

3-2016

ПОЖ Издательство
НАУКА

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0869-7493

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая

ОГНЕСТОЙКОСТЬ
ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С ДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ
ЭКСПЛУАТАЦИИ



25–27 мая

Красноярск



2016



При поддержке Национального
антитеррористического комитета

XII Всероссийский специализированный форум-выставка

АНТИТЕРРОР

современные
системы
безопасности

- Технические средства и системы безопасности
- Инженерно-технические средства физической защиты
- Пожарная безопасность
- Аварийно-спасательное оборудование
- Транспорт
- Экипировка. Индивидуальные средства защиты
- Информационная безопасность
- Безопасность промышленного комплекса

*Более 8000 посетителей со всей России!
Масштабная выставка спецтехники
Деловая программа с участием федеральных властей*



сибирь
международный
выставочно-деловой центр
имени Карена Мурадяна

Организаторы:



РЕКЛАМА

МВДЦ «СИБИРЬ», ул. Авиаторов, 19
тел. (391) 22-88-400, 22-88-611 – круглосуточно
ccb@krasfair.ru **www.krasfair.ru**

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

COMBUSTION AND EXPLOSION PROCESSES

ГОРЕВ В. А., ФОМИНА М. В.
Упрощенный расчет теплообмена
на плоских поверхностях

5

GOREV V. A., FOMINA M. V.
Simplified calculation of heat
on a flat surface

ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

FIRE-AND-EXPLOSION HAZARD OF SUBSTANCES AND MATERIALS

АЛЕКСЕЕВ С. Г., АВДЕЕВ А. С.,
БАРБИН Н. М., КОТОВСКАЯ С. К.
Показатели пожаровзрывоопасности
противовирусного лекарственного средства
“Триазид” и его основных полупродуктов

КОРОЛЕВ Д. С., КАЛАЧ А. В., КАРГАШИЛОВ Д. В.
Прогнозирование температуры вспышки
с помощью нейропакета КДС 1.0 на примере
сложных эфиров масляной кислоты

СУНЦОВ Ю. К., СОРОКИНА Ю. Н.,
ЧУЙКОВ А. М., ГОРЮНОВ В. А.
Взаимосвязь энергии Гельмгольца с температурой
вспышки веществ в гомологических рядах
n-алкилэтаноатов, *n*-спиртов и кетонов

15

ALEXEEV S. G., AVDEEV A. S.,
BARBIN N. M., KOTOVSKAYA S. K.
Characteristics of fire and explosive properties
of antiviral drug Triazid and its main
semiproducs

21

KOROLEV D. S., KALACH A. V., KARGASHILOV D. V.
Forecasting of flash point by means of KDS 1.0
neuropackage on the example of esters
of oleic acid

27

SUNTSOV Yu. K., SOROKINA Yu. N.,
CHUYKOV A. M., GORYUNOV V. A.
Helmholtz energy interrelation with a flash point
for compounds in homologous series
of *n*-alkyl ethanoates, *n*-alcohols and ketones

ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

FIRE-RESISTANCE OF BUILDING CONSTRUCTIONS

МАКИШЕВ Ж. К., СИВЕНКОВ А. Б.
Огнестойкость деревянных конструкций
с длительным сроком эксплуатации

34

MAKISHEV Zh. K., SIVENKOV A. B.
Fire resistance of wooden structures
a long life span

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

FIRE SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

ОРЛОВ Г. Г., КОРОЛЬЧЕНКО А. Д.
Нагрузки, разрушающие строительные конструкции
в результате аварийных взрывов

45

ORLOV G. G., KOROLCHENKO A. D.
Loadings which destroy building structures
in consiquence of emergency explosions

СТАТИСТИКА И АНАЛИЗ ПОЖАРОВ

STATISTIC AND ANALYZE OF FIRE

КАЙБИЧЕВ И. А., КАЙБИЧЕВА Е. И.
Индекс пожаров в Российской Федерации
за 2006–2010 годы

57

KAIBICHEV I. A., KAIBICHEVA E. I.
Fire index in Russian Federation
for 2006–2010 years

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

MEANS AND WAYS OF FIRE EXTINGUISHING

КОРОЛЬЧЕНКО Д. А., ШАРОВАРНИКОВ А. Ф.
Анализ типового соотношения для описания
зависимости времени тушения горючих жидкостей
и удельного расхода различных огнетушащих веществ
от интенсивности их подачи

66

KOROLCHENKO D. A., SHAROVARNIKOV A. F.
Analysis of a typical relation used for description
of dependence of the extinguishing time
of flammable liquids and the specific consumption
of various extinguishing agents on their flow rate

ВОПРОС – ОТВЕТ

77

QUESTION – ANSWER

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

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

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

Перепечатка материалов журнала “Пожаровзрывобезопасность” только по согласованию с редакцией. При цитировании ссылка обязательна. Авторы и рекламодатели несут ответственность за содержание представленных в редакцию материалов и публикацию их в открытой печати. Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов опубликованных материалов.



Показатели пожаровзрывоопасности "Триазид"



Огнестойкость древесины с длительным сроком службы

Стр. 15

Стр. 34



Разрушающие нагрузки при взрывах

Стр. 45



Индекс пожаров в РФ за 2006–2010 годы

Стр. 57

Стр. 66



Типовое соотношение для описания процесса тушения

Председатель Редакционного совета:

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

Зам. председателя Редакционного совета:

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

Редакционный совет:

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

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

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

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

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

Ройтман В. М., д. т. н., профессор, академик НАНПБ
и ВАНКБ, член-корреспондент Академии архитектурного
наследия (Россия)

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

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

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

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

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

Шилдс Т. Дж., профессор (Великобритания)

Редакция:

Главный редактор **Корольченко А. Я.**

Шеф-редактор **Соколова Н. Н.**

Редактор **Крылова Л. В.**

Учредитель —

ООО "Издательство "ПОЖНАУКА"

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

Адрес редакции:

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

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 43.

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

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

Подписано в печать 15.03.2016. Выход в свет 25.03.2016.

Формат 60x84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая. Печать офсетная.

Отпечатано в типографии ООО "УНИВЕРСАЛСЕРВИС"

(115193, г. Москва, ул. Петра Романова, д. 7, стр. 1).

**Founder:**

"POZHNAUKA" Publishing House, Ltd.

Editorial Staff:

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

Editorial director **Sokolova N. N.**

Editor **Krylova L. V.**

Address of Editorial Staff:

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

Post office box 43,
Moscow, 121352, Russia.

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

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

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

"Pozharovzryvobezопасnost"
("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 VINITI Database RAS
and in Russian Science Citation Index.
Information about the journal is annually
published in "Ulrich's Periodicals Directory".

Translate version of articles "Fire
and Explosion Safety" is included
in Chemical Abstract Service (CAS).

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

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

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

Signed for printing 15.03.2016

Date of publication 25.03.2016

Format is 60x84 1/8

Printing is 2000 copies

Chalk-overlay mat paper

Offset printing

Chairman of Editorial Board:

Korolchenko A. Ya.,

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

Deputy Chairman of Editorial Board:

Molkov V. V.,

Doctor of Technical Sciences, Professor (Great Britain)

Editorial Board:

Barbin N. M.,

Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Brushlinskiy N. N.,

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

Korolchenko D. A.,

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

Mishuev A. V.,

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

Puzach S. V.,

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

Roytman V. M.,

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

Serkov B. B.,

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

Tamrazyan A. G.,

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

Topolskiy N. G.,

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

Kholshchevnikov V. V.,

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

Shebeko Yu. N.,

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

Shields T. J.,

Professor (Great Britain)

В. А. ГОРЕВ, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: kafedrapb@yandex.ru)

М. В. ФОМИНА, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

УДК 624.012

УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА НА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Для определения температуры поверхности тела и теплового потока, идущего внутрь его, явным образом использованы величины, заданные в виде начальных и граничных условий, а также данные об источнике тепла и тепловых характеристиках приемника тепла. Представлены решения, охватывающие отдельно случай термически тонкого тела, когда критерий Био $Bi < 0,14$; случай термически толстого тела, когда число Фурье $Fo < 0,5$. Рассмотрен общий случай $Bi > 0,14$ для нескольких диапазонов числа Bi .

Ключевые слова: пластина; теплопроводность; число Био Bi ; число Фурье Fo ; время прогрева пластины; время прогрева поверхности.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.5-14

Введение

При изучении многих процессов, связанных с теплообменом на границе *среда – конструкция*, необходимо знать, как изменяется температура поверхности конструкции. Это позволит облегчить определение температуры нагрева или охлаждения конструкции, скорости кипения жидкости на горячей поверхности, а также оценить время достижения критических условий воспламенения на поверхности. При построении физических моделей, в которых используются сведения о температуре поверхности конструкции и величине теплового потока на ее границах, полезно иметь обозримые аналитические выражения для указанных величин [1].

Существующие решения уравнения теплопроводности для пластин и полубесконечного пространства громоздки и труднообозримы, так как выражаются через бесконечный ряд или табулированные спецфункции [2–4].

В предлагаемой работе предпринята попытка получить в конечных выражениях изменение температуры поверхности и величины теплового потока для случая одномерного распространения тепла в пластине и в полубесконечном пространстве.

1. Случай термически тонкого тела

Рассмотрим задачу о прогреве (охлаждении) бесконечной пластины толщиной δ , на границах которой происходит теплообмен по закону:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \alpha(T_c - T_n) \text{ при } x=0; \\ q_2 &= 0 \text{ при } x=\delta \text{ (поверхность} \\ &\quad \text{теплоизолирована),} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где α — коэффициент теплоотдачи со стороны среды; T_c , T_n — температура соответственно среды и обогреваемой поверхности пластины.

Одномерное уравнение теплопроводности через пластину с граничными условиями (1) и начальным условием $T_{(x, 0)} = T_0$ имеет вид:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2)$$

где C_p , ρ , λ — удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала конструкции соответственно.

После интегрирования по толщине пластины уравнения (2) с учетом граничных условий (1) получаем:

$$C_p \rho \delta \frac{\partial \bar{T}(t)}{\partial t} = \alpha(T_c - T_n), \quad (3)$$

где δ — толщина пластины;

$\bar{T}(t)$ — средняя температура пластины;

$$\bar{T}(t) = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T(x, t) dx.$$

Данные о теплофизических характеристиках сред и материалов представлены, например, в [5–8].

Для твердых тел плотность практически не зависит от температуры. Теплоемкость C_p для чистых элементов и простых веществ с изотропными свой-

ствами слабо зависит от температуры, если последняя превышает дебаевскую [9]. Правило Дюлонга – Пти дает значение $C_p = 25000/\mu$ (где μ — молярная масса).

Коэффициент теплоотдачи α зависит от свойств среды и характера ее движения со стороны теплоподвода. Эта зависимость определяется через критерий Нуссельта:

$$\alpha = \text{Nu} \lambda_c / l_x,$$

где Nu — число Нуссельта; часто представляется в виде: $\text{Nu} = C \text{Re}^m \text{Pr}^n$ или $\text{Nu} = C_1 \text{Gr}^m \text{Pr}^n$;

C, C_1, m, n — константы, зависящие от режима движения среды (соответственно ламинарный, переходный, турбулентный);

Re — число Рейнольдса;

Pr — число Прандтля;

Gr — критерий Грассхофа, используемый при естественной конвекции;

λ_c — коэффициент теплопроводности среды;

l_x — характерный размер поверхности теплообмена в направлении движения среды.

Свойства среды представлены коэффициентом теплопроводности, вязкостью и теплоемкостью. Эти величины входят в определение чисел Прандтля, Рейнольдса и Грассхофа:

$$\text{Pr} = \mu_c C_{pc} / \lambda_c;$$

$$\text{Re} = U l_x \rho_c / \mu_c;$$

$$\text{Gr} = \frac{\beta_c l_x^3 g (T_c - T_n)}{\nu_c^3},$$

где μ_c — динамическая вязкость среды;

C_{pc} — удельная теплоемкость среды;

U — характерная скорость среды;

ρ_c — плотность среды;

β_c — коэффициент объемного расширения;

g — ускорение свободного падения;

ν_c — кинематическая вязкость среды; $\nu_c = \mu_c / \rho_c$.

Для газов $\text{Pr} \sim 1$, в частности для воздуха $\text{Pr} = 0,74$.

Более подробно об определении коэффициентов теплоотдачи изложено в [10–13]. Часто конвективный теплообмен идет одновременно с лучистым теплообменом. Например, при потере тепла телом путем совместного действия излучения и конвекции тепловой поток q представляют в виде:

$$q = \alpha_\Sigma (T_n - T_c),$$

где α_Σ — суммарный коэффициент теплоотдачи;

$$\alpha_\Sigma = \alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}};$$

$\alpha_{\text{изл}}, \alpha_{\text{конв}}$ — коэффициенты теплоотдачи соответственно излучением и конвекцией.

Более подробно вопрос об определении $\alpha_{\text{изл}}$ освещен в специальной литературе [14–16].

Из уравнения (2) следует, что характерное время распространения тепловой волны по толщине пластины

$$t_1 = \frac{\delta^2 C_p \rho}{\lambda} = \frac{\delta^2}{\alpha},$$

где α — коэффициент температуропроводности материала конструкции (пластины).

Из уравнения (3) вытекает характерное время прогрева t_2 всей пластины под внешним воздействием:

$$t_2 = C_p \rho \delta / \alpha.$$

Связь между временем распространения тепла t_1 по толщине пластины и временем прогрева t_2 (изменение средней температуры во времени) имеет вид:

$$t_1 = t_2 \text{Bi},$$

где Bi — число Био; $\text{Bi} = \alpha \delta / \lambda$.

При условии $\text{Bi} = t_1 / t_2 \ll 1$ реализуется случай термически тонкого тела, когда температура по толщине пластины выравнивается по мере ее постепенного прогрева. В этом случае можно считать, что $\bar{T} = T_{\text{пл}} = T_{\text{пл}2}$, и уравнение (3) приводится к виду:

$$t_2 \frac{d\bar{T}}{dt} = (T_{c(t)} - \bar{T}(t)), \quad (4)$$

которое является линейным, а следовательно, даже при зависящей от времени температуры среды

$$\bar{T}(t) = T_0 e^{-t/t_2} + \frac{1}{t_2} \int_0^t T_{c(t)} e^{-(t-\tau)/t_2} d\tau, \quad (5)$$

где T_0 — начальная температура термически тонкого тела;

τ — переменная интегрирования от 0 до t .

При изучении термически тонких тел, кроме условия $\text{Bi} \ll 1$, необходимо иметь в виду, что время изучения процесса t должно удовлетворять условию $t/t_1 > 1$, т. е. тепловая волна должна, по крайней мере, пройти через толщину пластины. Это условие можно выразить так: $\text{Fo} = \alpha t / \delta^2 > 1$, где Fo — число Фурье.

Пример

Термически тонкое тело с одной стороны изолировано, а с другой — температура среды изменяется по закону $T_c = T_0 e^{t/t_c}$ (где t_c — характерное время изменения температуры среды в помещении на начальной стадии пожара при постоянной площади пожара) [17].

Подставив в (4) $t_2 = C_p \rho \delta / \alpha$ и $T_c = T_0 e^{t/t_c}$, получим выражение изменения температуры термически тонкого тела:

$$\bar{T}(t) = \frac{T_0}{1 + \frac{t_2}{t_c}} \left[e^{t/t_c} + \frac{t_2}{t_c} e^{-t/t_2} \right].$$

В случае если в предыдущем примере температура среды T_c — величина постоянная, решение имеет вид:

$$\frac{\bar{T}(t) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - e^{-t/t_2}. \quad (6)$$

При определенных условиях температура тела может достичь таких значений, что возникает необходимость учитывать излучение тела наружу. В случае если на тело падает постоянный поток $q_{\text{п}}$, он может иметь конвективную или радиационную природу, а потери тепла в окружающую среду обуславливаются совместным действием конвекции и излучения с суммарным коэффициентом теплоотдачи α_{Σ} . Тогда температура тонкого тела будет определяться выражением

$$\bar{T}(t) - T_0 = \frac{q_{\text{п}}}{\alpha_{\Sigma}} (1 - e^{-t/t_2}), \quad (7)$$

где $t_2 = C_p \rho \delta / \alpha_{\Sigma}$.

Пример

Горячий неизлучающий газ с температурой $T_c = \text{const}$ обменивается теплом с термически тонким телом, имеющим начальную температуру T_0 . По мере нагревания тела его температура поднимается до значений, при которых необходимо учитывать потерю тепла излучением в окружающее пространство. Причем окружающая среда пропускает излучение, не поглощая его. Тело излучает по закону $q_{\text{п}} = \varepsilon \sigma \times (\bar{T}^4 - T_0^4)$ (где ε — степень черноты поверхности конструкции; σ — постоянная Стефана). Теплообмен между средой и телом характеризуется коэффициентом теплоотдачи α_1 .

Уравнение (3) в данном случае будет иметь вид:

$$C_p \rho \delta \frac{d\bar{T}}{dt} = \alpha_1 (T_c - \bar{T}) - \varepsilon \sigma (\bar{T}^4 - T_0^4).$$

Из-за четвертой степени $\bar{T}^4$ уравнение интегрируется не просто, поэтому прибегаем к процедуре линеаризации, суть которой заключается в приравнивании выражений:

$$\bar{T}^4 - T_0^4 = \frac{T_c^4 - T_0^4}{T_c - T_0} (\bar{T} - T_0).$$

Это равенство тем лучше выполняется, чем ближе значения $\bar{T}$ и T_c . При сделанном предположении уравнение теплообмена сведется к следующему виду:

$$C_p \rho \delta \left(\frac{dT}{dt} \right) = \alpha_{\Sigma} (T_c^* - \bar{T}),$$

где $\alpha_{\Sigma} = \alpha_1 + \alpha_2$; $\alpha_2 = \varepsilon \sigma \frac{T_c^4 - T_0^4}{T_c - T_0}$;

$$T_c^* = \frac{\alpha_1 T_c + \alpha_2 T_0}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

В результате решение для температуры тела примет вид:

$$\bar{T}(t) = T_0 + \frac{\alpha_1 (T_c - T_0)}{\alpha_{\Sigma}} (1 - e^{-\alpha_{\Sigma} t / (C_p \rho \delta)}). \quad (8)$$

Более просто решение получается с использованием выражения (7), если вспомнить, что $q_{\text{п}} = \alpha_1 \times (T_c - T_0)$.

Решение (8) примечательно тем, что дает предельное значение температуры тела $\bar{T}$ при $t \rightarrow \infty$ в виде $\bar{T} \rightarrow T_0 + \alpha_1 (T_c - T_0) / \alpha_{\Sigma}$, которое отличается от предельного значения при отсутствии радиационных потерь, когда $\bar{T} \rightarrow T_c$. Случай с переменной температурой среды не должен вызывать затруднений с учетом (5).

Ситуация, когда термически тонкое тело отделяет друг от друга две среды с различными температурами и свойствами, сводится к (5) или (6), если принять

$$t_2 = \frac{C_p \rho \delta}{\alpha_1 + \alpha_2}; \quad T_c = \frac{\alpha_1 T_{c1} + \alpha_2 T_{c2}}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

Точность результатов для термически тонкого тела зависит от строгости выполнения условия $Bi \ll 1$, которое для конвективного теплообмена сводится к условию

$$Nu \ll l\lambda / (\delta \lambda_c).$$

Для турбулентного режима при вынужденной конвекции в газовой среде это неравенство эквивалентно $\delta \ll 30 l\lambda / (Re^{0.8} \lambda_c)$.

При более интенсивном теплообмене, например при кипении, коэффициент теплоотдачи составляет несколько тысяч, и тогда условие $Bi \ll 1$ эквивалентно условию $\delta \ll \lambda / \alpha_{\text{кип}}$, которое для большинства строительных материалов равносильно требованию $\delta \ll 2,5 \cdot 10^{-4}$ м, для металлов — $\delta \ll 10^{-2}$ м. Для теплоизоляционных материалов это условие практически не выполнимо, т. е. $\delta \ll 10^{-5}$ м.

В случае радиационного теплообмена $\alpha \approx (50 \div 100) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, и тогда условие $Bi \ll 1$ равносильно $\delta \ll \lambda / \alpha_{\text{изл}}$, что соответствует $\delta \ll 2 \cdot 10^{-2}$ м для строительных материалов, $\delta \ll 1$ м — для металлов. Для теплоизоляционных материалов $\lambda = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; $\delta \ll 10^{-3}$ м.

2. Термически толстые конструкции

Случай термически толстого тела реализуется в течение времени, когда передний фронт теплового возмущения не успевает дойти до противоположной поверхности или не успевает встретиться с тепловым фронтом, распространяющимся с противоположной стороны.

Это условие формулируется как $t < (\delta^2 / \alpha) Fo^*$ (где Fo^* — предельное число Фурье; $Fo^* = 0,5$ — для одностороннего теплообмена, $Fo^* = 1$ — для двух-

стороннего. Иногда предельное значение Fo^* снижают до 0,3 и 0,6 соответственно).

В случае постоянства падающего теплового потока на поверхность термически толстого тела температуру поверхности можно определить по соотношению [15]:

$$\alpha_{\Sigma}(T_{\text{п}} - T_0) = q_{\text{п}} \left[1 - f\left(\frac{t}{t_3}\right) \right], \quad (9)$$

а величину теплового потока, идущего внутрь тела, — по формуле

$$q_{\text{в}} = q_{\text{п}} f(t/t_3), \quad (10)$$

где t_3 — характерное время изменения температуры обогреваемой поверхности; $t_3 = \lambda \rho C_p / \alpha_{\Sigma}^2$;

$$f\left(\frac{t}{t_3}\right) = \exp \frac{t}{t_3} \operatorname{erfc}\left(\frac{t}{t_3}\right)^{1/2}. \quad (10a)$$

Функция $\operatorname{erfc} x = 1 - \operatorname{erf} x$, где $\operatorname{erf} x$ — интеграл ошибок [18–20].

