10	13,40	950,00	0,02	30	663	
	Ткань	0,01	24,47	150,00	0,02	30	19	
	ПВХ	0,01	20,70	1350,00	0,02	30	146	
Лечебные учреждения	ДСП	0,56	18,00	680,00	0,02	30	3400	1285
	Пластмасса (по полиэтилену)	0,11	47,00	965,00	0,02	30	2520	
	Бумага	0,11	13,40	950,00	0,02	30	707	
	Ткань	0,17	24,47	150,00	0,02	30	306	
	ПВХ	0,06	20,70	1350,00	0,02	30	776	
Театры и дворцы культуры	ДСП	0,53	18,00	680,00	0,05	30	9663	4458
	Пластмасса (по полиэтилену)	0,21	47,00	965,00	0,05	30	14323	
	Бумага	0,03	13,40	950,00	0,05	30	503	
	Ткань	0,21	24,47	150,00	0,05	30	1159	
	ПВХ	0,03	20,70	1350,00	0,05	30	1103	
Жилые дома	ДСП	0,45	18,00	680,00	0,01	30	2225	1012
	Пластмасса (по полиэтилену)	0,14	47,00	965,00	0,01	30	2474	
	Бумага	0,09	13,40	950,00	0,01	30	463	
	Ткань	0,27	24,47	150,00	0,01	30	400	
	ПВХ	0,05	20,70	1350,00	0,01	30	508	
Административные здания	ДСП	0,64	18,00	680,00	0,03	30	5885	1781
	Пластмасса (по полиэтилену)	0,05	47,00	965,00	0,03	30	1744	
	Бумага	0,26	13,40	950,00	0,03	30	2448	
	Ткань	0,03	24,47	150,00	0,03	30	71	
	ПВХ	0,03	20,70	1350,00	0,03	30	537	
Торговые предприятия	Приведенная нагрузка	1,00	13,30	680,00	0,02	30	5426	5426
Музеи	Древесина	0,45	13,80	680,00	0,03	30	3142	1264
	Пластмасса (по полиэтилену)	0,01	47,00	965,00	0,03	30	304	
	Бумага	0,18	13,40	950,00	0,03	30	1705	
	Ткань	0,36	24,47	150,00	0,03	30	983	
	ПВХ	0,01	20,70	1350,00	0,03	30	187	

* Весовые коэффициенты для типовых помещений каждого класса функциональной пожарной опасности определены по результатам авторского обследования помещений Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России.

этому можно сгруппировать ранги МОП для классов А и В по количеству выделяемой теплоты (табл. 1).

Данные табл. 1 показывают, что группировка рангов МОП по количеству выделяемой теплоты соот-

ветствует результатам, приведенным в табл. 10 [1]. Значит, если огнетушитель способен ликвидировать горение МОП данного ранга, то количество теплоты, отбираемой ОПС, равно или превышает коли-

Таблица 3. Соответствие типоразмеров огнетушителей по количеству поглощаемой теплоты теоретическому ряду предпочтительных чисел

<i>i</i> -й член прогрессии	Типоразмер по теплоте тушения f_i [12]	Количество теплоты, выделяемой МОП, МДж
1	5656	5836
2	4000	3607
3	2828	2830
4	2000	—
5	1414	1377
6	1000	—
7	707	851
8	500	526
9	353	325
10	250	—
11	175	—

чество теплоты, выделяемой МОП, т. е. фактически теплота, выделяемая МОП, является “теплотой тушения” соответствующего огнетушителя. Причем огнетушитель предназначен для тушения возгорания на начальной стадии пожара, поэтому эффективность тушения будет зависеть не от общей площади помещения, а от удельной пожарной нагрузки. Соответственно, выбор типоразмера огнетушителя должен зависеть от удельной пожарной нагрузки в помещении, поэтому параметризацию огнетушителей необходимо осуществлять по этому показателю.

В связи с этим для реализации предлагаемой параметризации огнетушителей необходимо определять удельную пожарную нагрузку основных видов помещений различных классов функциональной пожарной опасности [6].

В соответствии со ст. 27 [6] все производственные и складские помещения необходимо категорировать по пожарной и взрывопожарной опасности, причем критерием отнесения к одной из пожароопасных категорий является удельная пожарная нагрузка. Удельную пожарную нагрузку взрывопожароопасных помещений категорий А и Б следует приравнять к значениям более 2200 МДж/м², так как критерием отнесения к этим категориям помещений является избыточное давление взрыва, а не удельная пожарная нагрузка. Для помещений иных классов функциональной пожарной опасности исходя из справочных данных определена типовая пожарная нагрузка, представленная в табл. 2.

Данные, приведенные в последней графе табл. 2, согласуются с существующими принципами моделирования развития пожара, применяемыми в зарубежных программах, таких как FDS (NIST, США), или в отечественных программах на базе FDS (СИФАСТ или СИТИС Блок), исходные данные которых также усреднены [7].

Классификация огнетушителей по количеству выделяемой теплоты также проверена на мерность рядов. Мерность рядов выполнена исходя из известного положения, что предпочтительные числа основ-

Таблица 4. Предлагаемая классификация огнетушителей по “теплоте тушения”

Условный класс огнетушителя	Удельная “теплота тушения”, МДж/м ²	Ранг МОП			Функциональное назначение помещения	Средняя удельная пожарная нагрузка, МДж/м ²
		класса А		класса В		
		по EN	по ГОСТ (ISO)			
α	> 4000	Передвижные огнетушители			Торговые	5426
					Театры и т. д.	4458 > 4000
β	2200–4000	> 55	> 10	> 183	Производственные и складские помещения категорий В1, А и Б	2200–4000
γ	1400–2200	> 27	> 6	> 89	Производственные и складские помещения категории В2	1400–2200
					Помещения класса функциональной пожарной опасности Ф4.3	1780
δ	180–1400	> 21	> 4	> 55	Помещения класса функциональной пожарной опасности Ф4.1, Ф4.2	1145
					Лечебные учреждения	1285
					Жилые дома	1012
					Музеи	1264
					Производственные и складские помещения категории В3	180–1400
ε	< 180	< 5	< 1	< 13	Производственные и складские помещения категории В4	< 180

ного ряда получают из закона геометрической прогрессии, i -й член которой имеет вид [11]:

$$f_i = a/\sqrt{2^i}, \quad (1)$$

где f_i — численное значение ряда;

i — член прогрессии;

a — размер; для переносных огнетушителей $a = 8000$, что соответствует максимальной массе заряда порошка (в граммах) в переносных порошковых огнетушителях.

Поскольку существующие ряды порошковых огнетушителей состоят из 11 представителей, то в соответствии с [12] градация огнетушителей по количеству поглощаемой теплоты представлена в табл. 3.

Результаты анализа на мерность рядов согласуются с данными табл. 10 [1] по количеству поглощаемой теплоты, выделяемой из зоны горения.

Равенство “теплоты тушения” огнетушителями и средней удельной пожарной нагрузки типовых помещений позволяет ввести новую классификацию огнетушителей, не меняя существо системы сертификации огнетушителей, привязав ее к значениям удельной пожарной нагрузки производственных и складских помещений категорий по пожарной и взрывопожарной опасности В1–В4.

В табл. 4 представлена новая классификация огнетушителей с использованием нового способа их кодификации.