Напомним, что в случае конвективного теплообмена со средой $q_{\text{п}} = \alpha(T_c - T_0)$, где α — коэффициент теплоотдачи, определяемый через число Nu. Суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\Sigma} = \alpha + \alpha_{\text{изл}}$, если поверхность тела нагрета до такой температуры, что следует учитывать излучение от нее.

Если на тело первоначально падает поток, образуемый излучением и конвекцией по закону $q_{\text{п.конв}} = \alpha(T_c - T_0)$, то суммарный падающий поток $q_{\text{п}\Sigma} = q_{\text{п.изл}} + q_{\text{п.конв}}$, а α_{Σ} , как и прежде, будет равен $\alpha + \alpha_{\text{изл}}$.

Воспользовавшись представлениями функции $f(t/t_3)$ для случаев $t/t_3 \ll 1$ и $t/t_3 \gg 1$ [10], можно получить выражение для температуры поверхности и теплового потока, идущего внутрь тела, для этих предельных случаев:

$$T_{\text{п}} - T_0 = \frac{2q_{\text{п}}}{\alpha_{\Sigma} \sqrt{\pi}} \left(\frac{t}{t_3} \right)^{1/2}, \quad \left. \begin{array}{l} t/t_3 \ll 1; \end{array} \right\} \quad (11)$$

$$T_{\text{п}} - T_0 = \frac{2q_{\text{п}}}{\alpha_{\Sigma} \sqrt{\pi}} \left(\frac{t}{t_3} \right)^{1/2} \left[1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{t}{t_3} \right)^{1/2} \right]; \quad (11a)$$

$$q_{\text{в}} = q_{\text{п}} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{t}{t_3} \right)^{1/2} \right], \quad \left. \begin{array}{l} t/t_3 < 1; \end{array} \right\} \quad (12)$$

$$q_{\text{в}} = q_{\text{п}} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{t}{t_3} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{t}{t_3} \right)^{1/2} \right) \right]. \quad (12a)$$

Выражения (11a) и (12a) получены с точностью до t/t_3 , а (11) и (12) — только до членов $(t/t_3)^{1/2}$.

Соответственно, для случая $t/t_3 \gg 1$:

$$T_{\text{п}} - T_0 = \frac{q_{\text{п}}}{\alpha_{\Sigma}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\pi(t/t_3)}} \right); \quad (13)$$

$$q_{\text{в}} = q_{\text{п}} / \sqrt{\pi(t/t_3)}. \quad (13a)$$

В табл. 1 представлены результаты вычислений величины $[1 - f(t/t_3)]$, когда $f(t/t_3) = \exp(t/t_3) \times \operatorname{erfc}(t/t_3)^{1/2}$ (графа 2), по формуле (11) (графа 3), по выражению (11a) до значений $t/t_3 = 0,40$ (графа 4), по выражению (13) (графа 5), по выражениям (15) и (15a) (графа 6, $\gamma = 1$; графа 7, $\gamma = 1,4$).

В графе 8 для сравнения представлены значения $1 - A_1 \cos \mu_1 e^{-\mu_1^2 Fo}$ для $Fo = 0,5$, причем A_1 и μ_1 (учитывается только первый член ряда (16)) взяты из таблицы [3]. Содержание граф (9), (10), (11) понятно из табл. 1.

Решение по (15) получается следующим образом. Проинтегрируем уравнение (2) по x от 0 до $x_1(t)$ (где $x_1(t)$ — передовая граница зоны распространения температурного возмущения вглубь конструкции). В результате получим выражение

$$x_1 \frac{dT}{dx_1} \frac{dx_1}{dt} = \left| \frac{dT}{dx} \right|_{x=0}.$$

Сделав предположение, что существует связь между $\left| \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \gamma(t) \frac{dT}{dx_1}$ и $\frac{dT}{dx_1} = \frac{T_{\text{п}} - T_0}{x_1}$ (где $\gamma(t)$ — слабоменяющаяся функция времени), увидим, что последние выражения эквивалентны следующим:

$$x_1 = \sqrt{2\gamma(t)\alpha t}; \quad (14)$$

$$T_{\text{п}} - T_0 = \frac{q_{\text{п}}}{\alpha_{\Sigma}} \frac{\left(\frac{2}{\gamma(t)} \frac{t}{t_3} \right)^{1/2}}{1 + \left(\frac{2}{\gamma(t)} \frac{t}{t_3} \right)^{1/2}}; \quad (15)$$

$$q_{\text{в}} = \frac{q_{\text{п}}}{1 + \left(\frac{2}{\gamma(t)} \frac{t}{t_3} \right)^{1/2}}. \quad (15a)$$

Анализ табл. 1 показывает, что при малых значениях t/t_3 ($t/t_3 \ll 1$) выражение (11) сохраняет приемлемую точность до значений $t/t_3 \approx 10^{-2}$, при больших значениях ($t/t_3 > 8$) хорошую точность ($\sim 2\%$) дает выражение (13). Выражение (15) при $\gamma = 1,4$ дает хорошую точность в широком диапазоне изменения t/t_3 — от 0 до 0,4. Однако выражение (15) немного сложнее, чем (11). Результаты, полученные с помощью формулы (11), превышают точное значение при любых значениях t/t_3 , а с помощью выражения (15) с $\gamma = 1,4$ — при $t/t_3 \leq 9 \cdot 10^{-2}$. При $t/t_3 > 9 \cdot 10^{-2}$ вычисление по выражению (15) с $\gamma = 1,4$ постепенно дает заниженные значения, поэтому при $t/t_3 \geq 0,4$ уже следует переходить на вычисления по выражению (15) с $\gamma = 1$, а при $t/t_3 > 8$ — по выражению (13).

Выражение (14), по существу, дает возможность определить, является ли рассматриваемая конст-

Таблица 1. Результаты вычислений $1 - f(t/t_3)$ по различным формулам

t/t_3	$1 - \exp(t/t_3) \times \times \operatorname{erfc}(t/t_3)^{1/2}$	(11)	(11a)	(13)	(15), $\gamma = 1$	(15), $\gamma = 1,4$	$1 - A_1 \cos \mu_1 \times \times e^{-\mu_1^2 Fo}$	(20)–(24), $1,2 < Bi \leq 3$	(19), $Bi < 1,2$	(25), $Bi \geq 3$	Bi ($Fo = 0,5$)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$4 \cdot 10^{-4}$	0,022	0,022	0,022		0,027	0,023	0,022		0,0238		0,0283
10^{-2}	0,103	0,113	0,103		0,124	0,107	0,104		0,109		0,1414
$4 \cdot 10^{-2}$	0,191	0,226	0,186		0,220	0,193	0,198		0,200		0,2830
$9 \cdot 10^{-2}$	0,265	0,338	0,250		0,298	0,265	0,275		0,282		0,4243
0,16	0,329	0,451	0,290		0,361	0,324			0,346		0,5657
0,36	0,432	0,680	0,320		0,459	0,419			0,450		0,8485
0,49	0,500				0,497	0,460	0,493		0,490		0,9900
0,64	0,511				0,530	0,490	0,526		0,512		1,1314
0,81	0,560				0,560	0,520	0,559	0,560	0,530		1,2728
1	0,572			0,436	0,586	0,545	0,591	0,578	0,540		1,4140
1,44	0,620				0,630	0,590	0,642	0,634	0,747		1,7000
1,823	0,650				0,656	0,620	0,674	0,665			1,9090
2,25	0,680			0,620	0,680	0,643	0,705	0,691		0,640	2,1200
4	0,740			0,720	0,740	0,706	0,765	0,758		0,734	2,8300
9	0,840			0,800	0,810	0,783	0,820			0,830	4,2430
16	0,855			0,086	0,850	0,830	0,860			0,876	5,6520
25	0,887			0,890			0,910			0,903	7,0100

рукция термически толстым телом, т. е. применимы ли соотношения (11)–(15) к определению температуры поверхности и теплового потока внутрь конструкции. При $x_1 < \delta$ реализуется случай термически толстого тела.

В случае если стоит задача исследовать конструкцию толщиной δ из материала с коэффициентом температуропроводности α , время, в течение которого конструкция остается термически толстым телом, определяется из условия $t < \delta^2/(2\alpha)$ или $Fo < 0,5$.

В табл. 2 представлены ориентировочные данные по величине t_3 для сочетания различных процессов и материалов. Табл. 2 может служить ориентиром при выборе соотношения, которым следует воспользоваться для определения температуры поверхности тела или величины теплового потока, перешедшего внутрь конструкции.

Пример

Определить температуру поверхности бетонной плиты толщиной $\delta = 2 \cdot 10^{-1}$ м к моменту времени, соответствующему $Fo = 0,01$, если $\alpha = 5,6 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\rho = 2200$ кг/м³, $\lambda = 1,2$ Вт/(м·К).

Теплообмен происходит в результате:

1) конвекции, $\alpha = 60$ Вт/(м²·К), $T_c = 800$ К;

2) кипения жидкости с температурой кипения минус 42,7 °С, $\alpha = 6000$ Вт/(м²·К); начальная температура плиты $T_0 = 20$ °С.

Решение. Так как при указанных значениях числа Fo плиту можно считать термически толстым телом, воспользуемся равенством $t/t_3 = Fo Bi^2$.

При конвекции $Bi = \alpha\delta/\lambda = (60 \cdot 0,2)/1,2 = 10$, при кипении $Bi = (600 \cdot 0,2)/1,2 = 10^3$.

При кипении для данного значения числа Fo $t/t_3 > 10$, поэтому применима формула (13). Следовательно

$$T_n = T_0 + (T_c - T_0) \left[1 - 1/\sqrt{\pi Fo Bi^2} \right];$$

$$T_n = T_c - (T_c - T_0) \left(1/\sqrt{\pi Fo Bi^2} \right).$$

Вычисления в этом случае дают значение $T_n = -38,9$ °С.

При конвекции $t/t_3 = Fo Bi^2 = 1$, поэтому применима формула (15) с $\gamma = 1$:

$$\begin{aligned} T_n &= T_c - (T_c - T_0) \frac{\left(2 \frac{t}{t_3} \right)^{1/2}}{1 + \left(2 \frac{t}{t_3} \right)^{1/2}} = \\ &= 239 + (800 - 293) \frac{(2 \cdot 1)^{1/2}}{1 + (2 \cdot 1)^{1/2}} = \\ &= 293 + 507 \frac{1,414}{2,414} = 509 \text{ К}. \end{aligned}$$

Таблица 2. Значение величины t_3 для различных сочетаний материалов поверхностей и режимов теплообмена и времени достижения условия $Fo = 0,5$ для различных толщин δ

Материал	Процесс*	α , Вт/(м ² ·°C)	t_3 , с	Время t , с, при $Fo = 0,5$ и толщине пластины δ , м		
				10^{-3}	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$
Теплоизолятор ($\lambda \rho C_p$) = 5200 $\alpha = 3 \cdot 10^{-7}$ м ² /с	1	12	36	11,66	664	68400
	2	80	0,8			
	3	6000	$1,4 \cdot 10^{-4}$			
Дерево (сосна) ($\lambda \rho C_p$) = $2,1 \cdot 10^5$ $\alpha = 9,4 \cdot 10^{-8}$ м ² /с	1	12	1458	5,3	2120	212000
	2	80	32,8			
	3	6000	$5,8 \cdot 10^{-3}$			
Бетон, кирпич ($\lambda \rho C_p$) = $1,25 \cdot 10^6$ $\alpha = 5,8 \cdot 10^{-7}$ м ² /с	1	12	8680	0,86	344	34400
	2	80	195			
	3	6000	$3,4 \cdot 10^{-2}$			
Сталь ($\lambda \rho C_p$) = $1,9 \cdot 10^8$ $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м ² /с	1	12	137500	0,033	13,3	1333
	2	80	3094			
	3	6000	0,55			

* 1 — процесс конвекции в газовой среде с коэффициентом теплоотдачи при $\alpha = 12$ Вт/(м²·K); 2 — радиационный теплообмен; 3 — высокоинтенсивный процесс теплообмена при кипении.

3. Общий случай.

Пластина произвольной толщины

В общем случае для плоской пластины толщиной δ при граничных условиях

$$\alpha(T_c - T_n) = \left| \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad \text{и} \quad \left| \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = 0$$

и начальных условиях $T_{(x,0)} = T_0$ решение имеет вид бесконечного ряда [3]:

$$\frac{T_n - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (16)$$

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}, \quad (17)$$

где μ_n — корни уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu_n = \mu_n / \text{Bi}. \quad (18)$$

Особенность корней уравнения (18) состоит в том, что эти корни возрастают с увеличением номера: при малых значениях Bi первый корень $\mu_1 \approx \text{Bi}^{1/2}$, а при больших значениях Bi — $\mu_1 \approx \pi/2$. Далее корни растут, увеличиваясь примерно на π .

Если учесть, что зависимость решения (16) от времени определяется множителем $\exp(-\mu_n^2 Fo)$, то с увеличением номера корня этот множитель значительно уменьшается. Кроме того, уменьшается с ростом номера корня и величина A_n , которая к тому же является знакопеременной. В результате отмеченных свойств величин μ_n и A_n ряд (16) быстро сходится, и при $Fo > 0,5$ учет только одного первого члена ряда обеспечивает точность для температуры поверхности 0,5 % [3]. При предыдущем рассмотрении термически толстых тел было установлено, что

для $Fo < 0,5$ при определении температуры поверхности, а следовательно, и потока тепла внутрь конструкции, справедливо использовать выражения для термически толстого тела.

Таким образом, для $Fo > 0,5$ достаточно взять только один первый член ряда. Однако значения μ_n и A_n зависят от Bi, поэтому необходимо пользоваться таблицами значений $\mu_n(\text{Bi})$ и $A_n(\text{Bi})$, что неудобно. Из [3] можно увидеть, что при изменении Bi от 0 до ∞ значения μ_1 изменяются от $\text{Bi}^{1/2}$ до $\sim \pi/2$, A_n — от 1 до 1,2732, а $\cos \mu_1$ — от 1 до 0.

Далее предпринимается попытка получить аналитические выражения для первого члена ряда при различных значениях Bi, а следовательно, и μ_1 .

Для случая $\mu_1 < 1$ при исследовании процедуры разложения величин $A_1 \cos \mu_1$ и $\operatorname{tg} \mu_1$ получены следующие значения:

$$\mu_1^2 = \text{Bi} - (1/3)\text{Bi}^2;$$

$$A_1 \cos \mu_1 = \frac{1 - (2/3)\text{Bi} + (2/9)\text{Bi}^2}{1 - (1/3)\text{Bi} + (1/9)\text{Bi}^2}.$$

Таким образом, при $\mu_1 < 1$ решение (16) при $Fo > 0,5$ можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{T_n - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \frac{1 - (2/3)\text{Bi} + (2/9)\text{Bi}^2}{1 - (1/3)\text{Bi} + (1/9)\text{Bi}^2} \times \\ \times \exp(-\text{Bi} + (1/3)\text{Bi}^2)Fo. \end{aligned} \quad (19)$$

При больших значениях Bi величина $\mu_1 \rightarrow \pi/2$, и если предположить, что $\pi/2 - \mu_1 = x \ll 1$, то из (18) следует $(\text{Bi} + 1)x + (x^3/3)\text{Bi} = \pi/2$.

Из приближенного решения этого уравнения следует:

$$x = x_0 \frac{\left(1 + \frac{2}{3} \frac{x_0^2}{Bi + 1}\right)}{\left(1 + \frac{x_0^2}{Bi + 1}\right)}; \quad (20)$$

$$\mu_1 = \mu_{10} \frac{\left(1 + \frac{1}{3} \frac{x_0^2}{Bi}\right)}{\left(1 + \frac{1}{3} \frac{x_0^2}{Bi + 1}\right)}, \quad (21)$$

где
$$x_0 = \frac{\pi}{2(Bi + 1)}; \quad (22)$$

$$\mu_{10} = \frac{\pi}{2} \frac{Bi}{Bi + 1}. \quad (23)$$

В результате первый член ряда выражения (16) будет иметь вид:

$$A_1 \cos \mu_1 e^{-\mu_1^2 Fo} = \frac{2x - \frac{4}{3}x^3}{\frac{\pi}{2} - \frac{2}{3}x^3} e^{-\mu_1^2 Fo}. \quad (24)$$

Для достаточно больших значений $Bi > 3$ последнее выражение упрощается и принимает вид:

$$A_1 \cos \mu_1 e^{-\mu_1^2 Fo} = \frac{2}{Bi + 1} e^{-\mu_1^2 Fo}. \quad (25)$$

В табл. 1 в графе 12 указано число Bi , соответствующее значению t/t_3 (графа 1) при условии, что $Fo = 0,5$, т. е. соответствует границе между термически толстым телом и условием применимости приближения только первого члена в выражении (16). Нетрудно заметить, что имеет место равенство для термически толстого тела $Fo \leq 0,5$:

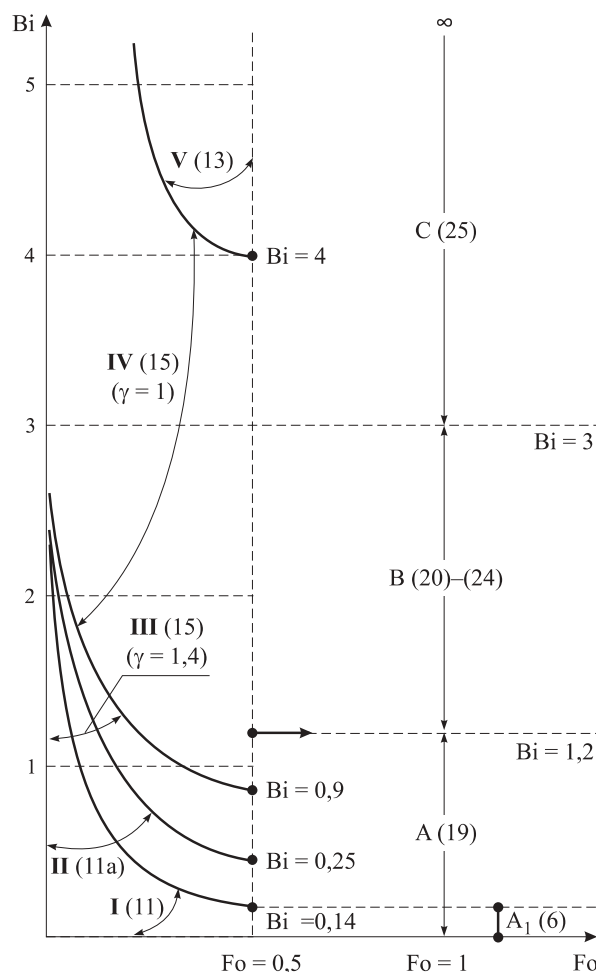
$$\frac{t}{t_3} = \frac{t \alpha^2 \delta^2 \varepsilon}{\lambda \rho C_p \delta^2 \varepsilon} = Fo Bi^2.$$

Таким образом, t/t_3 (см. графу 1 в табл. 1) можно рассматривать как рост времени, а значит, и Fo при постоянном значении Bi или, наоборот, как рост Bi при постоянной величине Fo . Поскольку мы взяли значение $Fo = 0,5$ как отделяющее условие использования только первого члена в выражении (16) при $Fo \geq 0,5$, а условие неприменимости этого приближения равносильно условию реализации ситуации термически толстого тела, то для $Fo \leq 0,5$ следует пользоваться выражениями (11)–(15) вместо нескольких членов ряда с данными, заимствованными из таблиц для каждого члена ряда.

Таким образом, в табл. 1 (графы 8–12) содержатся значения функции $(1 - f)$, где f — первый член ряда для случая $Fo \geq 0,5$. В табл. 1 представлены значения этой функции для $Fo = 0,5$. В графе (8) приведены данные, полученные с использованием таб-

личных значений μ_1 и A_1 , в графах 10 и 9 — данные, полученные для случая $Bi < 1,2$ (формула (19)) и $1,2 \leq Bi \leq 3$ (формулы (20)–(24)). Следует отметить, что для случая $Bi < 1,2$ используется приближение $\mu_1 < 1$, а для случая $1,2 \leq Bi \leq 3$ — условие $(\pi/2 - \mu_1) < 1$. В графе 11 приведены данные для случая $Bi \geq 3$, полученные по формуле (25), которая вытекает из (20)–(24), когда неравенство $\pi/2 - \mu_1 < 1$ выполняется более строго. В результате формулируется упрощенное правило определения температуры поверхности плоской конструкции, а значит, и теплового потока, идущего внутрь конструкции.

При $Fo < 0,5$ конструкция является термически толстым телом, и для $Bi \leq 0,9$ применимо соотношение (15) ($\gamma = 1$), а для $Bi \geq 4$ — соотношение (13). При $Fo \geq 0,5$ разбиение по диапазонам Bi на линии $Fo = 0,5$ изменяется. В случае малых Fo или Bi , т. е. при $t/t_3 < 10^{-2}$, удобно применять формулу (11), особенно для теоретического анализа процессов прогрета при малых временах прогрета — распространения горения, воспламенения от действия излучения. На рисунке в плоскости $Fo - Bi$ показаны зоны,



Различные области режимов теплообмена на плоской поверхности: I, II, III, IV, V — термически толстое тело, $Fo < 0,5$; A, B, C — $Fo > 0,5$; A_1 — термически тонкое тело

в которых применимы соответствующие результаты настоящей работы.