Таблица 5. Комплектование помещений огнетушителями

Функциональное назначение помещения	Класс огнетушителя
Торговые помещения	α
Театры, кинотеатры и т. д.	
Производственные и складские помещения категорий В1, А и Б	β
Производственные и складские помещения категории В2	γ
Помещения класса функциональной пожарной опасности Ф4.3	
Помещения класса функциональной пожарной опасности Ф4.1, Ф4.2	δ
Лечебные учреждения	
Жилые дома	
Музеи	
Производственные и складские помещения категории В3	ε
Производственные и складские помещения категории В4	

Предлагаемую классификацию огнетушителей по пожарной нагрузке следует наносить на огнетушитель в соответствии с табл. 5.

Данная классификация предлагается для порошковых огнетушителей с пористой емкостью, но может быть использована и для других видов огнетушителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожевин Д. Ф., Поляков А. С., Сытдыков М. Р. О практике параметризации переносных порошковых огнетушителей (Аналитический обзор) // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 1. — С. 68–76.
2. ГОСТ Р 51057–2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний. — Введ. 01.07.2002 г.; 01.01.2004 г. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. URL : <http://www.docload.ru/Basesdoc/9/9480/index.htm> (дата обращения: 12.02.2014 г.).
3. ISO 7165:2009. Portable Fire Extinguishers — Performances and Construction. URL : https://members.wto.org/crnattachments/2010/tbt/UGA/10_2412_00_e.pdf (дата обращения: 12.02.2014 г.).
4. EN 1866-1:2007. Mobile Fire Extinguishers. Characteristics, Performance and Test Methods. Publication Date: 2005–12–1. Execute Date: 2005–12–1. Publisher: European Standards (EN).
5. Малинин В. Р. и др. Теория горения и взрыва : учебник для вузов МЧС России. — СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2007. — 306 с.
6. О внесении изменений в Федеральный закон “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” : Федер. закон РФ от 10.07.2012 г. № 117-ФЗ; принят Гос. Думой 20.06.2012 г.; одобрен Сов. Федерации 27.06.2012 г.; введ. 12.07.2012 г. // Российская газета. — 13.07.2012 г. — Федер. вып. № 5832. URL : <http://www.rg.ru/2012/07/13/reglament-doc.html> (дата обращения: 12.02.2014 г.).
7. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учебное пособие. — М. : Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
8. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник: в 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. II. — 774 с.
9. Иванников В. П., Ключ П. П. Справочник руководителя тушения пожара. — М. : Стройиздат, 1987. — 288 с.

10. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (в ред. приказа МЧС РФ от 12.12.2011 г. № 749); приказ МЧС России от 30.06.2009 г. № 382; введ. 30.06.2009 г. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. URL : <http://www.rubin01.ru/zakonodatelstvo/prikazy-federalnyh-organov-vlasti-20148/prikazy-federalnyh-organov-vlasti/prikaz-mchs-rf-ot-30062009> (дата обращения: 12.02.2014 г.).
11. ГОСТ 8032–84 (СТ СЭВ 3961–83). Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел. — Введ. 01.07.85 г. — М. : Изд-во стандартов, 1987. URL : <http://standartgost.ru/ГОСТ%208032> (дата обращения: 12.02.2014 г.).

Материал поступил в редакцию 28 февраля 2014 г.

English

SINGLE MEASURE OF FIRE-EXTINGUISHING CAPABILITY OF PORTABLE POWDER FIRE EXTINGUISHERS

KOZHEVIN D. F., Candidate of Technical Sciences, Deputy Chief of Physical and Chemical Bases of the Burning and Extinguishing Processes Department, Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail address: Yagmort-KDF@mail.ru)

POLYAKOV A. S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Science Worker of Russian Federation, Professor of Physics and Heating Engineers Department, Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, St. Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail address: poljakov_as@mail.ru)

ABSTRACT

When analyzing the parameterization of portable powder fire extinguishers that there is no dependence between the fire-extinguishing ability of fire extinguishers and charge mass of extinguishing powder composition (EPC). Therefore typing should be done largest fire-extinguishing capability, as the main value, which characterizes the process of fighting.

Fire-extinguishing ability of the fire extinguisher (only for fires of class A and B) is determined by the rank and class of model fires size (MFS). Such codification does not reflect extinguishing effect.

Combustion stops when the amount of heat bleed EPC exceeds the amount of heat emitted from the hearth burning, in particular with the MFS. On this basis the number of generated heat of comparable rank of MFS class A must match the number of warmth from the MFS class B. Century the amount of heat released from combustion zone is numerically equal to the product of net calorific value of the material on its mass (to simplify the model is taken as the total mass of fuel in MFS).

From the analysis of the values of the fire-extinguishing capability of domestic and foreign powder fire extinguishers it was determined according the ranks of the MFS classes A and B, so you can group ranks MFSs for class A and B of the disposal warmth.

Based on the foregoing if the fire extinguisher is able to eliminate the burning of the rank of the MFS, the amount of heat taken EPC equals or exceeds the amount of heat released by, in fact, the heat dissipated in the MFS is “warmth extinguishing” the appropriate extinguisher.

Given that the fire extinguisher is designed to extinguish a fire at the initial stage of fire, so quenching efficiency will depend not on the total area of the premises, and from the unit of fire load. Accordingly, the choice of the size of the fire extinguisher must depend on the specific fire load in the premises and parameterization of fire extinguishers should be implemented in this order.

Therefore, for the realization of the proposed parameterization of fire extinguishers is necessary to determine the specific fire load of the main types of buildings of various classes of functional fire hazard.

All production and storage areas must be categorized on fire and explosion hazard, and criterion of assignment to one of the fire risk categories is specific fire load. Specific fire load of the explosion-hazardous premises of A and B categories compared to the values of more than 2,200 MJ/m² as

a criterion for identifying the categories of premises is excessive pressure of the explosion, and no specific fire load. For premises other classes of functional fire hazard on the basis of reference data the standard fire load was determined.

Equality of “heat extinguishing” fire extinguishers with average specific fire loads typical allow space to introduce a new classification of fire extinguishers without changing creature certification system of fire extinguishers, tied her to the values of the specific fire load of production and warehouse spaces on fire and explosion hazard B1–B4.

Based on the foregoing a new classification of fire extinguishers was presented, where we have introduced a new way of codifying them.

Keywords: fire extinguisher; common indicator; parameterization; model fire; size; fire extinguishing ability.

REFERENCES

1. Kozhevin D. F., Polyakov A. S., Sytdykov M. R. O praktike parametrizatsii perenosnykh poroshkovykh ognetushiteley (Analiticheskiy obzor) [About practice of parameterization portable powder extinguishers (Analytical review)]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014. vol. 23, no. 1, pp. 68–76.
2. *National standard of the Russian Federation 51057–2001. Fire fighting equipment portable fire extinguishers. General technical requirements. Test methods*. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov, 2002. Available at: <http://www.docload.ru/Basesdoc/9/9480/index.htm> (Accessed 12 February 2014) (in Russian).
3. *ISO 7165:2009. Portable fire extinguishers — Performances and construction*. Available at: https://members.wto.org/crnattachments/2010/tbt/UGA/10_2412_00_e.pdf (Accessed 12 February 2014).
4. *EN 1866-1:2007. Portable fire extinguishers. Part 1. Specifications, requirements and test methods*. Publication Date: 2005–12–1. Execute Date: 2005–12–1. Publisher: European Standards (EN).
5. Malinin V. R. *Teoriya goreniya i vzryva* [Theory of combustion and explosion]. Saint Petersburg, Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia Publ., 2007. 306 p.
6. About modification of the Federal Law “Technical regulations about requirements of fire safety”. Federal Law on 12.07.2012 No. 117. *Rossiyskaya gazeta — Russian Newspaper*, 13.07.2012, no. 5832. Available at: <http://www.rg.ru/2012/07/13/reglament-doc.html> (Accessed 12 February 2014) (in Russian).
7. Koshmarov Yu. A. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii. Uchebnoye posobiye* [Forecasting dangerous fire factors in the room: a Training manual]. Moscow, State Fire Academy of Ministry of Interior of Russia Publ., 2000. 118 p.
8. Korol'chenko A. Ya., Korol'chenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting. Reference. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part II, 774 p.
9. Ivannikov V. P., Klyus P. P. *Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara* [The reference of the head of the fire extinguishing]. Moscow, Stroyizdat, 1987. 288 p.
10. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger. Order of Emercom of Russia on 30.06.2009 No. 382*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009. Available at: <http://www.rubin01.ru/zakonodatelstvo/prikazy-federalnyh-organov-vlasti-20148/prikazy-federalnyh-organov-vlasti/prikaz-mchs-rf-ot-30062009> (Accessed 12 February 2014) (in Russian).
11. *Interstate standard 8032–84. Preferred numbers and series of preferred numbers*. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1987. Available at: <http://standartgost.ru/ГОСТ%208032> (Accessed 12 February 2014) (in Russian).

С. В. ГУНДАР, канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры пожарной тактики и службы, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4)

А. Н. ДЕНИСОВ, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры пожарно-строевой и газодымозащитной подготовки, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4; e-mail: dan_aleks@mail.ru)

УДК 519:614.842

ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОДАЧИ ВОДЫ НА ТУШЕНИЕ КРОМКИ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

На основе анализа характеристик горения на опытных участках в сосняках, лиственничниках, на зарастающих гарях и с учетом рекомендаций по определению параметров установок пожаротушения выявлена взаимосвязь высоты пламени и ширины кромки пожара. Аналитически обоснованы расчетные значения нормативной интенсивности подачи воды на тушение кромки низовых лесных пожаров в зависимости от высоты пламени. Предложено нормативную интенсивность на тушение лесных низовых пожаров определять по высоте пламени. Приведен пример расчёта нормативной интенсивности подачи воды на тушение кромки лесного пожара. Для уточнения расчета сил, средств и затрат на пожаротушение кромки низовых пожаров целесообразно продолжить изучение расходов воды на отдельные виды работ по тушению.

Ключевые слова: интенсивность подачи воды; низовой пожар; тушение; тепловыделение; не-дожог; пламя; кромка пожара.

Кромка лесного пожара — полоса горения, непрерывно продвигающаяся по горючему материалу, на которой сгорание основного горючего материала происходит с максимальной для данного пожара плотностью тепловыделения. Основной горючий материал — доминирующий вид горючего материала, который в сочетании с погодными условиями обуславливает определённый вид лесного пожара и его последствия [1].

При рассмотрении интенсивности подачи воды на тушение кромки низовых лесных пожаров были использованы характеристики горения, установленные на опытных участках в сосняках, лиственничниках, на зарастающих гарях [2], и учтены отдельные положения “Руководства по определению параметров автоматических установок пожаротушения тонкораспыленной водой” [3] (далее — Руководство). Согласно этим положениям:

- интенсивность, а также продолжительность подачи воды на тушение являются основными нормативными параметрами устройств, характеризующими их огнетушащую эффективность;
- интенсивность подачи тонкораспыленной воды (ТРВ) должна быть достаточной для поглощения тепла, выделяемого при пожаре;
- скорость выгорания веществ не является физико-химической константой, а зависит от их природы, условий тепло- и массопереноса в зоне пожара;
- разнообразие способов размещения твердых горючих материалов (плотность, высота, равномер-

ность распределения и т. п.) и условий подачи воды (дисперсность, скорость и направление потока распыленной воды и др.) затрудняют создание универсальной модели для определения требуемых интенсивности и времени орошения, обеспечивающих успешное пожаротушение. Указанные факторы при проведении экспериментов учесть достаточно трудно;

- значения интенсивности подачи воды на тушение каждого вида горючего материала с учетом способа их укладки проверяются экспериментально, путем проведения огневых опытов;
- при испытании устройств распыления ТРВ необходимо использовать способы размещения твердых горючих материалов (ТГМ) и подачи воды, соответствующие реальным условиям их хранения на данном конкретном объекте;
- модельные очаги пожара из ТГМ (или изделия из них) для огневых испытаний должны быть уложены так, как их хранят или используют в реальных условиях (т. е. в штабелях, кипах, рулонах, насыпном виде и т. д.), и иметь сходные физические характеристики (плотность, влажность, температуру, состояние поверхности и т. п.), отличающиеся не более чем на 10 % от характеристик, наблюдаемых в реальных условиях.

Авторы данной статьи полагают, что не нарушенный до пожара и лежащий в естественном состоянии на поверхности почвы слой лесных горючих материалов (ЛГМ) отвечает перечисленным условиям. Следует отметить, что этот слой подвергается

периодически послойному увлажнению, высыханию и обновлению. Между ним и почвой происходит постоянный тепло- и массоперенос. Состав, состояние, размещение и степень разложения ЛГМ и т. д. сильно варьируются по территории.

Пример. Характеристики горения и его условий на опытном участке сосняка голубичного [2].

1. Категория участка: сосняк голубичный.

2. Древостой — 7С, 1Л, 10С, 1Б; подрост — С, Л, 10–12 лет, редкий; травяно-кустарниковый ярус — голубика, черника; мохово-лишайниковый ярус — зеленые мхи.

3. Запас сгорающих при пожаре ЛГМ ($\text{кг}/\text{м}^2$): мохово-лишайниковый покров вместе с опадом, ветошью травы и опавшими сучками диаметром до 1 см — 0,4; подстилка — 0,95; трава и кустарнички, зеленая хвоя и листья подлеска, подроста и древостоя — 0,15; опавшие сучья диаметром от 1 до 5 см — 0,3; валежник диаметром более 5 см — 1,8.

4. Погодные условия во время пожара на опытном участке: температура воздуха — 23°C ; относительная влажность воздуха — 24 %; лесопожарный показатель засухи Нестерова — 10964 ед.; скорость ветра на высоте 2 м на открытой местности — 3,8 м/с.

5. Характеристика фронтальной кромки пожара в пределах опытного участка: длина наиболее интенсивно горящей части кромки — 75 м; ширина кромки — 7,0 м; высота пламени — 2,5 м; скорость продвижения кромки — 5,6 м/мин; интенсивность пожара — 80 тыс. ккал/(м·мин) (5582,4 кВт/м).

6. Интенсивность пожара определяли путем учета количества ЛГМ, сгоревшего в единицу времени на единице длины фронта пожара, т. е. путем учета теплоты сгорания материала m (кВт/м).