В части плоскости, соответствующей $Fo < 0,5$, пять зон. Зона I ограничена кривыми $Bi^2 Fo < 10^{-2}$. В этой зоне можно использовать выражение (11), которое является самым простым. Зона II включает в себя первую зону и ограничена сверху кривой $Bi^2 Fo = 9 \cdot 10^{-2}$. В этой зоне наиболее точные результаты дает выражение (11a). Зона III охватывает зоны I и II и ограничена сверху кривой $Bi^2 Fo = 0,405$. В этой зоне применимо соотношение (15) при $\gamma = 1,4$. Зона IV ограничена снизу зоной III, а сверху — кривой $Bi^2 Fo = 8$. В этой зоне наиболее удобно применять выражение (15) при $\gamma = 1$. Зона V ограничена снизу кривой $Bi^2 Fo = 8$, а сверху — не ограничена. Здесь наиболее удобно использовать выражение (13).

В части плоскости при $Fo > 0,5$ располагается зона A_1 , которая соответствует случаю термически

тонкого тела и ограничена условиями $Bi \leq 0,14$ и $Fo > 1$. Здесь применимо выражение (6). Зона A ограничена условиями $Bi \leq 1,2$ и $Fo > 0,5$, и в ней применимо выражение (19). Область B ограничена условиями $1,2 \leq Bi \leq 3$ и $Fo > 0,5$. Для вычисления температуры поверхности в этой зоне используются последовательно формулы (20)–(24). Область C ограничена условиями $Bi > 3$ и $Fo > 0,5$. Для определения температуры в ней используется выражение (25). Выражение (6) дает хорошие результаты и для случая $Fo < 1$.

Результаты работы могут быть использованы для определения как температур и величины тепловых потоков на поверхности тела, так и теплофизических характеристик тел (λ, ρ_0, C_p), если известны q_n и T_n , а также для расчета защиты огнестойкости конструкций при пожаре [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. — Введ. 01.06.2004. — М. : ФГУП ЦПП, 2004.
2. *Rocket J. A., Milke J. A.* Conduction of heat in solids // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. — Massachusetts : NFPA, 2002. — P. 1-27–1-43.
3. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности : учеб. пособие для вузов. — М. : Высшая школа, 1967. — 600 с.
4. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.* Теплопередача : учеб. для вузов. — М. : Энергия, 1975. — 488 с.
5. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М. : Наука, 1972. — 720 с.
6. *Федоров В. В., Бочаров Ю. Н., Барашков Р. Л. и др.* Методы расчета теплофизических свойств газов и жидкостей. — М. : Химия, 1974. — 248 с.
7. *Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р.* Горение: физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. Г. Л. Агафонова; под. ред. П. А. Власова. — М. : Физматлит, 2003. — 352 с.
8. *Корольченко А. Я., Корольченко Д. А.* Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник: в 2 ч. — 2-е изд. перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. I. — 713 с.
9. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. — М. : Наука, 1964. — 567 с.
10. *Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи. — М. : Энергия, 1977. — 344 с.
11. *Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е.* Техническая термодинамика : учеб. для вузов. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Изд. дом МЭИ, 2008. — 469 с.
12. *Кудинов А. А.* Тепломассообмен : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2012. — 375 с.
13. *Кутателадзе С. С., Борищанский В. Н.* Справочник по теплопередаче. — М.–Л. : Госэнергоиздат, 1958. — 414 с.
14. *Франк-Каменецкий Д. А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М. : Наука, 1987. — 492 с.
15. *Carslaw H. S., Jaeger J. C.* Conduction of heat in solids. — Oxford, UK : Oxford University, 1959. — 510 с.
16. *Rohsenow W. M., Hartnett J. P., Ganic E. N.* Handbook of heat transfer fundamentals. Second Edition. — New York : McGraw-Hill, 1985. — 1440 p.
17. *Кошмаров Ю. А.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пособие. — М. : Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
18. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М. : Наука, 1974. — 832 с.
19. *Nelson H. E., Forssell E. W.* Use of small-scale test data in hazard analysis // Fire Safety Science. — 1994. — Vol. 4. — P. 971–982. DOI: 10.3801/iafss.fss.4-971.
20. *Мышкис А. Д.* Математика для вузов. Специальные курсы. — М. : Наука, 1971. — 632 с.

21. Казиев М. М., Зубкова Е. В. Алгоритм защиты огнестойких светопрозрачных конструкций при пожаре // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2015. — № 3. — С. 71–77.

Материал поступил в редакцию 25 декабря 2015 г.

Для цитирования: Горев В. А., Фомина М. В. Упрощенный расчет теплообмена на плоских поверхностях // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.5-14.

English

SIMPLIFIED CALCULATION OF HEAT ON A FLAT SURFACE

GOREV V. A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: kafedrapb@yandex.ru)

FOMINA M. V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Physics, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

When building physical models of many processes are used information about the magnitude of the temperature of the structure surface and the heat flux into the design, you must have the foreseeable analytical expressions. Existing solutions to the heat equation for plates and semi-infinite space, hard understand as expressed through an infinite series of special functions or tabulated. Unfortunately, members of series are defined by the tables or graphes.

In the proposed work an attempt was made to get the final expressions to determine the surface temperature and the magnitude of the heat flow directed inside design.

These expressions must include values that define the decision problem — the initial and boundary conditions.

If the task addresses the following options:

- design is thermally thin body, when the Bio number is small ($Bi < 0.14$);
- design is thermally thick body, when the Fourier number $Fo < 0.5$, the condition means that the thermal perturbation has not reached the opposite border;
- body is not thermally thick, as $Fo > 0.5$, but is not thermally thin, because $Bi > 0.14$.

For a thermally thin body design temperature thickness has a constant value. For thermally thick body $Fo < 0.5$ there are defined three ranges of surface temperature determination. The first mode is determined by the product of $FoBi^2 < 0.01$ (of $Fo < 0.5$). The second mode is limited by the condition of $0.01 < FoBi^2 < 8$, a third mode is realized under condition $FoBi^2 < 8$.

As result there are derived the final expressions for determining surface temperature and heat flux inside the structure, which includes initial and boundary conditions, and does not require other additional information.

Keywords: plate; thermal conductivity; Bio number Bi ; Fourier number Fo ; while warming plate; while warming surface.

REFERENCES

1. *Set of rules 23-101-2004. Thermal performance design of buildings*. Moscow, Center of Design Production in Construction Publ., 2004 (in Russian).
2. Rocket J. A., Milke J. A. Conduction of heat in solids. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Massachusetts, NFPA, 2002, pp. 1-27–1-43.
3. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p.

4. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 488 p.
5. Vargaftik N. B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 720 p.
6. Fedorov V. V., Bocharov Yu. N., Barashkov R. L. et al. *Metody rascheta teplofizicheskikh svoystv gazov i zhidkostey* [Methods of calculation of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Khimiya Publ., 1974. 248 p.
7. Warnatz J., Maas U., Dibble R. W. *Combustion: physical and chemical fundamental, modeling and simulations experiments, pollutant formation*. Berlin, Springer, 2001. 299 p. (Russ. ed.: Varnatts Yu., Maas U., Dibbl R. Gorenkiye. Fizicheskiye i khimicheskiye aspekty, modelirovaniye, eksperimenty, obrazovaniye zagryaznyayushchikh veshchestv. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 352 p.).
8. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik. 2-e izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part I, 713 p.
9. Landau L. D., Lifshits E. M. *Statisticheskaya fizika* [Statistical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 567 p.
10. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 344 p.
11. Kirillin V. A., Sychev V. V., Sheyndlin A. Ye. *Tekhnicheskaya termodinamika. 5-e izd.* [Technical thermodynamics. 5th ed.]. Moscow, Izdatelskiy dom MEI Publ., 2008. 469 p.
12. Kudinov A. A. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow, INFRA-M Publ., 2012. 375 p.
13. Kutateladze S. S., Borishanskiy V. N. *Spravochnik po teploperedache* [Handbook of heat transfer]. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1958. 414 p.
14. Frank-Kamenetskiy D. A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 492 p.
15. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of heat in solids*. Oxford, UK, Oxford University, 1959. 510 p.
16. Rohsenow W. M., Hartnett J. P., Ganic E. N. *Handbook of heat transfer fundamentals*. Second Edition. New York, McGraw-Hill, 1985. 1440 p.
17. Koshmarov Yu. A. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [Forecasting of fire hazards in the case of indoor fire]. Moscow, State Fire Academy of Ministry of Interior of Russia Publ., 2000. 118 p.
18. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 832 p.
19. Nelson H. E., Forssell E. W. Use of small-scale test data in hazard analysis. *Fire Safety Science*, 1994, vol. 4, pp. 971–982. DOI: 10.3801/iafss.fss.4-971.
20. Myshkis A. D. *Matematika dlya vtuzov. Spetsialnyye kursy* [Mathematics for technical schools. Special courses]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 632 p.
21. Kaziev M. M., Zubkova E. V. Algoritm zashchity ognestoykikh svetoprozrachnykh konstruksiy pri pozhare [Protection algorithm for fire-resistant translucent structures in case of a fire]. *Pozhary i chezyvchaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya — Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2015, no. 3, pp. 71–77.

For citation: Gorev V. A., Fomina M. V. Uproshchennyi raschet teploobmena na ploskikh poverkhnostyakh [Simplified calculation of heat on a flat surface]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.5-14.

С. Г. АЛЕКСЕЕВ, канд. хим. наук, доцент, чл.-корр. ВАН КБ, старший научный сотрудник научно-инженерного центра “Надежность и ресурс больших систем и машин” УрО РАН (Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54а); старший научный сотрудник Уральского института ГПС МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; e-mail: Alexshome@mail.ru)

А. С. АВДЕЕВ, начальник сектора Судебно-экспертного учреждения ФПС “Испытательная пожарная лаборатория по Пермскому краю” (Россия, 614990, г. Пермь, ул. Большевикская, 53а); аспирант научно-инженерного центра “Надежность и ресурс больших систем и машин” УрО РАН (Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54а; e-mail: asipl@ugps.perm.ru)

Н. М. БАРБИН, д-р техн. наук, канд. хим. наук, заведующий кафедрой химии Уральского государственного аграрного университета (Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42); старший научный сотрудник Уральского института ГПС МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; e-mail: NMBarbin@mail.ru)

С. К. КОТОВСКАЯ, канд. хим. наук, старший научный сотрудник Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: sk-kotovskaya-665@yandex.ru)

УДК 614.841:547.859

ПОКАЗАТЕЛИ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ ПРОТИВОВИРУСНОГО ЛЕКАРСТВЕННОГО СРЕДСТВА “ТРИАЗИД” И ЕГО ОСНОВНЫХ ПОЛУПРОДУКТОВ

Показано, что в настоящее время новая противовирусная субстанция “Триазид” (5-метил-6-нитро-7-оксо-4,7-дигидро-1,2,4-триазоло[1,5- α]пиримидинид *L*-аргининия моногидрат) проходит процедуру государственной регистрации в качестве лекарственного препарата для последующей организации его производства и применения на территории Российской Федерации. Рассчитаны показатели пожаровзрывоопасности (низшая теплота сгорания, нижний концентрационный предел воспламенения, максимальное давление взрыва, максимальная скорость нарастания давления при взрыве) для нового лекарственного средства “Триазид” (I) и полупродуктов его синтеза (5-метил-1,2,4-триазоло[1,5- α]пиримидин-7-она (II) и 5-метил-6-нитро-1,2,4-триазоло[1,5- α]пиримидин-7-она (III)). По ГОСТ 12.1.044–89* определена способность взрываться и гореть при взаимодействии с водой и кислородом воздуха, температура тления для соединений (I)–(III) и температура воспламенения для триазолопиримидина (II). Установлено, что стандартные методики определения температуры самовоспламенения для соединений (I)–(III) и температуры воспламенения для триазида (I) и нитротриазолопиримидина (III) оказались технически непригодны. Для экспериментального нахождения этих показателей пожаровзрывоопасности внесены изменения в аппаратный дизайн.

Ключевые слова: пожар; опасность; лекарственный препарат; температура воспламенения; температура самовоспламенения; максимальное давление взрыва.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.15-20

Настоящая работа является продолжением цикла наших исследований по определению индексов пожаровзрывоопасных свойств лекарственных препаратов и полупродуктов их органического синтеза [1–4].

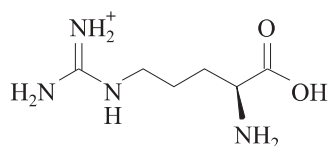
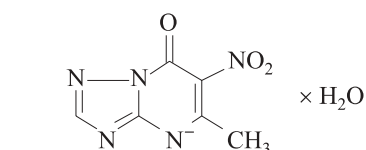
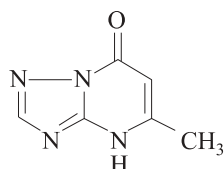
В Уральском федеральном университете совместно с Институтом органического синтеза Уральского отделения РАН разработано новое противовирусное средство широкого спектра действия “Триазид” (5-метил-6-нитро-7-оксо-4,7-дигидро-1,2,4-триазоло[1,5- α]пиримидинид *L*-аргининия моногидрат) (I), которое показало высокий уровень противовирусной активности на модели летальной грип-

позной инфекции у мышей, вызванной вирусами A/Aichi/2/68 (H3N2), A/California/05/09pdm2009 и B/Lee/40 [5]. По классификации Ходжа (Hodge) и Стернера (Sterner) [6, 7] Триазид относится к VI классу (относительно безвредные вещества), что указывает на перспективность его применения в качестве средства лечения и профилактики гриппа, а также для экстренной профилактики в очагах инфекции.

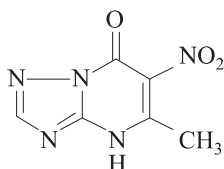
В настоящее время субстанция “Триазид” проходит процедуру государственной регистрации в качестве лекарственного препарата в целях последующей организации его производства и применения на территории Российской Федерации. В связи с этим

Таблица 1. Физико-химические свойства соединений (I)–(III)

Соединение	Внешний вид	Температура плавления, °С	Максимальная длина волны поглощения $\lambda_{\max}$ в УФ-спектре, нм	
			Этанол	Вода
I	Кристаллический порошок желтого цвета с содержанием основного вещества 99,5 %	172–175	–	–
II	Кристаллический порошок белого цвета	290–291	247	245
III	Порошок слегка желтоватого цвета	290–291 (разл.)	216	216

Триазид
I5-Метил-1,2,4-триазоло-
[1,5-α]пиримидин-7-он

II

5-Метил-6-нитро-1,2,4-три-
азоло[1,5-α]пиримидин-7-он

III

Рис. 1. Формула Триазид и его основных полупродуктов

возникла потребность в определении показателей пожаровзрывоопасности Триазид (I) и его основных полупродуктов (II) и (III) (рис. 1).

Соединения (I)–(III) представляют собой твердые вещества, основные физико-химические характеристики которых приведены в табл. 1.

С помощью комплексного подхода с применением экспериментальных и расчетных методик [8–14] найдены показатели пожаровзрывоопасности соединений (I)–(III) (табл. 2).

При экспериментальном определении температуры самовоспламенения и воспламенения веществ (I)–(III) по ГОСТ 12.1.044 возникли технические сложности:

- верхняя граница рабочего диапазона установки ОТП не позволяет определить температуру самовоспламенения соединений (I)–(III);
- в температурном интервале 170–290 °С (до температуры плавления 5-метил-6-нитро-7-оксо-4,7-дигидро-1,2,4-триазоло[1,5-α]пиримидинид L-аргининия моногидрата (I) и 5-метил-6-нитро-1,2,4-триазоло[1,5-α]пиримидин-7-она (III)) воспламенения не наблюдается;

Таблица 2. Показатели пожаровзрывоопасности соединений (I)–(III)

Показатель	Соединение		
	I	II	III
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	15,4	19,3	12,5
НКПВ, г/м ³ , для частиц с размером, мкм:			
≤10	124	94	146
40–50	49	38	59
Способность взрываться и гореть при взаимодействии с водой и кислородом воздуха	Отсутствует		
Максимальное давление взрыва, кПа	545	553	571
Максимальная скорость нарастания давления при взрыве, МПа/с	40,9	41,5	42,8
Температура воспламенения, °С	605	325	550
Температура самовоспламенения, °С	870	745	785
Температура тления, °С	Отсутствует		

- при более высоких температурах происходит интенсивное разложение соединений (I) и (III), которое приводит к тушению пламени горелки в установке ОТП.

В связи с тем что в экспресс-тестах на самовоспламенение (контакт исследуемых образцов с раскаленной спиралью) зафиксированы положительные результаты, было принято решение заменить стандартную установку ОГНМ на прибор ТЭП, в котором можно создавать температуру до 1000 °С [14]. Процесс экспериментального определения температуры самовоспламенения соединений (I)–(III) показан на рис. 2.

Экспериментально температуры воспламенения триазид (I) и 5-метил-6-нитро-1,2,4-триазоло[1,5-α]пиримидин-7-она (III) находили с помощью установки СТС, которая применяется для определения температуры самовоспламенения газов и жидкостей по ГОСТ 12.1.044. В качестве источника зажигания использована газовая зажигалка. Процесс экспериментального определения температуры воспламенения соединений (I) и (III) показан на рис. 3.

Результаты тестирования веществ (I)–(III) на самовоспламенение и воспламенение приведены в табл. 2.



Рис. 2. Экспериментальное определение температуры самовоспламенения в установке ТЭП

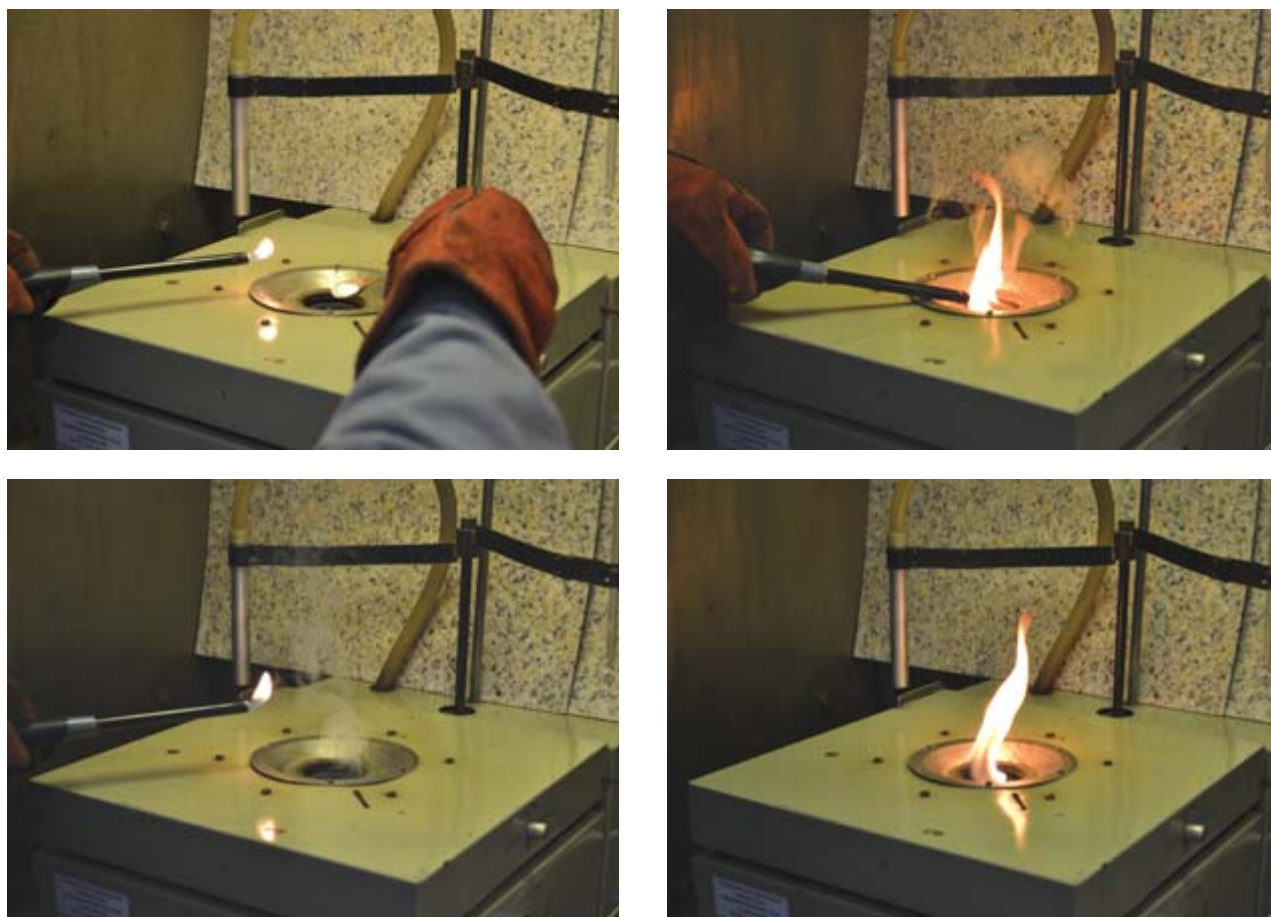


Рис. 3. Процесс экспериментального определения температуры воспламенения в установке СТС

В результате проведенной работы определены показатели пожаровзрывоопасности нового лекарственного средства “Триазид” и двух его основных полупродуктов. Найдено, что стандартная установка ОТП не позволяет установить температуру самовоспламенения лекарственного средства “Триазид” (I) и соединений (II) и (III), а также температуру воспламенения соединений (I) и (III). В связи с этим были внесены аппаратные изменения в экспериментальный способ определения этих показателей пожаровзрывоопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Авдеев А. С., Пищальников А. В., Орлов С. А., Уломский Е. Н. Показатели пожаровзрывоопасности противовирусного препарата триазирина и полупродуктов его синтеза // Пожаровзрывобезопасность. — 2008. — Т. 17, № 3. — С. 46–48.
2. Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Авдеев А. С., Пищальников А. В., Орлов С. А., Уломский Е. Н., Артемьев Г. А. Показатели пожаровзрывоопасности нитроуксусного эфира // Пожаровзрывобезопасность. — 2008. — Т. 17, № 5. — С. 48–53.
3. Алексеев С. Г., Левковец И. А., Рыжков О. В., Артемьев Г. А., Барбин Н. М., Пищальников А. В., Котовская С. К. Показатели пожаровзрывоопасности основных полупродуктов в синтезе антибактериального препарата левофлоксацина // Пожаровзрывобезопасность. — 2010. — Т. 19, № 5. — С. 34–36.
4. Алексеев С. Г., Левковец И. А., Рыжков О. В., Артемьев Г. А., Барбин Н. М., Пищальников А. В., Котовская С. К. Показатели пожаровзрывоопасности антибактериального препарата левофлоксацина и его основных полупродуктов // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 1. — С. 18–20.
5. Пат. 2529487 С1 Российская Федерация. МПК C07D 487/04, C07C 279/14, A61P 31/12, A61P 31/16. 5-метил-6-нитро-7-оксо-4,7-дигидро-1,2,4-триазоло[1,5-альфа]пиримидинид L-аргининия моногидрат / Чупахин О. Н., Чарушин В. Н., Русинов В. Л. и др. — № 2013116765/04; заявл. 15.04.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27.
6. Hodge H. C., Sterner J. H. Tabulation of toxicity classes // American Industrial Hygiene Association Quarterly. — 1949. — Vol. 10, No. 4. — P. 93–96. DOI: 10.1080/00968204909344159.
7. Handbook of Toxicology / M. J. Derelanko, C. S. Auletta (eds). — Boca Raton : CRC Press, 2014. — 1022 p.
8. ГОСТ 12.1.044–89*. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. — Введ. 01.01.1991. — М. : Изд-во стандартов, 1989; ИПК Изд-во стандартов, 1996, 2001. Доступ из сборника НСИС ПБ. — 2015. — № 1 (55).
9. Шебеко Ю. Н., Навяца В. Ю., Копылов С. Н., Горшков В. И., Корольченко И. А., Полетаев А. Н., Васина О. В., Вережкин В. Н., Белов С. Г. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов : руководство. — М. : ВНИИПО, 2002. — 77 с.
10. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. — 2-е изд. перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. I. — 713 с.
11. Корольченко А. Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. — М. : Химия, 1986. — 216 с.
12. Демидов П. Г., Шандыба В. А., Щеглов П. П. Горение и свойства горючих веществ. — М. : Химия, 1981. — 272 с.
13. Корольченко А. Я. Расчет показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов. II. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности // Пожаровзрывобезопасность. — 2003. — Т. 12, № 1. — С. 24–38.
14. Монахов В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. — М. : Химия, 1979. — 424 с.

Материал поступил в редакцию 9 февраля 2016 г.

Для цитирования: Алексеев С. Г., Авдеев А. С., Барбин Н. М., Котовская С. К. Показатели пожаровзрывоопасности противовирусного лекарственного средства “Триагид” и его основных полупродуктов // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 15–20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.15-20.

English

CHARACTERISTICS OF FIRE AND EXPLOSIVE PROPERTIES OF ANTIVIRAL DRUG TRIAZID AND ITS MAIN SEMIPRODUCTS

ALEXEEV S. G., Candidate of Chemistry Sciences, Associate Professor, Corresponding Member of WASCS, Senior Researcher of Science and Engineering Centre “Reliability and Safety of Large Systems” of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Studencheskaya St., 54a, Yekaterinburg, 620049, Russian Federation); Senior Researcher of Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail address: Alexshome@mail.ru)

AVDEEV A. S., Leader of Sector for Research and Testing in the Field of Fire Safety of Forensic Expert Establishment of Federal Fire Service – “Testing Fire Laboratory for the Perm Territory” (Bolshevistskaya St., 53a, Perm, 614990, Russian Federation); Postgraduate Student of Science and Engineering Centre “Reliability and Safety of Large Systems” of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Studencheskaya St., 54a, Yekaterinburg, 620049, Russian Federation; e-mail address: asi@ugps.perm.ru)

BARBIN N. M., Doctor of Technical Sciences, Candidate of Chemical Sciences, Head of Chemistry Department, Ural State Agrarian University (Karla Libknekhta St., 42, Yekaterinburg, 620075, Russian Federation); Senior Researcher, Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail: NMBarbin@mail.ru)

KOTOVSKAYA S. K., Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher of Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Mira St., 19, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail address: sk-kotovskaya-665@ya.ru)

ABSTRACT

Now the new anti-virus substance “Triazid” (5-methyl-6-nitro-7-oxo-4,7-dihydro-1,2,4-triazolo[1,5- α]pyrimidin-7-one L-argininium monohydrate) passes the state registration procedure as a medicament for the subsequent organization of its production and applications in the Russian Federation. Therefore there is a need in identifying of fire and explosive hazard characteristics of “Triazid” (I) and two semiproducts of its synthesis (5-methyl-1,2,4-triazolo[1,5- α]pyrimidin-7-one (II), 5-methyl-6-nitro-1,2,4-triazolo[1,5- α]pyrimidin-7-one (III)). These indices of compounds (I)–(III) are determined by experimental and computational methods.

At the experimental finding of the auto-ignition temperature of (I)–(III) and the fire temperature of (I) and (III) according to GOST 12.1.044 we meet the next technical difficulties:

- upper limit of the working range of apparatus OTP does not allow to determine the auto-ignition temperature of the compounds (I)–(III);
- intensive decomposition of compounds (I) and (III) extinguishes a burner flame of apparatus OTP. It does impossible definition of their fire points.

Express tests on auto-ignition (contact of the samples with a red-hot spiral) gave positive results for the compounds (I)–(III), therefore we replaced the standard apparatus OGNM on device TEP, which can create temperatures up to 1000 °C. For the experimental determination of fire temperatures of “Triazide” (I) and 5-methyl-6-nitro-1,2,4-triazolo[1,5- α]pyrimidin-7-one (III) we use the unit STS with an additional source of ignition instead of the standard apparatus OTP. Results of testing compounds (I)–(III) on auto-ignition and inflammation are shown in the table.

Fire and explosive hazard characteristics of compounds (I)–(III)

Characteristic	Compound		
	I	II	III
Lower combustion heat, MJ/kg	15,4	19,3	12,5
Lower flammability limit, g/m ³ , for particles with a size, μ m:			
≤ 10	124	94	146
40–50	49	38	59
Ability to blast out and burn at interaction with water and oxygen of air	No		
Maximum blast pressure, kPa	545	553	571
Maximum rate of pressure rise at explosion, MPa/s	40,9	41,5	42,8
Fire temperature, °C	605	325	550
Auto-ignition temperature, °C	870	745	785
Smouldering temperature, °C	No		

The result of the work is determination of fire and explosive hazard characteristics of the new drug “Triazid” (I) and two semiproducts of its synthesis.

Keywords: fire; hazard; drug; fire temperature; auto-ignition temperature; maximum blast pressure.

REFERENCES

1. Alexeev S. G., Barbin N. M., Avdeev A. S., Pishchalnikov A. V., Orlov S. A., Ulomskiy E. N. Pokazateli požarovzryvoopasnosti protivovirusnogo preparata triazavirina i poluproduktov yego sinteza [*Indices of fire and explosive properties of antiviral drug triazavirin and semiproductions of its synthesis*]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 46–48. Available at: <http://elibrary.ru/download/58357369.pdf> (Accessed 28 January 2016).
2. Alexeev S. G., Barbin N. M., Avdeev A. S., Pishchalnikov A. V., Orlov S. A., Ulomskiy E. N., Artemyev G. A. Pokazateli požarovzryvoopasnosti nitrouksusnogo efira [*Indices of fire and explosive properties of ethyl nitroacetate*]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2008, vol. 17, no. 5, pp. 48–53. Available at: <http://elibrary.ru/download/88407723.pdf> (Accessed 28 January 2016).
3. Alexeev S. G., Levkovets I. A., Ryzhkov O. V., Artemyev G. A., Barbin N. M., Pishchalnikov A. V., Kotovskaya S. K. Pokazateli požarovzryvoopasnosti osnovnykh poluproduktov v sinteze antibakterialnogo preparata levofloksatsina [*Indices of fire and explosive properties of the main semiproductions in synthesis of the antibacterial drug Levofloxacin*]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 5, pp. 34–36. Available at: <http://fire-smi.ru/arhivpzb2010> (Accessed 28 January 2016).
4. Alexeev S. G., Levkovets I. A., Ryzhkov O. V., Artemyev G. A., Barbin N. M., Pishchalnikov A. V., Kotovskaya S. K. Pokazateli požarovzryvoopasnosti antibakterialnogo preparata levofloksatsina i yego osnovnykh poluproduktov [*Indices of fire and explosive properties of the antibacterial drug Levofloxacin and its main semiproductions*]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 18–20. Available at: <http://fire-smi.ru/arhivpzb2011> (Accessed 28 January 2016).
5. Chupakhin O. N., Charushin V. N., Rusinov V. L. et al. 5-metil-6-nitro-7-okso-4,7-digidro-1,2,4-triazolo[1,5-alfa]pirimidinid L-argininiya monogidrat [5-methyl-6-nitro-7-oxo-4,7-dihydro-1,2,4-triazolo[1,5-alpha]pyrimidinide L-argininium monohydrate]. Patent RU, no. 2529487, 27.09.2014.
6. Hodge H. C., Sterner J. H. Tabulation of toxicity classes. *American Industrial Hygiene Association Quarterly*, 1949, vol. 10, no. 4, pp. 93–96. DOI: 10.1080/00968204909344159.
7. Derelanko M. J., Auletta C. S. (eds). *Handbook of Toxicology*. Boca Raton, CRC Press, 2014. 1022 p.
8. Interstate standard 12.1.044–89*. Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1989; IPK Izdatelstvo standartov, 1996, 2001. Available at: NSIS PB, 2015, no. 1 (55) (in Russian).
9. Shebeko Yu. N., Navtsenya V. Yu., Kopylov S. N., Gorshkov V. I., Korolchenko I. A., Poletaev A. N., Vasina O. V., Verevkin V. N., Belov S. G. *Raschet osnovnykh pokazateley požarovzryvoopasnosti veshchestv i materialov: rukovodstvo* [Calculation of main fire and explosion indices of compounds and materials. Manual]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2002. 77 p.
10. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik. 2-e izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials, and their means of fighting. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part I, 713 p.
11. Korolchenko A. Ya. *Pozharovzryvoopasnost promyshlennoy pyli* [Fire and explosion hazard of industrial dusts]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 216 p.
12. Demidov P. G., Shandyba V. A., Shcheglov P. P. *Goreniye i svoystva goryuchikh veshchestv* [Combustion and properties of combustibles substances]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 272 p.
13. Korolchenko A. Ya. *Raschet pokazateley požarovzryvoopasnosti veshchestv i materialov. II. Raschet osnovnykh pokazateley požarovzryvoopasnosti* [Calculation of fire and explosion indices of substances and material. Part II. Calculation of main indices]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2003, vol. 12, no. 1, pp. 24–38. Available at: <http://fire-smi.ru/arhiv2003> (Accessed 28 January 2016).
14. Monakhov V. T. *Methods for studying the flammability of substances*. New Delhi, Amerind Publishing Co., 1985. 436 p.

For citation: Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M., Kotovskaya S. K. Pokazateli požarovzryvoopasnosti protivovirusnogo lekarstvennogo sredstva “Triazid” i yego osnovnykh poluproduktov [Characteristics of fire and explosive properties of antiviral drug Triazid and its main semiproductions]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 15–20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.15-20.

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

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

Д. В. КАРГАШИЛОВ, канд. техн. наук, начальник кафедры пожарной безопасности технологических процессов, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231)

УДК 614.841.12

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОПАКЕТА КДС 1.0 НА ПРИМЕРЕ СЛОЖНЫХ ЭФИРОВ МАСЛЯНОЙ КИСЛОТЫ

Предложен нейропакет КДС 1.0. Рассмотрен процесс прогнозирования температуры вспышки сложных эфиров масляной кислоты методом, основанным на использовании молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей. Проводили верификацию данных, основываясь на некоторых справочных данных. Установлено, что полученные по данному методу результаты дают незначительную относительную погрешность по сравнению со справочными данными, которая не превышает 8 %. Показано, что данный метод позволяет с удовлетворительной точностью оценить пожароопасные свойства органических соединений.

Ключевые слова: прогнозирование; эфиры; температура вспышки; дескрипторы; нейронные сети.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.21-26

Рост масштабов производства, изменение технологий, выпуск новых веществ и материалов, в конечном счете, приводит к повышению пожарной опасности технологических линий, аппаратов и оборудования, а также хранилищ и складов готовой продукции. Это связано прежде всего с тем, что производственное оборудование и аппараты технологических установок размещаются на небольшом расстоянии друг от друга. Кроме того, в процессе производства перерабатывается большое количество горючих и легковоспламеняющихся жидкостей, которые, как правило, подвергаются воздействию высоких давлений и температур.

Например, сложные эфиры применяются практически во всех отраслях промышленности. Они входят в состав различных растворителей, лакокрасочных материалов, продуктов парфюмерной промышленности. Мировое производство сложных эфиров составляет порядка нескольких десятков миллионов тонн в год [1]. Кроме того, на рынке появляются все новые соединения. В связи с этим проблема разработки мероприятий, направленных на обеспечение пожарной безопасности объекта защиты, не теряет своей актуальности [2]. Сложившуюся проблему позволит решить разработка универсального метода прогнозирования пожароопасных свойств веществ.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать метод прогнозирования пожароопасных свойств веществ на основе молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей. Ранее этот метод уже применялся нами [3–6] и успешно себя зарекомендовал. При прогнозировании пожароопасных свойств веществ этим методом не требуется существенных временных и материальных затрат [7].

О молекулярных дескрипторах как эмпирической закономерности изменения свойств веществ с изменением структуры было известно еще в середине XIX века. Она рассматривалась русским ученым Д. И. Менделеевым как взаимосвязь *строение – свойство*.

Молекулярные дескрипторы — это финальный результат логических и математических процедур, которые трансформируют химическую информацию, закодированную в рамках символического представления молекулы, в полезное число или результат какого-либо стандартизированного эксперимента. На рис. 1 представлена классификация основных молекулярных дескрипторов, применяемых в прогнозировании пожароопасных свойств соединений.

Искусственные нейронные сети — это одно из научных направлений исследований в области ис-

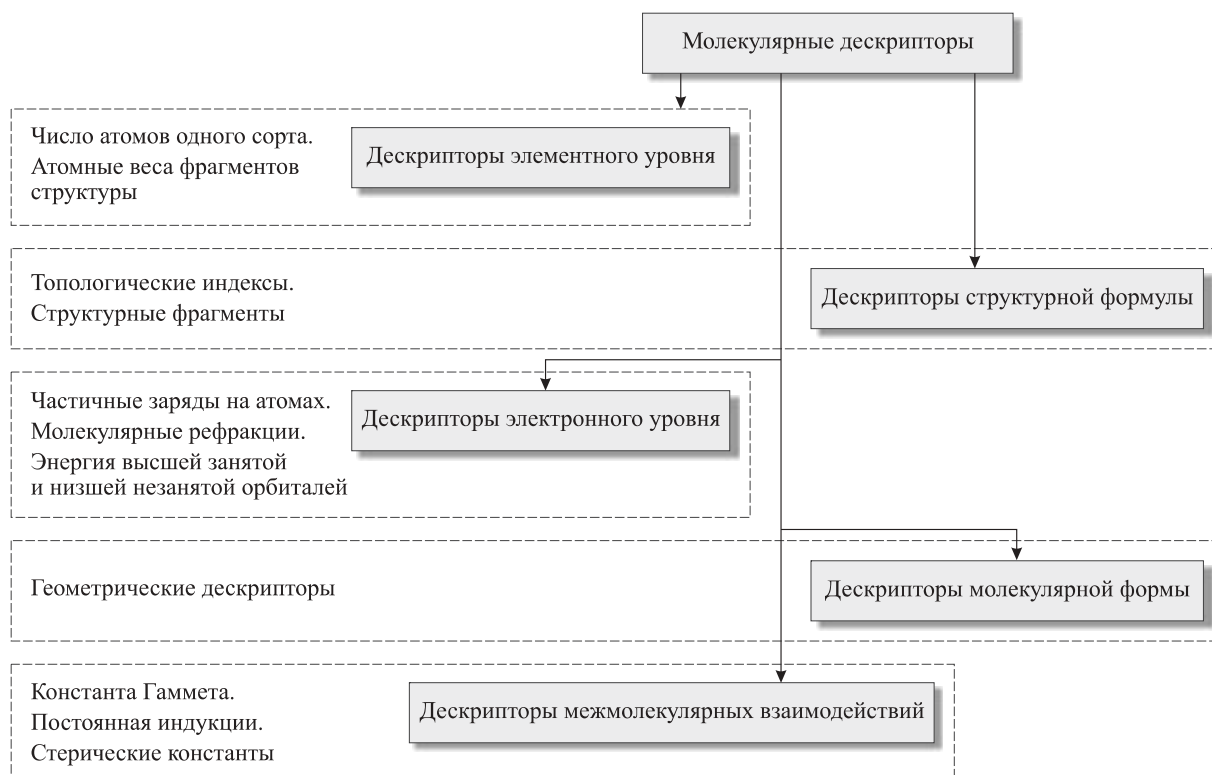


Рис. 1. Классификация основных молекулярных дескрипторов

кусственного интеллекта, которые нашли широкое применение в различных отраслях.

Прогнозирование будем осуществлять при помощи разработанного нами нейропакета КДС 1.0. Программа “Нейропакет КДС 1.0” позволяет:

- 1) загружать и просматривать базы данных, содержащие структуры химических соединений и их свойства;

- 2) осуществлять корреляцию вводимых данных;
- 3) статистически оценивать полученные модели;
- 4) использовать полученные нейросетевые модели для прогнозирования свойств веществ без проведения сложного эксперимента.