Для определения же интенсивности подачи воды на тушение кромки низовых лесных пожаров необходимо знать плотность тепловыделения J_T ($\text{кВт}/\text{м}^2$), т. е. количество тепла, выделяющееся в единицу времени с единицы площади кромки пожара, которое должно быть поглощено водой при тушении.

У внешней границы кромки интенсивность пожара выше. Здесь горит весь запас ЛГМ; факел пламени, как правило, сплошной, без разрывов. Тонкие горючие элементы — листья, хвоинки, тонкие сучья и пр. — в основном успевают сгореть полностью, в результате чего плотность слоя ЛГМ уменьшается. Расстояние между более крупными горящими элементами увеличивается за счет освобождения пространства при сгорании тонких элементов. Как следствие, процесс взаимного теплообмена становится менее интенсивным. Факел пламени оседает, теряет сплошность и распадается на отдельные мелкие очаги. Появляются места беспламенного горения и прогоревшие участки, число и площадь кото-

рых увеличиваются по мере удаления внешней границы кромки пламени и приближения внутренней.

Средняя скорость выгорания лесной древесины по толщине в зависимости от породы древесины и условий горения колеблется в диапазоне 0,5–1,0 мм/мин [4], поэтому крупные сучья, ветки и т. п. часто не сгорают полностью на кромке пожара. Они либо догорают за пределами кромки, либо остаются в виде головешек на территории, пройденной пожаром.

На кромке пожара горят одновременно как неразложившиеся сучья, ветки и другие ЛГМ, так и лесные материалы, подвергшиеся в различной степени гниению. Последние обладают другими физико-химическими свойствами (например, более низкой калорийностью), что отражается на характере горения.

Согласно [4] при расстоянии между горящими элементами в лесу более 0,5–1,0 м суммарная плотность теплового потока от зоны горения к горящим поверхностям древесины становится ниже $10\text{--}15 \text{ кДж}/\text{м}^2$. В результате пламенное горение на этом участке прекращается и переходит в режим тления. В зависимости от условий и обстоятельств тление может длиться еще в течение нескольких часов, после чего горение древесины, как правило, прекращается. Именно поэтому горючий материал лесного массива почти никогда не выгорает полностью. Например, в лесных горах на пожарище до 50 % горючего материала остается несгоревшим.

Часто горящие частицы, поднятые с кромки пожара вверх конвективными потоками, перемещаются в горизонтальной плоскости за пределы площади пожара. В зависимости от материала, размера и времени полета частиц они могут или сгореть в воздухе, или выпасть на землю и зажечь напочвенный покров.

Время пребывания ЛГМ и их остатков на кромке пожара τ (мин) определяется зависимостью

$$\tau = b/v, \quad (1)$$

где b — ширина кромки пожара, м;

v — скорость распространения кромки пожара, м/мин.

Подставив значения b и v в зависимость (1), получаем:

$$\tau = 7/5,6 = 1,25 \text{ мин} = 75 \text{ с.}$$

Среднее значение количества тепла от сгоревшего ЛГМ на кромке пожара, выделившегося в единицу времени с единицы площади кромки, n ($\text{кВт}/\text{м}^2$) определяется зависимостью

$$n = m/b, \quad (2)$$

где m — интенсивность пожара на его кромке, кВт/м.

Подставив значения m и b в зависимость (2), получаем:

$$n = 5582,4/7 = 797,5 \text{ кВт/м}^2.$$

Однако для определения плотности тепловыделения, кроме теплоты сгорания запаса ЛГМ на кромке пожара, необходимо знать еще и общий коэффициент недожога — механический и химический.

Механический недожог — эффект, при котором часть ЛГМ не сгорает полностью на кромке пожара, поднимается с кромки пожара вверх конвективными потоками, перемещается в горизонтальной плоскости за пределы площади пожара и догорает за пределом кромки на территории, пройденной пожаром, оставляя на ней часто угли и головешки. Механический недожог для напочвенных растительных материалов при горении в лесу может достигать при критическом запасе почти 100 %.

Химический недожог — эффект, при котором часть продуктов теплового разложения остается неокисленной. Средняя величина химического недожога для напочвенных растительных материалов при горении в лесу находится в интервале $(60 \pm 20) \%$ [5].

Нами не найдены математические или другие модели по определению или прогнозированию недожога при лесных пожарах. Каждый участок слоя ЛГМ индивидуален и на конкретное время имеет свою величину недожога. Осадки в лесу выпадают неравномерно и носят “пятнистый” характер. В связи с этим возникают затруднения в определении действительной интенсивности тепловыделения на кромке пожара.

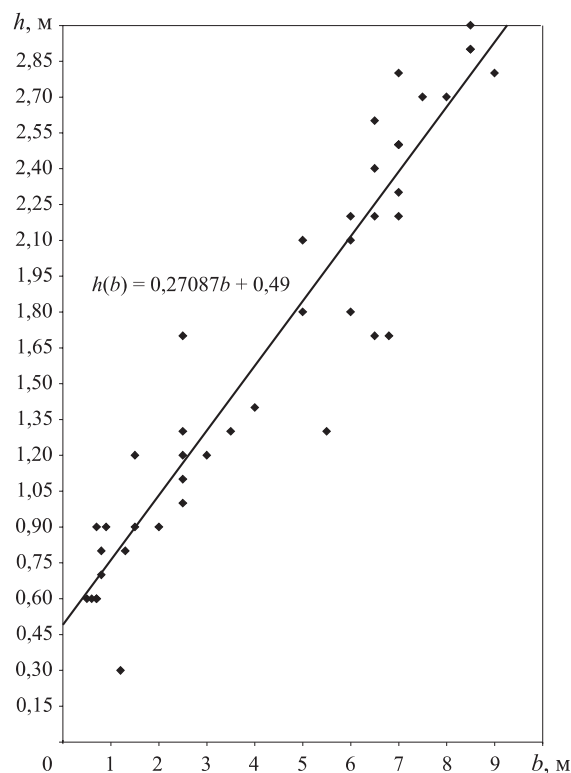
Из литературных источников [2, 6] известно, что плотность тепловыделения на кромке пожара J_T можно оценить по высоте (длине) пламени h (м). Для тепловыделения на кромке q (кВт/м) предлагается эмпирическая зависимость

$$q = (13h)^{2,17}, \quad (3)$$

где в качестве тепловой характеристики кромки пожара выступает высота пламени. Высоту пламени можно оценить путем визуального осмотра. Мы полагаем, что зависимость (3) учитывает недожог ЛГМ, поэтому представляется полезной ее адаптация (модернизация) для определения интенсивности подачи воды на тушение кромки пожара путем поглощения тепла, выделенного при пожаре, и расчета сил и средств для пожаротушения.

На рисунке показан пример взаимосвязи высоты пламени h и ширины кромки пожара b . Характеристики h и b получены на 52 пожарах в сосновых и лиственных лесах и на зарастающих гарях [2]. При $0,6 \leq b \leq 9$ м взаимосвязь этих параметров представлена зависимостью

$$b = 3,5h - 1,5. \quad (4)$$



Взаимосвязь высоты пламени h и ширины кромки пожара b на опытных участках в сосновых и лиственных лесах, а также на зарастающих гарях

Подставив зависимость (4) в (3), получим среднее значение плотности тепловыделения на кромке пожара, т. е. среднее значение количества тепла, которое должно быть поглощено водой на кромке пожара при тушении J_T :

$$J_T = \frac{q}{b} = \frac{(13h)^{2,17}}{13h - 1,5}. \quad (5)$$

С помощью зависимости (5) определяем J_T , например, при высоте пламени $h = 2$ м. Подставив в (5) значения высоты пламени h , получим:

$$J_T = \frac{(13 \cdot 2)^{2,17}}{13 \cdot 2 - 1,5} = 213,9 \text{ кВт/м}^2.$$

Расчетная критическая интенсивность* подачи воды на тушение $J_{кр}$ (л/(м²·с)), которая обеспечит поглощение тепла, выделяемого при пожаре на его кромке, определяется зависимостью

$$J_{кр} = J_T / Q, \quad (6)$$

где Q — удельный эффект охлаждения воды, кДж/л.

Удельный эффект охлаждения 1 л воды, введенной в факел пламени, при полном ее испарении и нагревании до температуры пламени $Q = 4400$ кВт/л. Подставив значения плотности тепловыделения J_T

* Расчетная критическая интенсивность — минимальное значение интенсивности подачи воды, ниже которого горение не прекращается, как бы долго ни подавалась вода.

и удельного эффекта охлаждения Q в зависимость (6), получим критическую интенсивность $J_{кр}$:

$$J_{кр} = 213,9/4400 = 0,0486 \text{ л/(м}^2\cdot\text{с)}.$$

Согласно [2] нормативная интенсивность подачи воды на тушение J_n определяется зависимостью

$$J_n = K_3 \cdot J_{кр}, \quad (7)$$

где K_3 — коэффициент запаса, учитывающий особенности использования или хранения горючих материалов или изделий из него в конкретных условиях; $K_3 = 1,5 \div 2,0$ (для лесных пожаров значение K_3 не сообщается).

Величину $J_{кр}$ определяют в серии огневых опытов (не менее 4–5) с различной интенсивностью орошения (от больших к меньшим).

Следовательно, полученные расчетным путем значения нормативной интенсивности подачи воды на тушение кромки лесного пожара требуют экспериментального подтверждения на тушении опытных и реальных лесных пожаров. Такие исследования, об отдельных особенностях которых будет сказано ниже, планируются.

Подставив значения расчетной критической интенсивности $J_{кр}$ и коэффициента запаса ($K_3 = 2$) в зависимость (7), получим нормативную интенсивность J_n (значение коэффициента запаса при этом принято наибольшим из рекомендованных Руководством [3]):

$$J_n = 2 \cdot 0,0486 = 0,0972 \text{ л/(м}^2\cdot\text{с)}.$$

Результаты определения нормативной интенсивности подачи воды на тушение низовых лесных пожаров при другой высоте пламени сведены в таблицу.

Данные таблицы показывают наличие зависимости нормативной интенсивности подачи воды на тушение от высоты пламени: при увеличении высоты нормативная интенсивность возрастает. Так, увеличение высоты в 5 раз (с 0,6 до 3 м) приводит к росту нормативной интенсивности в 2,19 раза (с 0,0654 до 0,1432 л/(м²·с)).

Следовательно, потребность в силах и средствах для пожаротушения и затратах на выполнение работ по тушению будет больше. Полагаем, что высота

Расчетные значения нормативной интенсивности подачи воды на тушение кромки низовых лесных пожаров

Высота пламени h , м	Ширина кромки b , м	Плотность тепловыделения на кромке пожара J_t , кВт/м ²	Интенсивность подачи воды, л/(м ² ·с)	
			критическая $J_{кр}$	нормативная J_n
1,0	1,9	137,56	0,0313	0,0626
1,5	3,75	168,01	0,0382	0,0764
2,0	5,6	210,07	0,0477	0,0954
2,5	7,45	256,23	0,0582	0,1164
3,0	9,3	304,88	0,0693	0,1386

пламени может служить показателем для определения нормативной интенсивности подачи воды на тушение низовых лесных пожаров.

По убеждению авторов [4, 7]:

- нормативная интенсивность подачи воды на тушение лесных пожаров должна быть 0,1 л/(м²·с);
- если превысить интенсивность подачи воды, то резко увеличится толщина слоя воды на протушивание поверхности и, соответственно, возрастет скорость ее стекания с протушенных поверхностей, что увеличит потери воды в процессе тушения ТГМ;
- при меньшей интенсивности подачи воды время подачи минимального количества воды (5 л/м²), необходимого для тушения лесного пожара, возрастет и, соответственно, увеличится расход воды на тушение пожара и ее количество, требуемое для завершения процесса тушения;
- кроме того, потери воды возрастают из-за невозможности подачи ее на некоторые открытые поверхности горения, несвоевременности подачи ее на весь очаг горения, пролива части подаваемой воды мимо очага горения и по многим другим причинам;
- из-за потери воды в процессе тушения ее расход на тушение пожара резко возрастает, нередко в 5–10, а иногда и в 20–30 раз.

При таком разбросе экспериментальных данных крайне затруднительно выделить и однозначно определить вклад в расход воды на тушение интенсивности ее подачи, от которой зависит поглощение тепла, выделяемого при пожаре на кромке, или охлаждение уже не горящего слоя материала на кромке.

В то же время в [6] не сообщается о зависимости нормативной интенсивности подачи воды на тушение лесных низовых пожаров от вида горючих материалов, интенсивности пожара, характера тепловыделения и других факторов.

Для снижения необходимости применять водные способы для тушения лесных пожаров рекомендуется максимально использовать имеющиеся в лесу рубежи и преграды, прокладывать заградительные и опорные минерализованные полосы. Непосредственное тушение кромки пожара следует осуществлять в наиболее удобное для этого время (вечер, ночь, утро). Повышать эффективность водного способа тушения необходимо путем создания перед надвигающейся кромкой пожара смоченной водой полосы ЛГМ (на подготовку к горению примыкающего к кромке и еще не горящего материала используется только часть выделяющегося на кромке тепла). Расход воды на создание смоченной заградительной полосы зависит от интенсивности подачи воды на защищаемый слой ЛГМ. На кромке пожара, распро-

странение которой было остановлено, по мере выгорания материала горение слабеет и прекращается.

Каждый из видов интенсивности подачи воды вносит свой вклад в общий расход воды на тушение того или иного лесного низового пожара:

- поглощение тепла, выделяемого при пожаре на его кромке;
- протушивание и охлаждение уже не горящего слоя материала на кромке;
- охлаждение слоя материала на заградительной полосе перед кромкой пожара.

По нашему мнению, для расчета сил, средств и расхода воды на пожаротушение требуется продолжать изучение расхода воды на отдельные виды работ по тушению лесных пожаров. При этом планируется уточнить калькуляцию расходов воды (в абсолютных или долевыми показателями), требуемых для тушения кромки лесного низового пожара.