Для описания строения молекул исследуемых соединений применяют дескрипторы структурной формулы — топологические индексы (Винера W ,

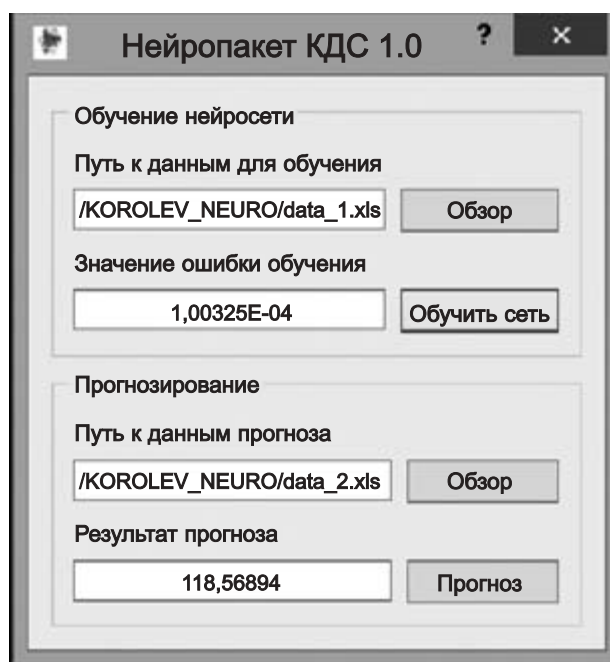
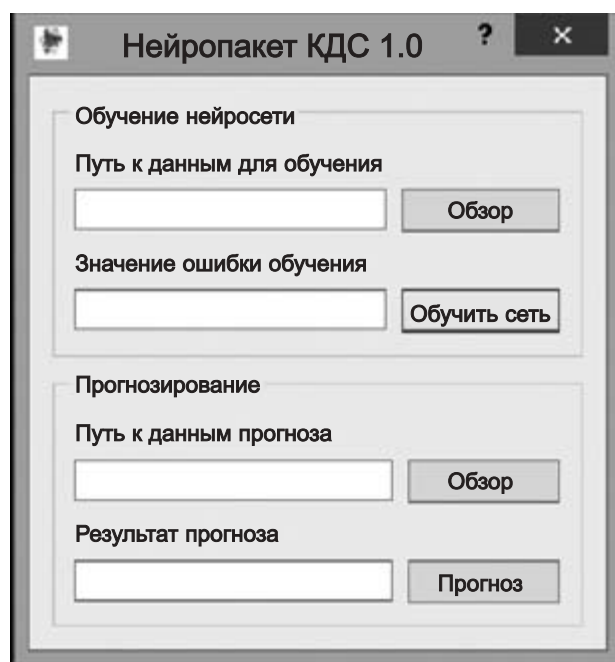


Рис. 2. Главное окно программы “Нейропакет КДС 1.0”

Таблица 1. Дескрипторы исследуемых сложных эфиров масляной кислоты

Дескриптор	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Число атомов	11	10	12	13	16	8	6	14	9
Число атомов С	9	8	10	11	14	6	4	12	7
Относительное число атомов С	0,81	0,8	0,83	0,84	0,87	0,75	0,67	0,86	0,78
Число атомов О	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Относительное число атомов О	0,18	0,2	0,16	0,15	0,12	0,25	0,33	0,14	0,22
Количество связей	10	9	11	12	15	7	5	13	8
Количество одиночных связей	9	8	10	11	14	6	4	12	7
Относительное число одиночных связей	0,9	0,88	0,9	0,91	0,93	0,85	0,8	0,92	0,88
Число двойных связей	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Относительное число двойных связей	0,1	0,111	0,09	0,08	0,06	0,14	0,2	0,08	0,13
Молекулярный вес	140,09	128,8	152,1	164,11	200,15	104,06	80,04	176,13	116,08
Относительный молекулярный вес	12,73	12,8	12,67	12,62	12,5	13	13,34	12,58	12,9
Гравитационный индекс связей	896,4	816,4	977,89	1059,5	1305,3	651,67	486,74	1191,9	734,93
Гравитационный индекс пар	1505,2	1401,5	1649,9	1794,6	2230,9	1065	745,49	2027,8	1254,7
Индекс Винера	202	150	265	340	647	75	31	428	108
Индекс Рандича (0-го порядка)	58,5	7,82	9,23	9,94	12,06	6,4	4,99	10,65	7,11
Индекс Рандича (1-го порядка)	5,3	4,08	5,8	6,30	7,8	3,8	2,81	6,81	4,31
Индекс Рандича (2-го порядка)	3,74	3,38	4,09	4,45	5,51	2,68	1,92	4,8	3,04
Индекс Рандича (3-го порядка)	2,33	2,08	2,58	2,82	3,58	1,56	1,39	3,08	1,83
Индекс Киер-Хола (0-го порядка)	5,316	4,81	5,81	6,31	7,81	3,81	2,82	6,82	4,32
Индекс Киер-Хола (1-го порядка)	2,36	2,11	2,61	2,86	3,61	1,61	1,11	3,11	1,86
Индекс Киер-Хола (2-го порядка)	1,11	0,99	1,24	1,36	1,74	0,74	0,51	1,49	0,87
Индекс Киер-Хола (3-го порядка)	0,48	0,42	0,54	0,6	0,79	0,3	6	0,67	0,36
Индекс формы Киера (1-го порядка)	10,6	9,63	11,63	12,63	15,63	7,63	4	13,63	8,63
Индекс формы Киера (2-го порядка)	7,73	6,74	8,72	9,71	12,69	4,78	0,67	10,71	5,76

Таблица 2. Результаты прогнозирования температуры вспышки сложных эфиров

№ п/п	Исследуемое вещество	Температура вспышки, °С		Погрешность	
		Справочные данные [11, 12]	Прогноз	абсолютная, °С	относительная, %
1	Гексилбутират	178	180	2	1,1
2	Бутилбутират	—	154	—	—
3	Метилбутират	—	139	—	—
4	Амилбутират	—	120	—	—
5	Гептилбутират	100	99	1	1
6	Децилбутират	120	129	9	7,5
7	Изобутилбутират	50	53	3	6
8	Пропилбутират	—	79	—	—
9	Изопропилбутират	—	62	—	—
10	Изоамилбутират	—	55	—	—
11	Этилбутират	—	118	—	—

Рандича χ) и геометрические дескрипторы — площадь поверхности молекулы S , гравитационные индексы G_1 (все связи) и G_2 (все пары). Указанные дескрипторы выбираются на основе сопоставления закономерностей изменения температуры вспышки в зависимости от строения молекул вещества [8–10].

Главное окно программы и этапы работы представлены на рис. 2.

В настоящей работе в качестве объектов исследования выбран класс сложных эфиров масляной кислоты. Выбор данных веществ для анализа обусловлен широким спектром их применения и отсутствием их физико-химических свойств в справочной литературе. Из-за отсутствия возможности привести все дескрипторы 11 исследуемых веществ, в табл. 1 представлена только часть из них.

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

Таким образом, осуществляли прогнозирование температуры вспышки исследуемых сложных эфи-

ров масляной кислоты. В табл. 2 представлены полученные результаты и для сравнения справочные данные [11, 12].

При сравнении полученных результатов с некоторыми справочными данными видно, что средняя относительная погрешность не превышает 3,9 %.

Известно, что на величину топологического индекса Винера W существенно влияет длина молекулы, наличие в ее структуре разветвлений, а также природа заместителей. Аналогичная зависимость характерна и для геометрических индексов G_1 , G_2 и площади поверхности молекулы S . Индекс Винера и площадь поверхности молекулы возрастают при увеличении числа атомов углерода в цепи.

Метод прогнозирования на основе молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей позволяет с удовлетворительной точностью оценить показатели пожароопасных свойств веществ органических соединений и в отличие от стандартных расчетных методов не требует использования других экспериментальных данных (температуры кипения, давления насыщенного пара).

Кроме того, полученные результаты дадут возможность значительно расширить базу данных по горючей нагрузке, представленную в нормативной и справочной литературе, а также будут способствовать оперативному расчету категории помещения по пожарной и взрывопожарной опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустовалова Л. М. Органическая химия. — Ростов : Феникс, 2003. — 320 с.
2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон от 22.07.08 № 123-ФЗ // Собр. законодательства РФ. — 2008. — № 30 (ч. I), ст. 3579.
3. Королев Д. С., Калач А. В. Категорирование помещений на основе дескрипторов и метода нейронных сетей // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 5. — С. 210–213.
4. Королев Д. С., Калач А. В., Каргашилов Д. В., Сорокина Ю. Н. Прогнозирование основных показателей пожаровзрывоопасности органических соединений с помощью дескрипторов и искусственных нейронных сетей, используемых в расчете пожарного риска // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 9. — С. 32–38. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.32-38.
5. Королев Д. С., Калач А. В., Рудаков О. Б. Прогнозирование пожароопасных свойств веществ // Безопасность в техносфере. — Т. 4, № 5. — С. 3–6. DOI: 10.12737/16957.
6. Калач А. В., Карташова Т. В., Сорокина Ю. Н., Облиенко М. В. Прогнозирование пожароопасных свойств органических соединений с применением дескрипторов // Пожарная безопасность. — 2013. — № 1. — С. 70–73.
7. ГОСТ 12.1.044–89*. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. — Введ. 01.01.1991. — М. : Стандартинформ, 2006. — 100 с.
8. Ngoc Lan Mai, Yoon-Mo Koo. Quantitative prediction of lipase reaction in ionic liquids by QSAR using COSMO-RS molecular descriptors // Biochemical Engineering Journal. — 2014. — Vol. 87. — P. 33–40. DOI: 10.1016/j.bej.2014.03.010.
9. Varnek A., Fourches D., Hoonakker F., Solov'ev V. P. Substructural fragments: an universal language to encode reactions, molecular and supramolecular structures // Journal of Computer-Aided Molecular Design. — 2005. — Vol. 19, No. 9–10. — P. 693–703. DOI: 10.1007/s10822-005-9008-0.
10. Baskin I., Varnek A. Building a chemical space based on fragment descriptors // Combinatorial Chemistry & High Throughput Screening. — 2008. — Vol. 11, No. 8. — P. 661–668. DOI: 10.2174/138620708785739907.
11. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник: в 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. I. — 713 с.
12. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник: в 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. II. — 774 с.

Материал поступил в редакцию 27 января 2016 г.

Для цитирования: Королев Д. С., Калач А. В., Каргашилов Д. В. Прогнозирование температуры вспышки с помощью нейроракета КДС 1.0 на примере сложных эфиров масляной кислоты // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 21–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.21-26.

FORECASTING OF FLASH POINT BY MEANS OF KDS 1.0 NEUROPACKAGE ON THE EXAMPLE OF ESTERS OF OLEIC ACID

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

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

KARGASHILOV D. V., Candidate of Technical Sciences, Head of Fire Safety Technological Processes Department, Voronezh Institute of State Firefighting Service of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya St., 231, Voronezh, 394052, Russian Federation)

ABSTRACT

In article topical issue — lack of physical and chemical properties of the new synthesized substances is brought up. These properties will allow workers of supervising activity to develop systems of ensuring fire safety on objects of protection. Operability of such systems is reached by an exception of the combustible environment or a source of ignition.

On the example of esters of oleic acid which are used practically in all areas of the industry and are made according to help data in number of more than several tens millions tons per year, it was succeeded to predict flash point, one of the most important fire-dangerous indicators of properties of substance, by means of KDS 1.0 neuropackage developed by us. The Neyropaket KDS 1.0 program allows: to load and look through the databases containing structures of chemical compounds and their properties; to carry out correlation of the entered data; statistically to estimate the received models; to use the received neural network models for forecasting of properties of substances, without carrying out difficult experiment.

It's carried out verification of data based on some help data. Besides, flash point of esters of oleic acid data about which are absent in reference books was predicted. It gives the chance to make a start from the received values by development of systems of ensuring fire safety.

On the basis of knowledge of flash point it is possible to perform calculation of category of the room which is necessary for establishment of requirements of fire safety.

Such approach to forecasting of fire-dangerous property of substance is based on the description of structure of a molecule by means of molecular descriptors and establishment of quantitative correlations between the found values by means of artificial neural networks.

During research of flash point the artificial neural network allowing to predict values with a margin error, not exceeding 8 %, in comparison with help data was simulated.

Besides, the way of forecasting of fire-dangerous properties of substances based on use of molecular descriptors and artificial neural networks allows to draw a conclusion on possibility of application of such way for forecasting of other fire-dangerous properties of organic substances.

Keywords: forecasting; esters; flash point; descriptors; neural networks.

REFERENCES

1. Pustovalova L. M. *Organicheskaya khimiya* [Organic chemistry]. Rostov, Feniks Publ., 2003. 320 p.
2. Technical regulations for fire safety requirements. Federal Law on 22. 07. 2008 No. 123. *Sobraniye zakonodatelstva RF — Collection of Laws of the Russian Federation*, 2008, no. 30 (part I), art. 3579 (in Russian).
3. Korolev D. S., Kalach A. V. Kategorirovaniye pomeshcheniy na osnove deskriptorov i metoda neyronnykh setey [Categorization of areas based on the descriptors and neural networks method]. *Vestnik BGTU im. Shukhova — Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2015, no. 5, pp. 210–213.

4. Korolev D. S., Kalach A. V., Kargashilov D. V., Sorokina Yu. N. Prognozirovaniye osnovnykh pokazateley pozharovzryvoopasnosti organicheskikh soyedineniy s pomoshchyu deskriptorov i iskusstvennykh neyronnykh setey, ispolzuyemykh v raschete pozhnogo riska [Forecast of major indicators of fire and inflammation organic compounds using descriptors and artificial neural networks used in the evaluation of fire risk]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 32–38. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.32-38.
5. Korolev D. S., Kalach A. V., Rudakov O. B. Prognozirovaniye pozharoopasnykh svoystv veshchestv [Forecasting of fire-dangerous properties of substances]. *Bezopasnost v tekhnosfere — Safety in Technosphere*, 2015, vol. 4, no. 5, pp. 3–6. DOI: 10.12737/16957.
6. Kalach A. V., Kartashova T. V., Sorokina Yu. N., Oblienko M. V. Prognozirovaniye pozharoopasnykh svoystv organicheskikh soyedineniy s primeneniym deskriptorov [Prediction of fire hazardous properties of organic compounds using descriptors]. *Pozhnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2013, no. 1, pp. 70–73.
7. Interstate Standard 12.1.044–89*. Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 100 p. (in Russian).
8. Ngoc Lan Mai, Yoon-Mo Koo. Quantitative prediction of lipase reaction in ionic liquids by QSAR using COSMO-RS molecular descriptors. *Biochemical Engineering Journal*, 2014, vol. 87, pp. 33–40. DOI: 10.1016/j.bej.2014.03.010.
9. Varnek A., Fourches D., Hoonakker F., Solov'ev V. P. Substructural fragments: an universal language to encode reactions, molecular and supramolecular structures. *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, 2005, vol. 19, no. 9-10, pp. 693–703. DOI: 10.1007/s10822-005-9008-0.
10. Baskin I., Varnek A. Building a chemical space based on fragment descriptors. *Combinatorial Chemistry & High Throughput Screening*, 2008, vol. 11, no. 8, pp. 661–668. DOI: 10.2174/138620708785739907.
11. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik. 2-e izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part I, 713 p.
12. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik. 2-e izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part II, 774 p.

For citation: Korolev D. S., Kalach A. V., Kargashilov D. V. Prognozirovaniye temperatury vspyshki s pomoshchyu neyropaketa KDS 1.0 na primere slozhnykh efirov maslyanoy kisloty [Forecasting of flash point by means of KDS 1.0 neuropackage on the example of esters of oleic acid]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 21–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.21-26.

Ю. К. СУНЦОВ, д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры химии и процессов горения, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231; e-mail: jsyntsov@mail.ru)

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

А. М. ЧУЙКОВ, канд. техн. наук, начальник кафедры химии и процессов горения, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231)

В. А. ГОРЮНОВ, канд. хим. наук, старший преподаватель кафедры химии и процессов горения, Воронежский институт ГПС МЧС России (Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 231)

УДК 614.841.41

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭНЕРГИИ ГЕЛЬМГОЛЬЦА С ТЕМПЕРАТУРОЙ ВСПЫШКИ ВЕЩЕСТВ В ГОМОЛОГИЧЕСКИХ РЯДАХ *n*-АЛКИЛЭТАНОАТОВ, *n*-СПИРТОВ И КЕТОНОВ

Измерено давление насыщенного пара и плотность жидких веществ в гомологических рядах *n*-алкилэтанов, алифатических кетонов и *n*-спиртов при различных температурах. Показано, что рассчитанные значения внутренней энергии, энтропии и энергии Гельмгольца линейно зависят от молярной массы вещества в гомологическом ряду. Анализом опытных и литературных данных установлена линейная зависимость значений энергии Гельмгольца от температуры вспышки вещества в гомологическом ряду. Приведены необходимые для расчетов свойств веществ уравнения.

Ключевые слова: давление насыщенного пара; мольный объем; внутренняя энергия; энтропия; энергия Гельмгольца; температура вспышки; корреляционные уравнения.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.27-33

Для обеспечения пожарной безопасности процессов производства, хранения и транспортирования веществ необходимы данные по показателям пожаровзрывоопасности веществ. К числу таких показателей относятся температуры вспышки и воспламенения и температурные пределы распространения пламени огнеопасных жидкостей, которые можно рассчитать, если известна зависимость давления насыщенного пара p от температуры кипения T растворов [1]. Данные по термодинамическим свойствам растворов необходимы также для расчетов показателей, определяющих направление и скорость протекания технологических процессов. Существующие методы расчета свойств многокомпонентных систем также базируются на свойствах их бинарных составляющих [2]. В связи с этим понятна важность прогнозирования показателей пожаровзрывоопасности и термодинамических свойств веществ, исходя из минимального количества экспериментальных данных.

Целью настоящей работы является получение аналитических зависимостей типа *термодинамиче-*

ские свойства – температура вспышки для веществ некоторых гомологических рядов. В предыдущих исследованиях были измерены давление насыщенного пара и объемные свойства жидких веществ гомологических рядов *n*-алкилэтанов (метилэтанов, этилэтанов, *n*-пропилэтанов, *n*-бутилэтанов, *n*-пентилэтанов), алифатических кетонов (диметилкетон, метилэтилкетон, метилпропилкетон, метилбутилкетон, метилпентилкетон) и *n*-спиртов (метанол, этанол, *n*-пропанол, *n*-бутанол, *n*-пентанол, *n*-гексанол) [3, 4]. Константы очищенных веществ удовлетворительно совпадали с литературными данными [5]. Температуры кипения растворов T измерялись эбулиометрическим методом при пониженных давлениях p платиновым термометром сопротивления с точностью $\pm 0,05$ К. Давление насыщенного пара растворов p определялось ртутным манометром (с использованием катетометра В-630) с точностью $\pm 6,66$ Па. Постоянство давления в эбулиометре поддерживалось изодромным регулятором с отрицательной обратной связью с точностью $\pm 6,66$ Па. Детальное описание

экспериментальных установок и методик эксперимента приведено в [4].

Значения энергии Гиббса, энтальпии и энтропии *n*-алкилэтаноатов, алифатических кетонов и *n*-спиртов, рассчитанные с использованием метода Льюиса, не удалось связать с молярной массой (структурой) веществ. Основной недостаток расчета по методу Льюиса заключается в том, что значения термодинамических функций неадекватно характеризуют межмолекулярное взаимодействие в жидкости. Например, для индивидуальной жидкости, находящейся в равновесии с паром, уравнение изменения энергии Гиббса ΔG имеет вид:

$$\Delta G = G_{\text{пар}} - G_{\text{жид}} = 0, \quad (1)$$

где $G_{\text{пар}}$, $G_{\text{жид}}$ — значения энергии Гиббса соответственно паровой и жидкой фаз.

Складывается впечатление, что энергия Гиббса “не чувствует” межмолекулярного взаимодействия в жидкости. Раковский еще в 1935 г. писал, что “путь школы Льюиса полезен, но он стал довлеть над исследователями, заслоняя от них теоретическую сторону термодинамики”. Ряд исследователей (Белл и Гетти; Гиршфельдер, Кертис и Берд; Никольский; Раулинсон) уже обращали внимание на неполноту формального описания термодинамических свойств растворов [6]. Работы этих ученых содержат интересные попытки учета вкладов межмолекулярного взаимодействия в изменение термодинамических функций растворов. Однако это направление, к сожалению, не привлекло внимания широкого круга исследователей. Имеющиеся публикации разобщены, теоретический смысл приемов, их общность и значимость до конца не выяснены.

Возможность построения на этой основе общего подхода рассмотрена Рудаковым [7] и автором статьи [8]. Энергия межмолекулярного взаимодействия обычно определяется как работа разведения молекул на бесконечное расстояние. Однако возможно и другое решение задачи: изолирование молекул с целью исключить их взаимодействие путем наложения внешнего энергетического поля при сохранении расстояния между ними. Это — состояние, подобное жидкости, со свойствами идеального газа. Если энергии “изолированных” и “разведенных” молекул равны, то на исключение межмолекулярного взаимодействия в обоих случаях затрачивается одинаковая работа.

В термодинамической системе результаты расчетов зависят также от того, каким способом осуществляется процесс исключения межмолекулярного взаимодействия — путем расширения системы до объема $V \rightarrow \infty$ или при $V = \text{const}$. Число возможностей реализации данного процесса неограниченно, если принять во внимание промежуточные слу-

чай (между $V \rightarrow \infty$ и $V = \text{const}$), а также случаи различного теплового обмена с окружающей средой.

Недостаточно сказать, что стандартная система без межмолекулярного взаимодействия — идеальный газ. Необходимо точно определить его состояние. Идеальный газ имеет две степени свободы, поэтому введем два ограничения. Прежде всего исключим работу против любых сил, кроме межмолекулярного взаимодействия, что ведет к условию $V = \text{const}$. Далее возможны два варианта: 1) адиабатический, $S = \text{const}$; 2) изотермический, $T = \text{const}$, когда энтропия системы меняется за счет межмолекулярного взаимодействия, но не температуры. Эти соображения объясняют необходимость проведения процесса при условии $V = \text{const}$, $T = \text{const}$.

В качестве стандарта для расчета термодинамических функций использовали идеальный газ, взятый при температуре T , объеме V и составе x реальной жидкости. Вклад межмолекулярного взаимодействия в термодинамическую функцию $\hat{X}$ определяли как:

$$\hat{X} = X^* - X, \quad (2)$$

где X^* , X — значения функции соответственно для идеального газа и реальной жидкости.

Энергию Гельмгольца $\hat{F}$, внутреннюю энергию $\hat{U}$ и энтропию $\hat{S}$ межмолекулярного взаимодействия в жидкости находили из соотношений:

$$\hat{F} = F^* - F; \quad (3)$$

$$\hat{U} = U^* - U; \quad (4)$$

$$\hat{S} = S^* - S. \quad (5)$$

Данные величины связаны уравнением Гиббса — Гельмгольца:

$$\hat{U} = \hat{F} - T\hat{S}. \quad (6)$$

В случае перехода моля вещества из состояния идеального газа в жидкое состояние (с межмолекулярным взаимодействием) получали [9]:

$$\hat{F} = RT \ln \frac{RT}{P^0 V^0} - RT + P^0 V^0; \quad (7)$$

$$\hat{S} = H^0 - RT \ln \frac{RT}{P^0 V^0}; \quad (8)$$

$$\hat{U} = H^0 - RT + P^0 V^0, \quad (9)$$

где R — универсальная газовая постоянная;

T — температура кипения, К;

P^0 , V^0 — давление пара и мольный объем жидкости;

H^0 — мольная теплота испарения жидкости.