Выводы

Из результатов определения интенсивности подачи воды на тушение кромки лесных низовых пожаров следует, что:

- высота пламени может использоваться для оценки нормативной интенсивности подачи воды на тушение кромки лесных низовых пожаров;
- нормативная интенсивность подачи воды на тушение кромки лесных низовых пожаров повышается при увеличении высоты пламени;
- целесообразно продолжить работы по уточнению калькуляции расходов воды на тушение низовых лесных пожаров, а также по экспериментальной проверке полученных расчетных значений нормативной интенсивности подачи воды на тушение кромки низовых пожаров на опытных и реальных лесных пожарах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пешков В. В.* Словарь терминов по лесной пирологии. — Хабаровск : ДальНИИЛХ, 2011. — 55 с.
2. *Валендик Э. Н., Матвеев П. М., Софронов М. А.* Крупные лесные пожары. — М. : Наука, 1979. — 198 с.
3. Руководство по определению параметров автоматических установок пожаротушения тонкораспыленной водой : утв. ФГУ ВНИИПО МЧС России 10.12.2001 г. — М. : ВНИИПО МЧС России, 2004. — 16 с.
4. *Софронов М. А., Волокитина А. В., Софронова Т. М.* Пожары в горных лесах. — Красноярск : СО РАН, Институт леса им. В. Н. Сукачева, ГОУ ВПО “Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева”, 2008. — 388 с.
5. *Абдурагимов И. М.* Новый эффективный способ тушения лесных пожаров. URL : <http://пожарное-дело.рф/gubricator> (дата обращения: 13.02.2014 г.).
6. *Абдурагимов И. М.* Проблемы тушения лесных и торфяных пожаров (тепловая теория тушения пожаров твердых горючих материалов на открытых пространствах и внутри зданий и сооружений) // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 10. — С. 66–76.
7. *Волокитина А. В., Софронов М. А.* Классификация и картографирование растительных горючих материалов. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2002. — 314 с.

Материал поступил в редакцию 14 февраля 2014 г.

English

FLOW RATE OF WATER TO EXTINGUISH THE EDGE OF THE CREEPING FOREST FIRES

GUNDAR S. V., Candidate of Agricultural Sciences, Docent, Associated Professor of Fire Tactics and Service Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

DENISOV A. N., Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of Fire Marching Drill and Gas-Smoke Protection Training Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: dan_aleks@mail.ru)

ABSTRACT

To study the intensity of the water supply for extinguishing of the creeping forest fires edge there were used combustion characteristics (density of heat, heat flow, average rate of burning of forest wood

in thickness, while staying combustible forest materials and residues at the fires edge, unburned carbon ratio: mechanical and chemical) on experimental plots in pine, larch forest, on wild slash areas subject to certain provisions of the Guidelines on the characterization of automatic extinguishing water mist. Graphically it was shown the relationship flame height and width of fires edge on experimental plots in the pine and larch forests and on wild slash areas. Analytically it was calculated standard intensity of the water supply for extinguishing of a forest fires edge, taking into account features of the use or storage of flammable materials, or products in specific circumstances, as well as the critical intensity of the water supply for extinguishing. There are calculated values of the regulatory intensity of water supply for extinguishing of creeping forest fires edge tabulated. All of the above leads to the conclusion that the flame height can serve as an indicator to determine the value of regulatory intensity of the water supply for extinguishing of creeping fire. But in our opinion, to calculate the forces, resources and costs it was required to continue the study of firefighting water flow for specific jobs for fighting forest fires. The study will be continued to clarify the costing of water for extinguishing of the creeping fires edge. By design, the calculation should be absolute or equity indices.

Keywords: intensity of the water supply; creeping fire; extinguishing; heat; incomplete combustion; flame; fires edge.

REFERENCES

1. Peshkov V. V. *Slovar terminov po lesnoy pirologii* [Glossary of forest pyrology]. Khabarovsk, DalNIILKh Publ., 2011. 55 p.
2. Valendik E. N., Matveev P. M., Sofronov M. A. *Krupnyye lesnyye pozhary* [Large forest fires]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 198 p.
3. *Guidelines for determining the parameters of automatic extinguishing water mist*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2004. 16 p. (in Russian).
4. Sofronov M. A., Volokitina A. V., Sofronova T. M. *Pozhary v gornyykh lesakh* [Fires in the mountain forests]. Krasnoyarsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Forest V. N. Sukacheva, HPE "Krasnoyarsk State Pedagogical University V. P. Astafyeva" Publ., 2008. 388 p.
5. Abduragimov I. M. *Novyy effektivnyy sposob tusheniya lesnykh pozharov* [New effective way to extinguish forest fires]. Available at: <http://пожарное-дело.рф/rubricator> (Accessed 13 February 2014).
6. Abduragimov I. M. Problemy tusheniya lesnykh i torfyanykh pozharov (teplovaya teoriya tusheniya pozharov tverdykh goryuchikh materialov na otkrytykh prostranstvakh i vnutri zdaniy i sooruzheniy) [A problem of suppression of forest and peat fires (the thermal theory of suppression of solid combustible material fires on open spaces and inside buildings and constructions). *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 10, pp. 66–76.
7. Volokitina A. V., Sofronov M. A. *Klassifikatsiya i kartografirovaniye rastitelnykh goryuchikh materialov* [Classification and mapping of vegetation combustible materials]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2002. 314 p.

**ВОПРОС:**

Какие требования пожарной безопасности предъявляются к зерноуборочной технике и местам ее заправки в период сбора урожая?

ОТВЕТ:

В летне-осенний период в полях повышается пожарная опасность. Поэтому ежегодно сотрудниками государственного пожарного надзора проводятся профилактические мероприятия по повышению уровня противопожарной защиты мест сбора урожая и объектов, связанных с производством, переработкой и хранением сельскохозяйственных культур.

Эти мероприятия в основном включают:

- контроль укомплектованности техники и мест технического обслуживания необходимыми средствами пожаротушения (огнетушители, лопаты, багры, ломы, ящики с песком, ведра, емкости с водой);
- проверку исправности искрогасителей зерноуборочной техники в соответствии с требованиями п. 212 Правил противопожарного режима в Российской Федерации [1];
- своевременную очистку двигателей и защитных решеток зерноуборочной техники от отходов, пыли, пуха, соломы, сорняков с помощью воздушного потока, создаваемого передвижными компрессорами, что позволяет предотвратить образование искр и перегрева отдельных металлических и деревянных деталей;
- обеспечение исправности автоматики, контролирующей состояние работы основных частей и агрегатов техники, и принятие мер для предотвращения их поломки.

Для ремонта и восстановления поврежденных деталей зерноуборочной техники часто требуется выполнение сварочных работ, которые должны проводиться в соответствии с [1]. Помимо неосторожного обращения с огнем, причинами пожаров в процессе уборки урожая становятся прямые удары молнии, замыкание или обрыв проводов высоковольтных линий электропередач, а также отсутствие качественного заземления транспортных средств при сливе-наливе ЛВЖ или ГЖ на пунктах технического обслуживания.

Хранение и заправка нефтепродуктами автомобилей и технологического оборудования в полевых условиях осуществляются на специальных площадках, очищенных от сухой травы, горючего мусора и т. п. Площадки опашиваются минерализованной полосой шириной не менее 4 м. Допускается организовывать площадки техобслуживания на пахоте на расстоянии 100 м в от токов, стогов сена и соломы, хлебных массивов и не менее 50 м от строений (см. п. 207 [1]).

В местах заправки устанавливаются временные пожарные щиты с учетом предельной защищаемой площади (см. прил. 5 [1]). Комбайны и тракторы оснащаются двумя, а топливозаправщики тремя огнетушителями

различного типа (углекислотный и/или порошковый). В процессе заправки количество топлива контролируется с помощью встроенного уровня в баке для предотвращения перелива. Обязательно должно контролироваться полное опорожнение заправочного шланга по окончании заполнения топливного бака. Для уменьшения нагрева цистерн солнечными лучами их чаще всего окрашивают в белый цвет, а цистерны небольших размеров накрывают брезентом или располагают под навесом.

Качественное заземление топливозаправщиков (автоцистерн) является важным условием обеспечения пожарной безопасности сбора урожая. Заземление осуществляется непосредственно перед началом слива-налива ЛВЖ или ГЖ с помощью заземляющего электрода (металлического колышка, забиваемого в землю). Металлический корпус топливозаправщика соединяется с заземляющим электродом с помощью стального троса диаметром 6 мм². Таким образом, обеспечивает стекание зарядов статического электричества с корпуса автомобиля в землю. Однако контроль системы заземления топливозаправщиков обеспечивается только визуально, чего бывает недостаточно. Поэтому для повышения качества заземления рекомендуется применять устройства заземления автоцистерн (УЗА) со световой индикацией и автоматическим контролем прекращения слива-налива в случае отсутствия надежного контакта цистерны с землей. УЗА в основном работают от сетей переменного тока, поэтому в полевых условиях их применение проблематично. Для таких случаев разработаны УЗА с блоком питания, которые можно с успехом использовать в полевых условиях, контролируя только заряд аккумуляторных батарей.

В отличие от автоцистерн корпуса комбайнов и другой зерноуборочной техники специальной системы заземления не имеют и заземляются через закрепленную на их раме цепь, два звена которой должны соприкасаться непосредственно с землей. Однако такое заземление ненадежно и не может обеспечить пожарную безопасность процесса. В связи с этим использование УЗА в процессе заправки зерноуборочной техники представляется актуальным решением проблемы обеспечения пожарной безопасности в уборочный период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О противопожарном режиме (с Правилами противопожарного режима в Российской Федерации (в ред. постановления Правительства РФ от 17.02.2014 г. № 113) : постановление Правительства РФ от 25.04.2012 г. № 390; введ. 01.09.2012 г. // Собрание законодательства РФ. — 07.05.2012. — № 19, ст. 2415.

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

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал “ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ” статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; проблемные обзоры и краткие сообщения; комментарии к нормативно-техническим документам; справочные материалы и т. п. Методы расчета и экспериментальные данные, полученные автором, должны быть оформлены в соответствии с рекомендациями КОДАТА. Остальные численные данные, за исключением общеизвестных величин, следует снабжать ссылками на первоисточник. Научные статьи должны иметь практическую направленность. В начале работы (например, во введении) целесообразно кратко изложить состояние проблемы и место в ней данной задачи. В конце публикации должны быть сделаны краткие выводы с указанием научной новизны и практической полезности материала.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены в редакцию в электронном виде по электронному адресу (info@fire-smi.ru), а также в бумажном виде по почте (121352, Российская Федерация, г. Москва, а/я 43). Статья должна быть ясно изложена, тщательно отредактирована и подписана авторами.

2. Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть информативными, в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия; не должен также использоваться непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

2.3.1. Имена, отчества и фамилии всех авторов (полностью, на русском языке и в транслитерации). Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.3.2. Степени, звания, должность, адресные сведения о месте работы всех авторов (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: официальное полное название организации вместе с ведомством, к которому оно принадлежит (при переводе — желательно его официально принятый английский вариант), индекс, страну, город, название улицы, номер дома, а также контактные телефоны и электронный адрес хотя бы одного из авторов. Все почтовые сведения на иностранном языке (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть представлены на английском языке, в том числе название города и страны.

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

2.4. Аннотация на русском языке (не менее 4–5 предложений).

2.5. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторские резюме на английском языке в русскоязычном издании являются для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- оригинальным (не быть калькой с русскоязычной аннотации с дословным переводом);

- содержательным (должны излагаться существенные результаты работы; не должен включаться материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т. е. следовать логике описания результатов в публикации);
- “англоязычным” (написано качественным английским языком; необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. “The study tested”, но не “It was tested in this study”);
- объем текста авторского резюме должен быть не менее 100–250 слов.

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

Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

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

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

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

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом употреблении в авторском резюме.

В авторском резюме не даются ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

2.6. Ключевые слова (на русском и английском языках).

2.7. Текст статьи (в формате Word через 1,5 инт.; формулы должны быть набраны в Equation 3.0 или MathType).

2.8. Пристатейные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Цитируемая литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке цитирования. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. При этом цитируемый один в один текст из других публикаций следует брать в кавычки. 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.

2.9. Пристайные списки литературы в романском алфавите (латинице) — References.

Для References можно предложить следующий формат:

Author A. A., Author B. B., Author C. C. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49–53.

Примеры описаний в References

Статьи из журнала:

Zagurenko A. G., Korotovskikh V. A., Kolesnikov A. A., Timonov A. V., Kardymon D. V. Tekhniko-ekonomicheskaya optimizatsiya dizayna gidrorazryva plasta [Techno-economic optimization of the design of hydraulic fracturing]. *Neftyanoye khozyaystvo — Oil Industry*, 2008, no. 11, pp. 54–57.

(Авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] (представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо), курсивом название журнала (транслитерация — перевод), год выхода издания, номер журнала, интервал страниц. Нежелательно в ссылках делать произвольные сокращения названий источников).

Статьи из электронного журнала:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B. P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 1999, vol. 5, no. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (Accessed 28 April 2011).

Статьи с DOI:

Zhang Z., Zhu D. Experimental research on the localized electrochemical micro-machining. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2008, vol. 44, no. 8, pp. 926–930. doi: 10.1134/S1023193508080077.

(Если описываемая публикация имеет doi, его указание обязательно в References).

Статьи из периодического издания (сборника трудов):

Astakhov M. V., Tagantsev T. V. Eksperimentalnoye issledovaniye prochnosti soyedineniy “stal—kompozit” [Experimental study of the strength of joints “steel—composite”]. *Trudy MGTU “Matematicheskoye modelirovaniye slozhnykh tekhnicheskikh sistem”* [Proc. of the Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems”], 2006, no. 593, pp. 125–130.

Материалы конференций:

Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalina I. Z., Mukhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Svishnikov A. V. Osobennosti proyektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniym gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novyye resursosberegayushchiye tekhnologii nedropolzovaniya i povysheniya neftegazootdachi”* [Proc. 6th Int. Symp. “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact”]. Moscow, 2007, pp. 267–272.

Книги (монографии, сборники):

Nenashev M. F. *Posledneye pravitelstvo SSSR* [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

Переводные книги:

Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S. P., Iang D. Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1985. 472 p.).

Интернет-ресурс:

Pravila Tsitirovaniya Istochnikov [Rules for the Citing of Sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (Accessed 7 February 2011).

Диссертации или авторефераты диссертаций:

Semenov V. I. *Matematicheskoye modelirovaniye plazmy v sisteme kompaktnyy tor*. Dis. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

ГОСТы:

State Standard 8.586.5–2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (In Russian).