На основе опытных и литературных данных [3–5] по уравнениям (7)–(9) рассчитывали значения $\hat{F}$, $\hat{U}$ и $T\hat{S}$ для жидких *n*-алкилэтаноатов, алифатических кетонов и *n*-спиртов. Анализ результатов расчетов

Таблица 1. Значения коэффициентов k , b и корреляционные коэффициенты r^2 для уравнений (10)–(12)

Уравнение	Гомологический ряд								
	<i>n</i> -Алкилэтаноаты			Алифатические кетоны			<i>n</i> -Спирты		
	$T = 323 \text{ K}$		r^2	$T = 328 \text{ K}$		r^2	$T = 353 \text{ K}$		r^2
	k	b		k	b		k	b	
$\hat{F} = k_1 M + b_1$ (10)	125,5	4105	0,9951	116,2	6607	0,9999	107,8	18250	0,9999
$\hat{U} = k_2 M + b_2$ (11)	272,6	7690	0,9995	294,4	9039	0,9999	229,2	27903	0,9999
$T\hat{S} = k_3 M + b_3$ (12)	146,5	3632	0,9997	178,2	2431	0,9903	121,5	9282	0,9903

показал, что значения $\hat{F}$, $\hat{U}$ и $T\hat{S}$ для веществ в гомологических рядах линейно зависят от их молярной массы M и могут быть описаны уравнениями вида:

$$\hat{F} = k_1 M + b_1; \quad (10)$$

$$\hat{U} = k_2 M + b_2; \quad (11)$$

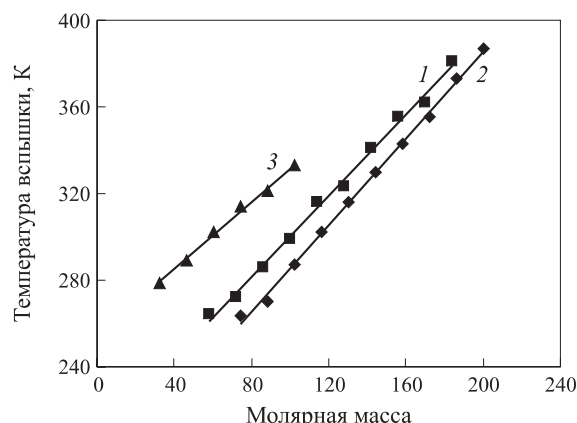
$$T\hat{S} = k_3 M + b_3, \quad (12)$$

где k_1 , k_2 , k_3 , b_1 , b_2 , b_3 — коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов с использованием программы CurveExpert 1.3 (табл. 1).

Уравнения (10)–(12) описывают термодинамические свойства жидких *n*-алкилэтаноатов, алифатических кетонов и нормальных спиртов с точностью порядка ± 20 Дж/моль.

Линейная зависимость значений $\hat{F}$, $\hat{U}$ и $T\hat{S}$ от молярной массы вещества (числа групп $-\text{CH}_2-$ в молекуле) указывает, на наш взгляд, на подобие жидких структур этих веществ. Установленные закономерности могут быть использованы для совершенствования групповых моделей растворов (UNIFAC, ASOG) [10].

Температура вспышки является одним из важнейших показателей пожарной опасности и принимается за основу классификации жидкостей по степени их пожаровзрывоопасности. Анализом литературных данных [11–14] установлено, что температура вспышки веществ аддитивно возрастает с увеличением молярной массы вещества (числа групп $-\text{CH}_2-$ в молекуле) в гомологическом ряду для рядов *n*-алкилэтаноатов (метилэтаноат, этилэтаноат, пропилэтаноат, бутилэтаноат, пентилэтаноат, гексилэтаноат, гептилэтаноат, октилэтаноат, нонилэтаноат, децилэтаноат), алифатических кетонов (диметилкетон, ме-

**Рис. 1.** Зависимость температуры вспышки от молярной массы вещества в гомологическом ряду: 1 — алифатические кетоны; 2 — *n*-алкилэтаноаты; 3 — *n*-спирты

тилэтилкетон, метилпропилкетон, метилбутилкетон, метилпентилкетон, метилгексилкетон, метилгептилкетон, метилоктилкетон, метилнонилкетон, метилдецилкетон) и *n*-спиртов (метанол, этанол, *n*-пропанол, *n*-бутанол, *n*-пентанол, *n*-гексанол) (рис. 1). Предложено уравнение, связывающее температуру вспышки $T_{\text{всп}}$ (К) с молярной массой вещества в гомологическом ряду:

$$T_{\text{всп}} = k_4 M + b_4, \quad (13)$$

где k_4 , b_4 — коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов с использованием программы CurveExpert 1.3 (табл. 2).

С учетом аддитивной зависимости величины энергии Гельмгольца от молярной массы вещества в гомологическом ряду (уравнение (10)) представлялось целесообразным установить взаимосвязь энергии

Таблица 2. Значения коэффициентов k , b и корреляционные коэффициенты r^2 для уравнений (13)–(15)

Уравнение	Гомологический ряд								
	<i>n</i> -Алкилэтаноаты			Алифатические кетоны			<i>n</i> -Спирты		
	k	b	r^2	k	b	r^2	k	b	r^2
$T_{\text{всп}} = k_4 M + b_4$ (13)	0,9975	185,9	0,9975	0,9337	206,9	0,9957	0,77	254,66	0,9951
$\hat{F}_{\text{всп}} = k_5 M + b_5$ (14)	93,22	9399	0,9988	42,68	14723	0,9635	76,67	16181	0,9738
$\hat{F}_{\text{всп}} = k_6 T_{\text{всп}} + b_6$ (15)	94,14	8179	0,9829	40,78	6767	0,9566	98,40	8818	0,9555

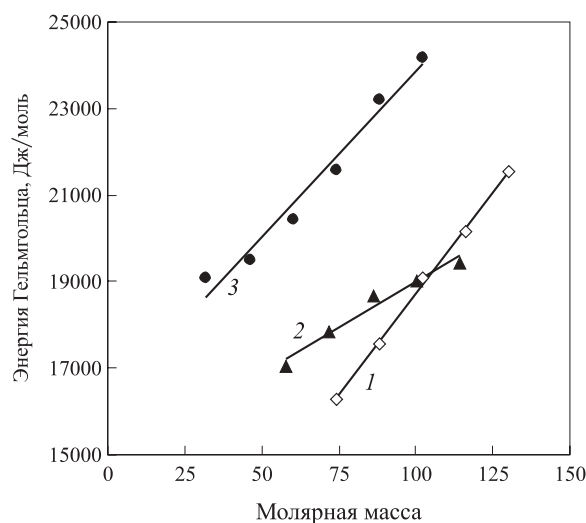


Рис. 2. Зависимость энергии Гельмгольца, рассчитанной для температур вспышки веществ, от молярной массы вещества в гомологическом ряду: 1 — *n*-алкилэтаноаты; 2 — алифатические кетоны; 3 — *n*-спирты

Гельмгольца с температурой вспышки вещества в гомологическом ряду. С этой целью были рассчитаны значения энергии Гельмгольца [3, 4, 9] для температур вспышки в гомологических рядах исследуемых веществ. Оказалось, что энергия Гельмгольца при температуре вспышки веществ также аддитивно возрастает с увеличением молярной массы вещества (числа групп $-CH_2-$ в молекуле) в гомологическом ряду (рис. 2).

Получены уравнения, связывающие рассчитанную при температуре вспышки вещества энергию Гельмгольца $\hat{F}_{всп}$ с молярной массой вещества в гомологическом ряду:

$$\hat{F}_{всп} = k_5 M + b_5, \quad (14)$$

где k_5, b_5 — коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов с использованием программы CurveExpert 1.3 (см. табл. 2).

Учитывая общую тенденцию к изменению значений температуры вспышки (см. рис. 1) и энергии Гельмгольца, рассчитанной при температуре вспышки (см. рис. 2), от молярной массы веществ в гомологических рядах, целесообразно установить их взаимосвязь. Корреляционным анализом полученных данных установлено, что значения энергии Гельм-

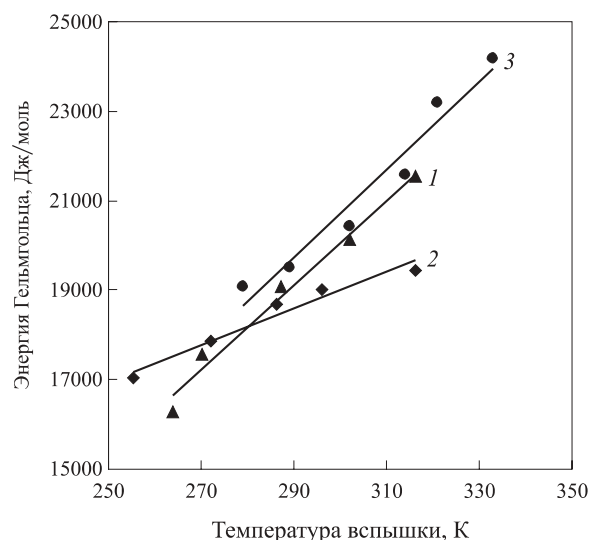


Рис. 3. Зависимость энергии Гельмгольца от температуры вспышки для веществ в гомологическом ряду: 1 — *n*-алкилэтаноаты; 2 — алифатические кетоны; 3 — *n*-спирты

гольца линейно возрастают с повышением температуры вспышки веществ в гомологических рядах для *n*-алкилэтаноатов, алифатических кетонов и *n*-спиртов (рис. 3).

Корреляционным анализом с использованием программы TableCurve 3D v4.0 получены уравнения вида:

$$\hat{F}_{всп} = k_6 T_{всп} + b_6, \quad (15)$$

где k_6, b_6 — коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов (см. табл. 2).

Уравнение (15) позволяет прогнозировать с необходимой для практических целей точностью температуры вспышки веществ в гомологических рядах. Таким образом, подведена термодинамическая основа для определения температуры вспышки органических веществ, дающая возможность дальнейшего совершенствования ГОСТ 12.1.044–89 [1].

Установленные закономерности и полученные на их основе уравнения (10)–(15) позволяют значительно сократить объем эксперимента и выявить недостоверные экспериментальные данные. Уравнения (10)–(15) могут быть использованы также для прогнозирования свойств неизученных веществ в тех случаях, когда специалисты не располагают соответствующим лабораторным оборудованием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 12.1.044–89*. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. — Введ. 01.01.1991. — М.: Стандартинформ, 2006. — 100 с.
- Термодинамика равновесия жидкость – пар / А. Г. Морачевский, Н. А. Смирнова, Е. М. Пиотровская и др.; под ред. А. Г. Морачевского. — Л.: Химия, 1989. — 344 с.
- Сунцов Ю. К., Горюнов В. А. Корреляционные зависимости термодинамических свойств жидких замещенных углеводородов различных гомологических рядов // Журнал физической химии. — 2003. — Т. 77, № 12. — С. 2297–2299.

4. Сунцов Ю. К., Власов М. В., Чуйков А. М. Фазовые равновесия жидкость – пар и термодинамические свойства растворов *n*-пропанол — алифатические кетоны // Журнал физической химии. — 2015. — Т. 89, № 6. — С. 900–904. DOI: 10.7868/S0044453715060291.
5. National Institute of Standards and Technology (NIST) Chemistry WebBook. Search for Species Data by Chemical Formula. URL: <http://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser.html> (дата обращения: 30.08.2015).
6. Rowlinson J. S. Liquids and liquid mixtures. — London : Butterworth Scientific, 1959.
7. Рудаков Е. С. Молекулярная, квантовая и эволюционная термодинамика (развитие и специализация метода Гиббса). — Донецк : Донецкий госуниверситет, 1998. — 139 с.
8. Suntsov Yu. K. Legitimacies change of properties of binary systems on an example of solutions formed by aliphatic alcohol and complex ethers of organic acids // The report on XVIII International conferences “Thermodynamics–2003”. — England, Cambridge : University of Cambridge, 2003. — P. 99.
9. Suntsov Yu. K. New method of predicting the thermodynamic properties of solutions // Journal of Chemistry and Chemical Engineering. — 2014. — Vol. 8, No. 3. — P. 306–314. DOI: 10.17265/1934-7375/2014.03.013.
10. Walas S. M. Phase equilibria in chemical engineering. — Boston : Butterworths Publishers, 1985. — 671 p.
11. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. — 2-е изд. перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. I. — 713 с.; ч. II. — 774 с.
12. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справ. изд. : в 2 кн. / Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. и др. — М. : Химия, 1990. — Кн. 1. — 496 с.
13. Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Алексеев К. С., Орлов С. А. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. III. Кетоны (часть 2) // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 7. — С. 8–13.
14. Алексеев С. Г., Барбин Н. М., Алексеев К. С., Орлов С. А. Связь показателей пожарной опасности с химическим строением. II. Кетоны (часть 1) // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 6. — С. 8–15.

Материал поступил в редакцию 27 января 2016 г.

Для цитирования: Сунцов Ю. К., Сорокина Ю. Н., Чуйков А. М., Горюнов В. А. Взаимосвязь энергии Гельмгольца с температурой вспышки веществ в гомологических рядах *n*-алкилэтанов, *n*-спиртов и кетонов // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 27–33. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.27-33.

English

HELMHOLTZ ENERGY INTERRELATION WITH A FLASH POINT FOR COMPOUNDS IN HOMOLOGOUS SERIES OF *n*-ALKYL ETHANOATES, *n*-ALCOHOLS AND KETONES

SUNTSOV Yu. K., Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of Chemistry and Combustion Department, Voronezh Institute of State Firefighting Service of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya St., 231, Voronezh, 394052, Russian Federation; e-mail address: jsyntsov@mail.ru)

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

CHUYKOV A. M., Candidate of Technical Sciences, Head of Chemistry and Combustion Department, Voronezh Institute of State Firefighting Service of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya St., 231, Voronezh, 394052, Russian Federation)

GORJUNOV V. A., Candidate of Chemical Sciences, Senior Lecturer of Chemistry and Combustion Department, Voronezh Institute of State Firefighting Service of Emercom of Russia (Krasnoznamennaya St., 231, Voronezh, 394052, Russian Federation)

ABSTRACT

The number of organic compounds exceeded 20 million and increases each year by 300 thousand. To ensure the fire safety and technological calculations of processes of production, for storage and transportation materials there are needed data rates fire and explosion hazard substances. To elucidate

how the thermodynamic properties of liquid compounds are related to their molecular characteristics, it is necessary to study the properties of compounds in homologous series. The available methods for calculating the properties of multi component systems are also based on the properties of the constituent components.

As objects of research there were selected substances homologous series of *n*-alkyletanoats, aliphatic ketones and alcohols. At various temperatures vapor pressure and density of the liquids in the homologous series were measured. Lewis-Randal calculations do not allow us to directly relate the thermodynamic function values of substances to the molecular weight (structure) of chemical substance. As a reference for calculating the contributions from intermolecular interaction, we used an ideal gas at the temperature, volume of a real liquid and obeying the same statistics.

Based on experimental data and using the standard of ideal gas (taken at the temperature and volume of liquid) there are calculated the values internal energy, entropy, and Helmholtz energy. The analysis determined that values of thermodynamic functions are linearly dependent on the molecular weight of the substance in the homologous series.

Analysis of published data established as a linear dependence of the flash point of substances of molecular weight substances in the homologous series. Considering the tendency of change these properties it's established that the flash point of substances linearly dependent on the values of the energy of Helmholtz of substances homologous series. The corresponding equations were obtained.

The established regularities and obtained based on these equations allow us to predict the properties of homologous series of substances with the necessary accuracy for practical purposes.

Keywords: saturated vapor pressure; molar volume; internal energy; entropy; Helmholtz energy; flash point; correlation equations.

REFERENCES

1. *Interstate Standard 12.1.044–89*. Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination.* Moscow, Standartinform Publ., 2006. 100 p. (in Russian).
2. Morachevskiy A. G. (ed.), Smirnova N. A., Piotrovskaya Ye. M. et al. *Termodinamika ravnovesiya zhidkost – par* [The thermodynamics of liquid – vapor equilibrium]. Leningrad, Khimiya Publ., 1989. 344 p.
3. Suntsov Yu. K., Goryunov V. A. Korrelyatsionnyye zavisimosti termodinamicheskikh svoystv zhidkikh zameshchennykh uglevodorodov razlichnykh gomologicheskikh ryadov [Correlation dependences of the thermodynamic properties of liquid substituted hydrocarbons belonging to various homologous series]. *Zhurnal fizicheskoy khimii — Russian Journal of Physical Chemistry*, 2003, vol. 77, no. 12, pp. 2297–2299.
4. Suntsov Yu. K., Vlasov M. V., Chuykov A. M. Fazovyye ravnovesiya zhidkost – par i termodinamicheskiye svoystva rastvorov *n*-propanol – alifaticheskiye ketony [Phase liquid – vapor equilibrium and thermodynamic properties of solutions of *n*-propanol – aliphatic ketones]. *Zhurnal fizicheskoy khimii — Russian Journal of Physical Chemistry*, 2015, vol. 89, no. 6, pp. 900–904. DOI: 10.7868/S0044453715060291.
5. *National Institute of Standards and Technology (NIST) Chemistry WebBook. Search for Species Data by Chemical Formula.* Available at: <http://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser.html> (Accessed 30 August 2015) (in Russian).
6. Rowlinson J. S. *Liquids and liquid mixtures*. London, Butterworth Scientific, 1959.
7. Rudakov E. S. *Molekulyarnaya, kvantovaya i evolyutsionnaya termodinamika (razvitiye i spetsializatsiya metoda Gibbsa)* [Molecular, quantum and evolution thermodynamics (development and specialization of the Gibbs method)]. Donetsk, Donetsk State University Publ., 1998. 139 p.
8. Suntsov Yu. K. Legitimacies change of properties of binary systems on an example of solutions formed by aliphatic alcohol and complex ethers of organic acids. *The report of XVIII International Conferences "Thermodynamics–2003"*. England, Cambridge, University of Cambridge, 2003, p. 99.
9. Suntsov Yu. K. New method of predicting the thermodynamic properties of solutions. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2014, vol. 8, no. 3, pp. 306–314. DOI: 10.17265/1934-7375/2014.03.013.
10. Walas S. M. *Phase equilibria in chemical engineering*. Boston, Butterworths Publishers, 1985. 671 p.
11. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik. 2-e izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part I, 713 p.; part II, 774 p.

12. Baratov A. N., Korolchenko A. Ya., Kravchuk G. N. et al. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: sprav. izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of extinguishing. Reference edition]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. Book 1, 496 p.
13. Alexeev S. G., Barbin N. M., Alexeev K. S., Orlov S. A. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroeniyem. III. Ketony (chast 2) [Correlation of fire hazard indexes with chemical structure. III. Ketones (Part 2)]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 7, pp. 8–13.
14. Alexeev S. G., Barbin N. M., Alexeev K. S., Orlov S. A. Svyaz pokazateley pozharной opasnosti s khimicheskim stroeniyem. III. Ketony (chast 1) [Correlation of fire hazard indexes with chemical structure. II. Ketones (Part 1)]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 6, pp. 8–15.

For citation: Suntsov Yu. K., Sorokina Yu. N., Chuykov A. M., Goryunov V. A. Vzaimosvyaz energii Gelmgoltsa s temperaturoy vspyshki veshchestv v gomologicheskikh ryadakh *n*-alkiletanoatov, *n*-spirtov i ketonov [Helmholtz energy interrelation with a flash point for compounds in homologous series of *n*-alkyl ethanoates, *n*-alcohols and ketones]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 27–33. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.27-33.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу

Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко

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

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



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

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

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

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

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

Ж. К. МАКИШЕВ, адъюнкт, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: makishev_jkkti@mail.ru)

А. Б. СИВЕНКОВ, д-р техн. наук, доцент, ученый секретарь, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: sivenkov01@mail.ru)

УДК 614.8:699.8

ОГНЕСТОЙКОСТЬ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Представлены результаты исследования огнестойкости деревянных конструкций с продолжительным сроком эксплуатации. Установлено, что временной фактор имеет значительное влияние на интенсивность обугливания деревянных конструкций, а также на температуру начала данного процесса. Обнаружено, что древесина с длительным сроком эксплуатации теряет свои первоначальные прочностные свойства уже при температуре 80 °С. С помощью физико-химических методов изучены свойства и структура угольных остатков, их окислительная и теплопроводная способность. Проведены крупномасштабные испытания по оценке огнестойкости деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации в соответствии с ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94.

Ключевые слова: древесина; деревянные конструкции; срок эксплуатации; пиролиз; механическая прочность; огнестойкость; обугливание.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.34-44

Введение

Деревянные конструкции остаются одними из самых применяемых и востребованных при строительстве зданий и сооружений жилого, общественного, производственного, складского, животноводческого и сельскохозяйственного назначения. Наиболее динамичное развитие строительной индустрии с применением строительных конструкций из древесины наблюдается в России, бывших странах СНГ, ряде Европейских стран, Австралии, Японии, Канаде и США. Во многом это объясняется эстетической декоративностью, относительно высокой механической прочностью и устойчивостью этих конструкций к воздействию внешней окружающей среды [1].

Уникальными примерами долговечности деревянных конструкций служат такие объекты, как Гринстедская церковь (Гринстед, Эссекс, Великобритания, 1045 г.), церковь Воскрешения Лазаря (Кизи, Архангельская обл., Россия, 1391 г.), церковь Святого Николая Чудотворца в Колодном (Закарпатье, Украина, 1470 г.), Успенская церковь (с. Нелазкое, Вологодская обл., Россия, 1694 г.), Михаило-Архангельский собор (г. Уральск, Республика Казахстан, 1750 г.) и многие другие.

В последние десятилетия пристальное внимание научного сообщества было обращено на изменение качественных характеристик древесины в результате продолжительной эксплуатации деревянных конструкций зданий и сооружений [2–4]. В этих работах было показано значительное влияние длитель-

ного естественного старения на физико-химические, механические и другие свойства древесины в результате трансформации ее структуры и происходящих в ней химических превращений.