Описание патента:

Palkin M. V., e. a. *Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya* [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF, no. 2280590, 2006.

На сайте издательства Emerald даны достаточно подробные рекомендации по составлению пристайных списков литературы по стандарту Harvard (Harvard Reference System) практически для всех видов публикаций <http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/harvard.htm?part=2>, а также программные средства для их формирования.

3. 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.

4. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений представляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо создать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций не приемины.

5. 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.

6. К статьям, авторами которых являются соискатели ученых степеней, следует прилагать рецензию, которая должна быть подписана рецензентом из сторонней организации (с указанием его Ф. И. О., ученого звания, ученой степени, должности, места работы), заверена отделом кадров (ученым секретарем) и печатью.

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

8. Плата за публикацию работ с аспирантов не взимается.

Приглашаем Вас к сотрудничеству на страницах нашего журнала.



21-я Московская международная выставка «ОХРАНА, БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ЗАЩИТА»

13.04 — 16.04.2015

Москва, ВДНХ, павильон 75



Охранное
телевидение
и наблюдение.



Системы
защиты
периметра.
Ограждения.



Технические
средства
обеспечения
безопасности.



Пожарная
безопасность.
Аварийно-
спасательная
техника.
Охрана труда.



Смарт карты.



РЕКЛАМА

Организатор:



Тел.: +7 (495) 935 7350
Факс: +7 (495) 935 7351
security@ite-expo.ru

При поддержке:



МВД России

www.mips.ru

**ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПОЖНАУКА»
ПРЕДЛАГАЕТ ВАШЕМУ ВНИМАНИЮ**

Учебное пособие

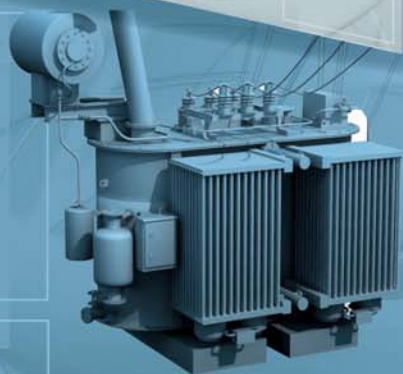
В. Н. Черкасов, В. И. Зыков

Обеспечение пожарной безопасности электроустановок



Рецензенты: Федеральное государственное учреждение Всероссийский ордена «Знак почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, кафедры физики и пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России.

В учебном пособии рассмотрены общая схема электроснабжения потребителей, классификация электроустановок и причины пожаров от них, а также вероятностная оценка пожароопасных отказов в электротехнических изделиях и пожарная безопасность комплектующих элементов. Приведены нормативные обоснования и инженерные решения по обеспечению пожарной безопасности электроустановок и защите зданий и сооружений от молний и статического электричества. Учебное пособие предназначено для практических работников в области систем безопасности и может быть использовано для подготовки и повышения квалификации специалистов соответствующего профиля.



**Web-сайт: firepress.ru
Эл. почта: mail@firepress.ru
Тел.: (495) 228-09-03**

АКЦИЯ



УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Предлагаем Вам приобрести наши журналы за прошлые годы. Цена одного номера — 100 рублей без стоимости пересылки.

Журнал “ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ”:

- 2009 год
№ 1, 3, 4, 7–9;
- 2010 год
№ 1, 2, 4, 5, 9–12;
- 2011 год
№ 1, 10, 11;
- 2012 год
№ 2, 5–7, 9–12;
- 2013 год
№ 1–12.

Журнал “ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ”:

- 2009 год
апрель, декабрь;
- 2010 год
февраль, апрель, июнь, август,
октябрь, декабрь;
- 2011 год
июнь, август, октябрь.

Адрес издательства:
121108, г. Москва,
ул. Ивана Франко,
д. 4, корп. 10.
Телефон:
+7 (495) 228-09-03

Издательство “Пожнаука” предлагает Вам оформить подписку
на журнал “Пожаровзрывобезопасность”
на 1-е (2-е) полугодие 2014 г.

Подписка на полугодие включает в себя
шесть номеров журнала “Пожаровзрывобезопасность”.



ПЕРСОНАЛЬНАЯ ПОДПИСКА
на журнал

ПОЖАРОВЗРЫВО-
БЕЗОПАСНОСТЬ



ISSN 0869-7493

КУПОН '2014

Издание	Цена подписки, руб.	Количество экземпляров	Стоимость подписки, руб.
Журнал “Пожаровзрывобезопасность” (1-е полугодие 2014 г.)	4950		
Журнал “Пожаровзрывобезопасность” (2-е полугодие 2014 г.)	5200		

- ☐ Укажите в таблице количество экземпляров, которое Вам необходимо.
В связи с введением обязательного составления счетов-фактур при
совершении операций по реализации просим прислать также карточку
Вашей организации. Эти сведения необходимы для подготовки и высылки
Вам счета-фактуры.
- ☐ Заполненный купон и копию платежного поручения вышлите по e-mail:
info@fire-smi.ru, mail@firepress.ru в отдел распространения.
- ☐ Оплату за подписку Вы можете произвести по следующим реквизитам:
ООО “Издательство “ПОЖНАУКА”
Почтовый адрес: 121352, г. Москва, а/я 43
ИНН / КПП 7731652572 / 773101001
Р/с 40702810930130056301 в ОАО “Промсвязьбанк” г. Москва
К/с 30101810400000000555
БИК 044525555
Главный редактор — *Корольченко Александр Яковлевич*

**По вопросам подписки просьба обращаться по телефонам
(495) 228-09-03, 8-909-940-01-85**

ПОДПИСКА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ:

через ООО “Издательство “Пожнаука”;
через агентство “РОСПЕЧАТЬ”, индекс 83340;
через агентство “АПР”, индекс 83647
(в любом почтовом отделении в каталоге
“Газеты и журналы”);

через подписные агентства:
ООО “Интер-Почта 2003”, ООО “ИНТЕР-ПОЧТА-РЕГИОН”,
ООО “Урал-Пресс XXI”, ООО “Информнаука”,
ЗАО “МК-ПЕРИОДИКА”



SfiteX

St. Petersburg International Security & Fire Exhibition

ufi
Approved
Event

11–13 НОЯБРЯ 2014

Место проведения:

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

ОХРАНА И БЕЗОПАСНОСТЬ

23-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА



РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

- ⊗ Охранная сигнализация
- ⊗ Охранное телевидение и наблюдение
- ⊗ Системы контроля и управления доступом, идентификация
- ⊗ Системы и средства пожарной безопасности
- ⊗ Инженерно-технические, механические и электронные средства безопасности
- ⊗ Антитеррористическое и досмотровое оборудование
- ⊗ Системы связи и оповещения
- ⊗ Средства личной безопасности и экипировка
- ⊗ Гражданская защита и промышленная безопасность
- ⊗ Безопасность транспортных средств. Специальный транспорт. Средства обеспечения безопасности дорожного движения
- ⊗ Криминалистическая техника
- ⊗ Услуги

Организаторы:



ЗАБРОНИРУЙТЕ СТЕНД!

+7 (812) 380 6009/00

security@primexpo.ru

www.sfitex.ru