Несмотря на это малоизученным остается вопрос о влиянии продолжительного естественного старения на пожароопасные свойства древесины. Анализ пожаров свидетельствует о необычном поведении объектов с деревянными конструкциями с продолжительным сроком эксплуатации в условиях воздействия высоких температур. Характерными особенностями таких пожаров являются: аномально высокая температура, быстрое развитие пожара и значительная степень термического повреждения конструкций из древесины. Примерами деревянных объектов с длительным сроком эксплуатации, утраченных в результате пожаров, являются Костел Святой Катерины (Острава, Чехия, 1543 г.), церковь Богоявления (Воскресенский монастырь Нового Иерусалима (Московская обл., Россия, 1673 г.), церковь Спаса на сваях (Ипатьевский монастырь, г. Кострома, Россия, 1713 г.), церковь Покрова Пресвятой Богородицы (Узденский район, Минская обл., Республика Беларусь, 1898 г.), дом тканей “Кызыл-Тан” (г. Алматы, Республика Казахстан, 1912 г.) и десятки других исторических памятников мирового наследия.

Изучению нестандартного поведения деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации в условиях пожара и их пожарной опасности посвя-

щено относительно немного работ [5–8]. В них впервые был установлен факт существования нового вида угрозы для человека, обусловленного спецификой поведения в условиях пожара конструкций из древесины с длительным сроком эксплуатации.

Одним из главных требований, предъявляемых к конструкциям из древесины с ограждающими или несущими функциями, является обеспечение приемлемой огнестойкости. Изменение в условиях пожара прочностных и геометрических характеристик сечений вызывает снижение несущей способности элементов и узлов деревянных конструкций, выраженной пределом огнестойкости конструкции. Однако вопрос об изменении показателей огнестойкости деревянных конструкций в результате длительной эксплуатации остается неизученным. Отсутствие научных исследований в этом направлении, а также неучет создателями нормативной и справочной баз в области пожарной безопасности такого фактора, как продолжительность эксплуатации конструкций, определяет актуальность данных исследований. В работе представлялось важным выяснить, как количественно изменяется не только предел огнестойкости деревянных конструкций с увеличением срока их службы, но и параметры их обугливания, а также какое влияние оказывает длительное воздействие окружающей среды на интенсивность и особенности формирования обугленного слоя, его физическую структуру в условиях пожара.

Объекты и методы исследования

Для исследования были взяты цельные деревянные конструкции длиной от 1,5 до 3,5 м. Основные характеристики исследуемых образцов конструкций представлены в табл. 1.

В работе был использован комплекс современных методов исследования: методы термического ана-

лиза (ТГ, ДТГ, ДСК), метод сорбции паров, метод определения физико-механических показателей материалов. Для определения параметров обугливания в условиях воздействия стандартного температурного режима пожара была использована экспериментальная маломасштабная огневая печь с возможностью реализации стандартного температурного режима пожара, а также крупномасштабная огневая печь для оценки огнестойкости строительных конструкций в соответствии с требованиями ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94.

Результаты исследования и их обсуждение

При анализе образцов деревянных конструкций было установлено, что при увеличении срока эксплуатации наблюдается повышение плотности древесины, обусловленное удалением легколетучих низкокипящих компонентов из древесного материала, усушкой и трансформацией его морфологической структуры. Изменение структуры древесины сказывается на ее физико-механических характеристиках, которые являются определяющими при оценке огнестойкости деревянных конструкций. В работе было изучено изменение плотности и прочности образцов древесины, подвергавшейся процессу естественного старения, при воздействии температуры в условиях пожара. Температурное воздействие на образцы осуществлялось в муфельной печи и длилось от 30 мин до 2 ч. Оценка изменения предела прочности деревянных конструкций на сжатие вдоль волокон проводилась с помощью электромеханической универсальной испытательной машины TIME WDW-50E.

Полученные результаты показывают, что при усилении температурного воздействия на образцы древесины с различными сроками эксплуатации наблю-

Таблица 1. Основные характеристики образцов деревянных конструкций

Номер образца	Деревянная конструкция	Место отбора образцов	Срок эксплуатации, лет	ρ , кг/м ³ *
0	Деревянная балка (древесина сосны)	Архангельская обл., Россия (современная древесина)	–	452
1	Элементы стропильной части дома (древесина сосны)	Нежилой дом (1952 г.), с. Жанажол, Северо-Казахстанская обл., Республика Казахстан	63	477
2	Внутренние элементы конструкций (древесина сосны) межэтажного перекрытия (между 1-м и подвальным этажами)	Театр кукол “Гулливер” (1890 г.), г. Курган, Россия	125	588
3	Деревянные несущие конструкции (древесина сосны)	Церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская обл., Россия	150	643
4	Элементы стропильной части дома (древесина сосны)	Нежилой дом (1928 г.), с. Кайынды, Костанайская обл., Республика Казахстан	87	546

* Влажность образцов древесины перед проведением огневых испытаний составляла 12 %.

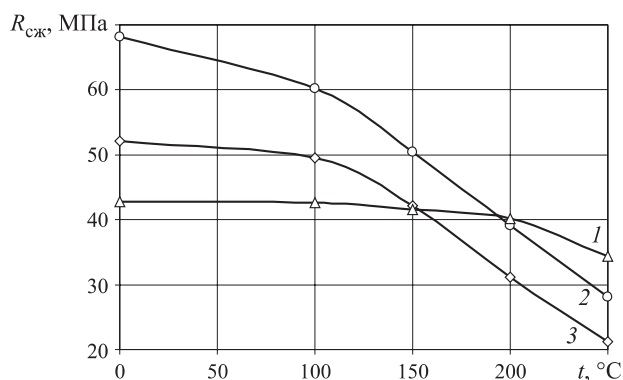


Рис. 1. Изменение предела прочности образцов древесины сосны на сжатие вдоль волокон $R_{сж}$ в зависимости от температуры: 1 — современная древесина (Архангельская обл.); 2 — элементы деревянного перекрытия (1890 г.), театр кукол “Гулливер”, г. Курган; 3 — церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская обл.

дается снижение их плотности и предела прочности на сжатие вдоль волокон (рис. 1).

Интересно отметить, что для древесины, подвергавшейся длительному естественному старению, процесс снижения предела прочности происходит при меньшей температуре по сравнению с современной древесиной. Для деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации потеря первоначальных механических свойств наблюдается уже при 80 °C, а при температуре 250 °C она достигает 60 %. Для современной древесины начальное снижение механических свойств древесины происходит только при температурах выше 150 °C, что подтверждается результатами ранее проведенных исследований [9].

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что на предел прочности образцов древесины с длительным сроком эксплуатации при воздействии температур до 250 °C в большей степени оказывают влияние процессы термодеструкции и карбонизации, протекание которых с ростом продолжительности эксплуатации деревянной конструкции смещается в низкотемпературную зону, по сравнению с древесиной современной. Подтверждением этого являются результаты, полученные методами термического анализа (ТГ, ДТГ, ДСК). С использованием данных методов были изучены особенности процесса обугливания древесины с различными сроками эксплуатации. Образцы материалов в виде фрагментов правильной формы помещались в тигель термоанализатора Q600 SDT. Навеска образцов изменялась в пределах 1,0–8,5 мг. Нагрев проводился со скоростью 20 °C/мин в токе азота до 500 °C. Далее меняли газ носителя с азота на воздух. Процесс термодеструкции и термоокисления записывался как по ТГА-сигналу, так и по ДСК. Совмещенные ТГ-, ДТГ- и ДСК-кривые представлены на рис. 2.

ТГ- и ДТГ-кривые показывают, что на начальной стадии (температурный диапазон 100–250 °C) происходит более интенсивная потеря массы образцов древесины с длительным сроком эксплуатации по сравнению с образцами современной древесины. В этот период, очевидно, начинается образование угольных структур, что отражается на снижении скорости потери массы на основном участке полученных термограмм (300–400 °C). Последующее повышение температуры приводит к более активной стадии окисления образующегося угольного слоя у образца древесины, подвергавшейся длительному естественному старению. При этом на кривых ДТГ и ДСК зафиксировано значительное повышение скорости потери массы, величины теплового эффекта и скорости тепловыделения при окислительном процессе. Расчет кинетических параметров по ДСК-кривым осуществлялся по методу Борхардта-Дэниельса. Значения энергии активации процесса окисления угольного слоя указывают на снижение энергетических затрат, необходимых для начала данного процесса, а уменьшение значений логарифма предэкспоненты может свидетельствовать об образовании упорядоченного по своей структуре угля (табл. 2).

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что на начальной и основной стадиях термического разложения образцов древесины с длительным сроком эксплуатации вследствие раннего углеобразования наблюдается снижение скорости потери массы образцов. Однако при дальнейшем повышении температуры проявляется негативная роль угольного остатка, обусловленная его высокой способностью к окислению и выделению значительного количества тепла. Для образца древесины со сроком эксплуатации 150 лет скорость тепловыделения фактически в 1,5 раза выше по сравнению с образцами современной древесины.

Повышение интенсивности процесса обугливания конструкций из древесины, подвергавшейся длительному естественному старению, подтверждается результатами экспериментальной оценки параметров обугливания в условиях стандартного температурного режима пожара. При одностороннем нагреве на маломасштабной установке продолжительность испытаний составила 30 мин. Образец крепился с помощью специального держателя в виде рамки. Для измерения температуры были использованы лепестковые хромель-алюмелевые термопары. Термопары подсоединялись к контрольно-измерительному прибору “Элемер”, подключенному к персональному компьютеру для регистрации показаний. Испытания проводились для каждой серии на трех образцах толщиной 30–40 мм, имеющих форму квадрата со стороной 150 мм. Кроме того, огневые испытания

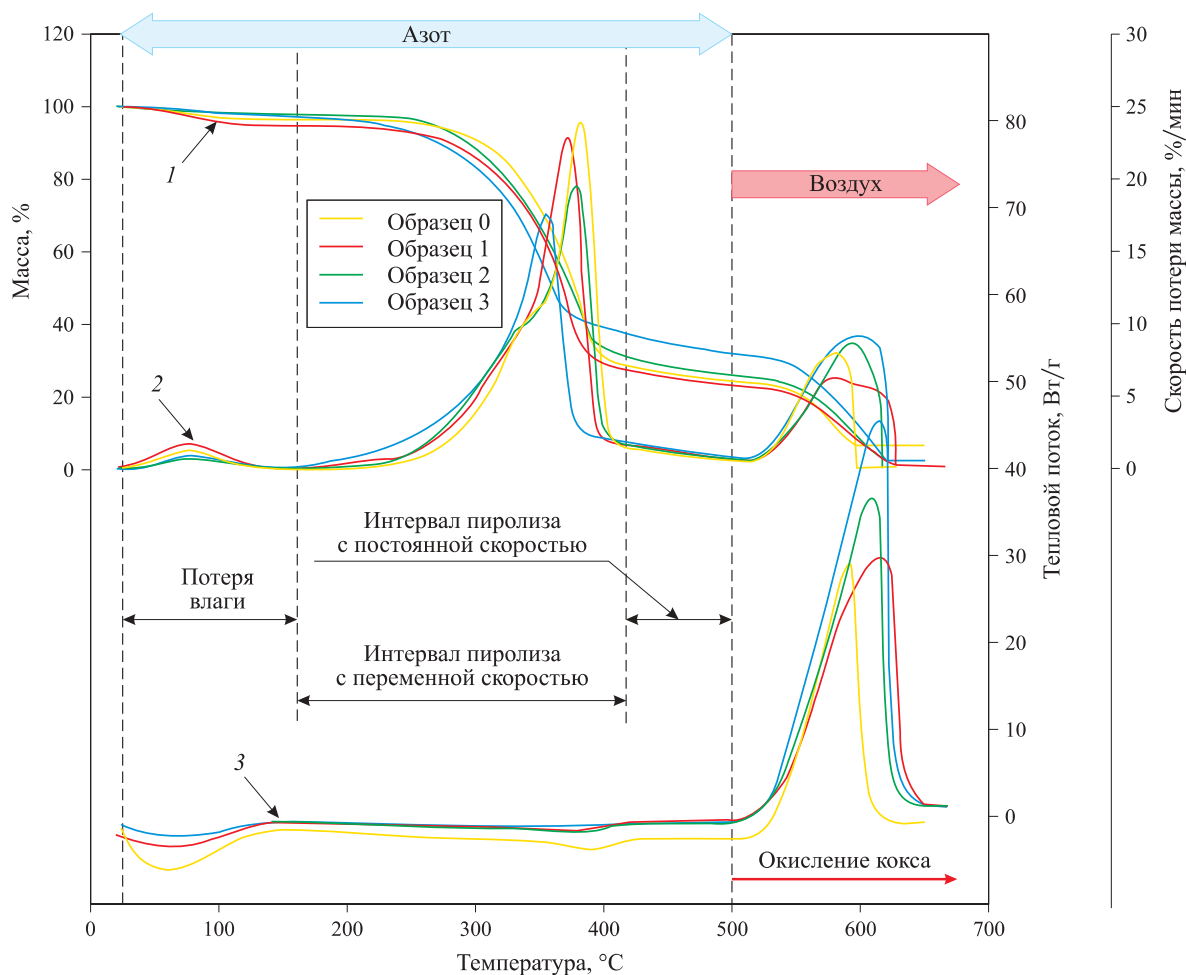


Рис. 2. Результаты термического анализа (ТГ, ДТГ, ДСК) исследуемых образцов древесины сосны с различными сроками эксплуатации (номера образцов см. в табл. 1)

Таблица 2. Характеристики процесса окисления угольного остатка для образцов древесины с различными сроками эксплуатации

Номер образца	Расчетный параметр по ДСК-кривым				
	Тепловой эффект*, Дж/г	Скорость тепловыделения**, Вт/г	Энергия активации, кДж/моль	Логарифм предэкспоненты, 1/мин	Приведенный порядок реакции
0	15318	30,2	331,0	20,15	1
1	25218	28,9	247,9	14,60	1
2	21580	37,3	249,8	14,82	1
3	22176	46,6	240,7	14,23	1

* Тепловой эффект отнесен к массе угольного остатка.
 ** Скорость тепловыделения отнесена к первоначальной массе образца.

проводились на образцах деревянных балок сечением 150×150 мм и длиной 1,5 м.

В табл. 3 представлены результаты оценки параметров обугливания (толщина угольного слоя δ_k , скорость обугливания v , плотность угольного остат-

ка ρ_k , время начала пламенного горения τ_0) исследуемых образцов в маломасштабной огневой печи в условиях стандартного температурного режима пожара.

Результаты, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о том, что при увеличении срока эксплуатации деревянных конструкций наблюдается интенсификация процесса обугливания древесины. Так, в условиях стандартного температурного воздействия на деревянные конструкции со сроком эксплуатации 150 лет (церковь Николая Чудотворца, Брянская обл.) скорость обугливания древесины была в 2,6 раза выше по сравнению с современной.

Плотность образующегося угольного остатка с увеличением срока эксплуатации древесины значительно снижается. Это может свидетельствовать о том, что образующийся угольный слой обладает развитой пористой структурой и более низкими теплофизическими характеристиками по сравнению с образцами современной древесины. Образование подобных угольных структур, наряду с уменьшением количества легколетучих компонентов в древесине, подвергавшейся продолжительному естественному

Таблица 3. Результаты оценки параметров обугливания элементов деревянных конструкций в маломасштабной огневой печи в условиях стандартного температурного режима пожара

Номер образца	Образец	ρ , кг/м ³ *	δ_k , мм	v , мм/мин	ρ_k , кг/м ³	τ_0 , с
1	Древесина сосны современной	452	16,5	0,62	252	224
2	Древесина сосны, нежилой дом (1952 г.), с. Жанажол, Северо-Казахстанская обл., Республика Казахстан	477	24	0,94	246	280
3	Древесина сосны, нежилой дом (1928 г.), с. Кайынды, Костанайская обл., Республика Казахстан	546	28	1,1	237	295
4	Древесина сосны, элементы деревянного перекрытия (1890 г.), театр кукол “Гулливёр”, г. Курган	588	31	1,26	224	325
5	Древесина сосны, церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская обл.	643	35	1,43	220	335
6	Сосна, несущая деревянная балка (сечением 150×150 мм, длиной 1,5 м)	452	13	0,5	258	310
7	Древесина сосны, церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская область (балка сечением 150×150 мм, длиной 1,5 м)	643	33	1,3	215	420

* Плотность образцов древесины перед проведением огневых испытаний составляла 12 %.

старению, приводит к повышению устойчивости материала к воспламенению. Для всех исследуемых образцов древесины с длительным сроком эксплуатации увеличивается время начала пламенного горения.

На рис. 3 представлены фотоснимки поверхности исследуемых образцов древесины после огневых испытаний в маломасштабной огневой печи в условиях стандартного температурного режима пожара.

Из фотоснимков видно, что для современной древесины сосны характерно значительное обугливание с образованием глубоких усадочных трещин. Для образцов с длительным сроком эксплуатации, наряду с высокой степенью термического повреждения, характерны “следы” переугливания верхних угольных слоев вследствие их высокой окислительной активности, интенсивного тепловыделения и создания высокотемпературного поля в зоне пиро-

лиза поверхностного слоя. Эти особенности процесса обугливания, свойства и структура угольного слоя являются определяющими при рассмотрении поведения деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации в условиях пожара и их огнестойкости.

Для исследования характеристик поверхностного угольного слоя был использован метод сорбции паров. Адсорбент представлял собой угольный порошок мелкой фракции (0,3–0,5 мм). Образцы угля были отобраны с образцов древесины, испытанных в маломасштабной установке в условиях стандартного температурного режима пожара. В качестве адсорбата использовался бензол, поскольку это вещество имеет большое поверхностное натяжение и может смачивать поверхность капилляров древесины. Кинетические кривые адсорбции угольных остатков исследуемых образцов представлены на рис. 4.



Рис. 3. Вид поверхности образцов древесины после огневых испытаний в маломасштабной установке: а — современной (Архангельская обл.); б — элементы деревянного перекрытия (1890 г.), театр кукол “Гулливёр”, г. Курган; в — церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская обл.

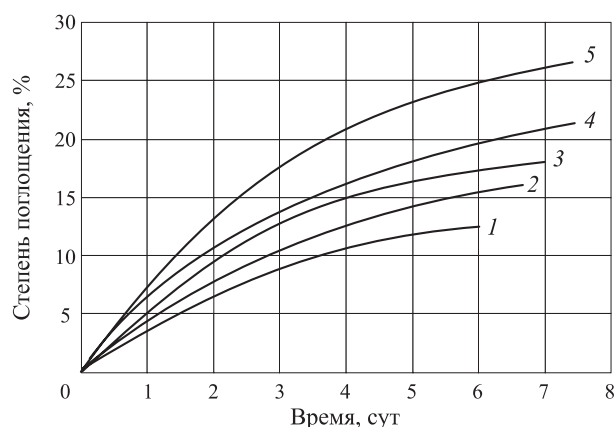


Рис. 4. Кинетические кривые сорбции паров бензола для угольных остатков у образцов древесины сосны с различными сроками эксплуатации: 1 — современная древесина; 2 — нежилой дом (1952 г.), с. Жанажол, Северо-Казахстанская область, Республика Казахстан; 3 — нежилой дом (1928 г.), с. Кайынды, Костанайская обл., Республика Казахстан; 4 — элементы деревянного перекрытия (1890 г.), театр кукол “Гулливёр”; 5 — церковь Николая Чудотворца (1865 г.), Брянская обл.

Из рис. 4 видно, что максимальные значения прироста адсорбата наблюдаются у угольного остатка древесины сосны со сроком эксплуатации 150 лет (26,76 %), что фактически в 2 раза превышает степень поглощения a_m образцов углей для древесины современной (14,8 %). Для угольного остатка современной древесины характерно быстрое насыщение парами адсорбента на начальном этапе и дальнейшая стабилизация кривой. Полное насыщение образцов парами бензола происходит за 6 сут.

Для угольного остатка древесины длительного естественного старения характерно медленное насыщение на начальном этапе (первые 2–3 ч), дальнейшая интенсификация процесса и равномерное насыщение. Как показывают результаты испытаний, период поглощения паров бензола для древесины естественного старения более длительный по сравнению с образцом древесины современной. Полное насыщение образцов парами бензола происходит на 8-е сутки, что подтверждает высказывание о более развитой структуре угольного слоя у древесины, подвергавшейся длительному естественному старению.

Для объяснения полученных результатов были рассчитаны характеристики пористой структуры угольных остатков: суммарный объем пор V_Σ , средний радиус пор d_{cp} и удельная площадь поверхности угольных слоев $S_{уд}$. Результаты расчетов характеристик структуры угольных слоев приведены в табл. 4.

Таким образом, при увеличении срока эксплуатации деревянных конструкций наблюдается активная интенсификация процесса обугливания в усло-

Таблица 4. Характеристики пористой структуры угольных слоев

Номер образца	a_m , %	V_Σ , см ³ /г	d_{cp} , нм	$S_{уд}$, м ² /г
1	14,8	0,4726	25,03348	377,5744
2	16,53	0,3968	20,56678	823,7534
3	18,48	0,6812	18,51378	1038,637
4	21,81	0,6327	12,80586	1554,8574
5	26,76	0,5234	14,65459	1645,7461

виях пожара. Некоторое снижение потери массы на основном участке терморазложения древесины обусловлено особенностями мелкопористой структуры угольного слоя и, по всей видимости, снижением его теплопроводности. Однако в дальнейшем при повышении температуры образованная угольная структура с увеличенной удельной площадью поверхности и удельным объемом пор способствует его повышенной окисляемости, выгоранию и беспламенному (тлеющему) горению. Изменение химического состава древесины и значительная трансформация структуры в результате ее длительной эксплуатации приводят к ускорению процесса обугливания деревянных конструкций, снижению температурного порога утраты первоначальных механических характеристик древесины, что неминуемо скажется на пределе огнестойкости деревянных конструкций.

В подтверждение полученных результатов была проведена экспериментальная оценка огнестойкости деревянных конструкций с продолжительным сроком эксплуатации в условиях крупномасштабных огневых испытаний. Огневые испытания по ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ 30247.1–94 проводились в целях определения времени с момента начала одностороннего теплового воздействия до наступления предельного состояния конструкции по огнестойкости R , глубине и скорости обугливания, а также времени прогрева деревянной балки по глубине.

На испытания был представлен образец несущей балки из древесины сосны, произрастающей в Архангельской обл. (влажность 12,0 %, плотность 452 кг/м³), и образец несущей балки из древесины сосны из Церкви Николая Чудотворца (Брянская обл., 1865 г. постройки) (влажность 12,0 %, плотность 643 кг/м³). Сечение деревянных конструкций — 200×200 мм, длина — 3500 мм.

По результатам огневых испытаний проводилась оценка скорости обугливания, толщины обугливания, времени воспламенения и температуры по толщине балки (размещение термоэлектрических преобразователей внутри образца представлено на рис. 5).

Образцы нагружались в центре испытательной нагрузкой массой 150 кг перед началом проведения

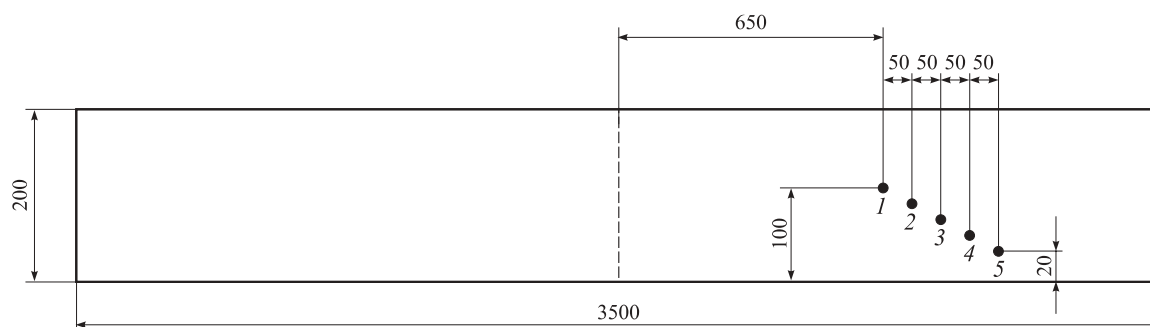


Рис. 5. Схема установки термоэлектрических преобразователей внутри образца деревянной балки



Рис. 6. Фрагмент образца деревянной балки во время огневых испытаний

испытаний. Время испытаний для всех образцов составляло 30 мин. При приложении нагрузки было обеспечено условие, при котором в случае возможной деформации конструкции груз не смещался и не влиял на предел огнестойкости вследствие изменения условий теплообмена с окружающей средой. На рис. 6 представлен фрагмент деревянной балки в камере огневой печи во время испытаний.

Наиболее важным в этой серии испытаний представлялась регистрация параметров обугливания деревянных конструкций в условиях стандартного температурного режима пожара. Значения глубины и

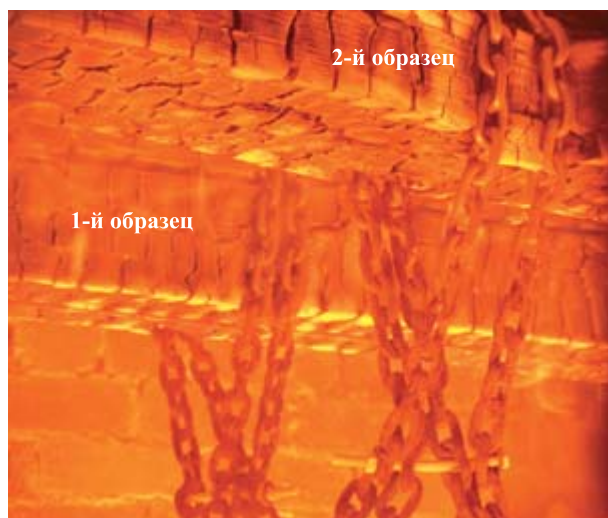


Рис. 7. Общий вид образцов деревянных балок под нагрузкой во время огневых испытаний

скорости обугливания деревянных конструкций (балок) приведены в табл. 5.

Результаты, представленные в табл. 5, показывают, что для деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации интенсивность процесса обугливания во время огневых испытаний повышается фактически в 1,8 раза по сравнению с современной балкой. Значения скорости обугливания для совре-

Таблица 5. Значения глубины и скорости обугливания деревянных конструкций (балок)

Образец	Показатель	Место измерения — расстояние от торцевой части по длине балки, м									Среднее значение
		В торцевой части	0,5	1,0	1,5	1,75	1,5	1,0	0,5	В торцевой части	
Древесина современной сосны (несущая деревянная балка сечением 200×200 мм, длиной 3,5 м). Время воспламенения 5 мин 20 с	Глубина обугливания, мм	17	17	16	15	15	15	16	16	17	15
	Скорость обугливания, мм/мин	0,69	0,69	0,64	0,6	0,6	0,6	0,64	0,64	0,69	0,6
Древесина сосны, церковь Николая Чудотворца, Брянская обл. (1865 г.) (несущая деревянная балка сечением 200×200 мм, длиной 3,5 м). Время воспламенения 6 мин 40 с	Глубина обугливания, мм	27	27	25	26	26	26	26	27	28	26
	Скорость обугливания, мм/мин	1,11	1,11	1,03	1,1	1,1	1,1	1,1	1,11	1,2	1,1

менной древесины сопоставимы со значениями данного показателя, представленными в отечественной и зарубежной нормативной и научной литературе [10–14]. Важным является то, что расхождение результатов измерений скорости обугливания в маломасштабной огневой печи и крупномасштабной установке составляет не более 15 %, что позволяет предсказывать значения параметров обугливания при испытаниях на небольших образцах в условиях одностороннего нагрева.

Исследованиями установлено, что с увеличением срока эксплуатации деревянных конструкций до 150 лет наблюдается повышение устойчивости к воспламенению в 1,3 раза, что подтверждает высказанное предположение о более раннем начале процесса обугливания и формировании специфического угольного слоя с упорядоченной структурой. За время испытаний 30 мин предельное состояние деревянных конструкций по несущей способности не наступило.

Для следующей серии испытаний основной задачей было нахождение предела огнестойкости деревянных конструкций сечением 180×180 мм и длиной 2,5 м. Балки нагружались в центре испытательной нагрузкой массой 100 кг. Два образца деревянных балок (первый — балка современная; второй — балка со сроком эксплуатации 150 лет) одновременно подвергались воздействию стандартного температурного режима пожара. На рис. 7 представлены фрагменты деревянных балок под нагрузкой во время огневых испытаний.

В результате наблюдений было установлено, что для деревянной балки с длительным сроком эксплуатации через 25 мин с начала огневых испытаний прогиб конструкции в центральной части составил 10 %, а через 32 мин — 15 %. Обрушение балки (предел огнестойкости конструкции по потере несущей способности) произошло на 37-й минуте.

Для современной балки прогиб конструкции в центральной части составил 15 % только на 74-й минуте. Предел огнестойкости данной конструкции по потере несущей способности наступил на 81-й минуте. Значительное снижение предела огнестойкости деревянных конструкций с увеличением срока их эксплуатации до 150 лет (в 2,2 раза) обусловлено повышением скорости обугливания конструкций, снижением температурных показателей процесса обугливания и потерей первоначальных механических характеристик древесины, а также повышении-

ем окислительной и теплотворной способности образующегося угольного слоя.

Заключение

В статье представлены результаты исследования огнестойкости деревянных конструкций с продолжительным сроком эксплуатации. Показано, что с увеличением срока эксплуатации деревянных конструкций до 150 лет повышаются плотность и физико-механические характеристики древесины. Однако при температурном воздействии подобные конструкции теряют свои первоначальные прочностные свойства уже при температуре 80 °С.

Установлено значительное влияние временного фактора на скорость обугливания деревянных конструкций. Так, для деревянной балки со сроком эксплуатации 150 лет скорость обугливания повышается в 1,8 раза по сравнению с современной конструкцией из древесины в условиях стандартных огневых испытаний. Показано, что начало процесса обугливания деревянных конструкций с увеличением срока эксплуатации смещается в область более низких температур. Специфические свойства и структура угольных слоев способствуют снижению скорости потери массы на основном участке термического разложения и повышению устойчивости к воспламенению. Однако при дальнейшем возрастании температуры для подобных угольных слоев характерна высокая окислительная и теплотворная способность, склонность к активному выгоранию и беспламенному (тлеющему) горению.

Расхождение результатов измерений скорости обугливания в экспериментальной маломасштабной огневой печи и крупномасштабной установке составляет не более 15 %, что позволяет проводить прогнозную оценку параметров обугливания на небольших образцах в условиях одностороннего нагрева.

Изменения физико-химических и механических свойств древесины с длительным сроком эксплуатации, происходящие при воздействии высоких температур, приводят в целом к снижению предела огнестойкости деревянной конструкции по потере несущей способности в 2,2 раза.

По результатам проведенного исследования следует констатировать факт появления нового вида угрозы, связанной с особенностями поведения деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации в условиях пожара, а также с нестандартными количественными показателями процесса обугливания и огнестойкости этих конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальчук Л. М. Производство деревянных клееных конструкций. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : ООО РИФ “Стройматериалы”, 2005. — 336 с.

2. Варфоломеев Ю. А., Потуткин Г. Ф., Шаповалова Л. Г. Изменение свойств древесины при длительной эксплуатации (на примере памятников деревянного зодчества Архангельской обл.) // Деревообрабатывающая промышленность. — 1990. — № 10. — С. 28–30.
3. Варфоломеев А. Ю. Накопление повреждений в деревянных конструкциях при длительной эксплуатации в условиях биологической агрессии : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2010. — 157 с.
4. Стрельцов Д. Ю. Исследование несущей способности длительно эксплуатируемых деревянных конструкций : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2003. — 168 с.
5. Покровская Е. Н. Прогнозирование долговечности древесины методом термического анализа // Пожаровзрывобезопасность. — 2001. — Т. 10, № 6. — С. 31–32.
6. Тычино Н. А., Федосенко И. Г., Баранов А. В. Особенности строения и огнебиозащиты археологической древесины // Пожаровзрывобезопасность. — 2007. — Т. 16, № 1. — С. 19–25.
7. Aseeva R., Serkov B., Sivenkov A. Fire behavior and fire protection in timber buildings. — Dordrecht : Springer, 2014. — 290 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5.
8. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. — 262 с.
9. Харитонов В. С. Несущая способность изгибаемых клееных деревянных конструкций массивного сечения при тепловом воздействии : дис. ... канд. техн. наук. — М., 1992. — 190 с.
10. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. — Введ. 20.05.2011. — М. : ОАО «ЦПП», 2011.
11. BS EN 1995-1-2:2004: Eurocode 5: Design of timber structure. Part 1-2: General — Structural fire design. — Brussels : CEN, 2004.
12. Fire safety in timber buildings. Technical guideline for Europe / SP Report 2010:19. URL: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/Fire_Timber_Ch_5-7.pdf (дата обращения: 10.10.2015).
13. Гусев А. И., Пазникова С. Н., Кожеевникова Н. С. Повышение огнестойкости деревянных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. — 2006. — Т. 15, № 3. — С. 30–35.
14. White R. H., Nordheim E. V. Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure // Fire Technology. — 1992. — Vol. 28, No. 1. — P. 5–30. DOI: 10.1007/bf01858049.

Материал поступил в редакцию 24 января 2016 г.

Для цитирования: Макишев Ж. К., Сивенков А. Б. Огнестойкость деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 34–44. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.34-44.

English

FIRE RESISTANCE OF WOODEN STRUCTURES A LONG LIFE SPAN

MAKISHEV Zh. K., Postgraduate Student, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: makishev_jkkti@mail.ru)

SIVENKOV A. B., Doctor of Technical Sciences, Professor, Academic Secretary, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail address: sivenkov01@mail.ru)

ABSTRACT

Within the latest decades, the research community has been focused on changes that may take place in qualitative characteristics of wood after long-term use of wooden structures used in buildings and structures. These are research papers by such scientists, as Varfolomeev Yu. A., Gusev B. P., Kesküllä T. E., Kisternaya M. V., Okamoto K., Pishchik I. I., Terentyev V. Ya., Fefilov V. V., Fukada E., Shapovalova L. G. and others. Such papers have shown major impacts produced by long-term natural ageing upon physicochemical, mechanical and other properties of wood due to structural and chemical transformations taking place in the wood.

Today, impact produced by long-term natural ageing of wood upon its fire hazard rates continues to be under-investigated. As shown by analysis of conflagration accidents that have taken place,

facilities having long useful-life and containing wooden structures behave unusually when exposed to high temperatures. Temperatures abnormally high, rapid propagation of fire and high-rate thermal damage to structures affected are most typical for such conflagrations. Non-standard behavior of long useful-life wooden structures in case of conflagrations and their fire hazard have been dealt with in research papers by such scientists as Aseeva R. M., Naganovskiy Yu. K., Pokrovskaya E. N., Serkov B. B. and Sivenkov A. B. In such papers, their authors have provided evidence of high-rate combustion hazard wooden structures acquire due to their long-term natural ageing. However, effects produced by long-term use of wooden structures used in buildings and structures upon their fire resistance continue to be poorly understood, and approaches best fit for making their fire-safe are still in need of investigation. Lack of scientific research in this area and the actually neglectful attitude to fire safety regulations and references system, as applicable to such factor as wooden structures' terms of use, provide a paramount importance to findings made by the study.

The principal purpose of this study was investigation into the impact of their long-term use upon fire resistance of wooden structures (WS) and upon their carbonization specifics combined with loss of WS sustaining capability in case of a conflagration.

It was the first time that investigation was ever made into behavior displayed by long useful-life wooden structures when exposed to a conflagration. It has been shown that time is a major factor contributing into carbonization rapidity (in the course of the use, such carbonization rapidity grows 2-fold on the average) and heating extent across the thickness of wooden structure affected. It has also been shown that wooden structures used for 150 years have higher wood density rates and physico-chemical properties. However, high temperatures cause loss, by such structures, of their initial durability rates, even when temperature is 80 °C only.

It has been shown that carbonization sets on at lower temperatures in wooden structures that have been longer in use; investigation has been made into properties and structure of wooden structure coal layers and their oxidizing power. It has been found that specific properties and structure of coal layer produced in any wood long-advanced in its natural ageing make such wood more fire-resistant. However, this is combined with high-rate cokes oxidizing power and heat output; high-rate thermal damage to the wood structures is also evident.

Interrelation has also been shown between findings obtained by thermal analysis method (TG, DTG and DSC) and carbonization extent, which is the principal process accompanying loss of their sustaining capacity by wooden structures. Such interrelation allows making estimations for fire resistance in long useful-life wooden structures usable in buildings and structures.

Carbonization rates obtained for various temperature ranges, and also temperature and time, when carbonization usually sets on, may be used in calculation methods applicable to estimations of the highest wooden-structure fire resistance rates. Estimations for the highest fire resistance rates of long useful-life wooden structures may be obtained for the existing buildings and structures and for those under reconstruction. Findings of the studies are proposed for use in Russian and foreign regulatory documents and in future, within studies of behavior displayed by wooden structures in case of a conflagration.

Findings so obtained allow improvement of safety for humans in long useful-life buildings and structures, and also improvement of safety for fire-fighting teams and successfulness of their efforts in fire extinguishing at such facilities.

Keywords: wood; wooden structures; useful life; pyrolysis; mechanical resistance; fire resistance; carbonization.

REFERENCES

1. Kovalchuk L. M. *Proizvodstvo derevyannykh kleynykh konstruktsey*. 3-e izd. [Production of wooden glued structures. 3rd ed.]. Moscow, Stroymaterialy Publ., 2005. 336 p.
2. Varfolomeev Yu. A., Potutkin G. F., Shapovalova L. G. *Izmeneniye svoystv drevesiny pri dlitelnoy ekspluatatsii (na primere pamyatnikov derevyannogo zodchestva Arkhangel'skoy obl.)* [The change in wood properties during long-term operation (on the example of monuments of wooden architecture of the Arkhangelsk region)]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' — Woodworking Industry*, 1990, no. 10, pp. 28–30.

3. Varfolomeev A. Yu. *Nakopleniye povrezhdeniy v derevyannykh konstruktsiyakh pri dlitelnoy ekspluatatsii v usloviyakh biologicheskoy agressii*. Dis. kand. tekhn. nauk [Damage accumulation in wood structures during long-term operation in the conditions biological aggression. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 2010. 157 p.
4. Streltsov D. Yu. *Issledovaniye nesushchey sposobnosti dlitelno ekspluatiruyemykh derevyannykh konstruktсий*. Dis. kand. tekhn. nauk [Study of bearing capacity long maintained wooden structures. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 2003. 168 p.
5. Pokrovskaya E. N. Prognozirovaniye dolgovechnosti drevesiny metodom termicheskogo analiza [Forecasting the durability of wood by thermal analysis]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2001, vol. 10, no. 6, pp. 31–32.
6. Tychino N. A., Fedosenko I. G., Baranov A. V. Osobennosti stroyeniya i ognebiozashchity arkhеologicheskoy drevesiny [Features of the structure and onebusaway archaeological wood]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2007. vol. 16, no. 1, pp. 19–25.
7. Aseeva R., Serkov B., Sivenkov A. *Fire behavior and fire protection in timber buildings*. Dordrecht, Springer, 2014. 290 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5.
8. Aseeva R. M., Serkov B. B., Sivenkov A. B. *Goreniye drevesiny i yeye pozharоopasnyye svoystva* [Burning wood and its fire behavior]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2010. 262 p.
9. Kharitonov V. S. *Nesushchaya sposobnost izgibayemykh kleyenykh derevyannykh konstruktсий massivnogo secheniya pri teplovom vozdeystvii*. Dis. kand. tekhn. nauk [Bearing capacity of bent laminated wood structures of solid cross-section during thermal impact. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 1992. 190 p.
10. *Set of rules 64.13330.2011. Timber structures*. Moscow, Center of Design Production in Construction Publ., 2011 (in Russian).
11. *BS EN 1995-1-2:2004: Eurocode 5: Design of timber structure. Part 1-2: Structural fire design*. Brussels, CEN, 2004.
12. *Fire Safety in Timber Buildings. Technical Guideline for Europe, SP Report 2010:19*. Available at: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/Fire_Timber_Ch_5-7.pdf (Accessed 10 October 2015).
13. Gusev A. I., Paznikova S. N., Kozhevnikova N. S. Povysheniye ognestoykosti derevyannykh konstruktсий [Increase fire resistance of wooden structures]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2006. vol. 15, no. 3, pp. 30–35.
14. White R. H., Nordheim E. V. Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure. *Fire Technology*, 1992, vol. 28, no. 1, pp. 5–30. DOI: 10.1007/bf01858049.

For citation: Makishev Zh. K., Sivenkov A. B. Ognestoykost derevyannykh konstruktсий s dlitelnym srokom ekspluatatsii [Fire resistance of wooden structures a long life span]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 34–44. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.34-44.

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

А. Д. КОРОЛЬЧЕНКО, лаборант испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ikbs@mgsu.ru)

УДК 614.841.123.24

НАГРУЗКИ, РАЗРУШАЮЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ

Проанализированы данные по разрушению и степени повреждения различных конструктивных элементов зданий и сооружений, которые имели место как при аварийных взрывах внутри производственных помещений, так и при наружных взрывах, а также результаты испытаний конструкций на действие взрывных нагрузок. Показано, что одним из наиболее уязвимых мест в кирпичной кладке при строительстве зданий являются сечения по швам, сцепление в которых зачастую оказывается недостаточным для обеспечения сопротивления сдвигу, разрыву или главным растягивающим напряжениям. Обоснованы преимущества крупнопанельных промышленных зданий перед кирпичными с точки зрения их взрывоустойчивости. Даны рекомендации по проектированию сборных железобетонных каркасов зданий со взрывоопасными производствами. Представлены данные по несущей способности конструкций промышленных зданий, полученные на основании материалов по аварийным взрывам, анализа результатов исследований, изложенных в литературных источниках, а также данные по нагрузкам, вызывающим разрушения сооружений и конструкций различной степени и характера. Дана классификация строительных конструкций по степени их разрушения. Приведены данные по взрывным нагрузкам, при которых начинают разрушаться различные виды основных строительных конструкций и здания и которые могут быть использованы для построения системы взрывозащиты зданий со взрывоопасными производствами строительными методами. Определено поведение конструкций при аварийных взрывах, испытаниях и расчетах конструкций; установлены допустимые нагрузки на несущие и ограждающие конструкции в целях получения исходных данных для составления рекомендаций по проектированию зданий для взрывоопасных производств.

Ключевые слова: взрывоустойчивость зданий; строительные конструкции; разрушающие нагрузки; пределы несущей способности; аварийные взрывы; взрывные нагрузки; взрывоопасные производства.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.45-56

Для определения нагрузок, в пределах которых возможно снижение взрывного давления внутри помещений за счет применения предохранительных конструкций (ПК), и области их применения для защиты от действия взрыва газозвушной смеси (ГВС) внутри помещений возникла необходимость установить пределы несущей способности основных конструкций зданий и сооружений со взрывоопасными производствами. Для этого были изучены и проанализированы данные по разрушению и степени повреждения различных конструктивных элементов зданий и сооружений, имевшие место в результате аварийных взрывов как внутри производственных помещений, так и при наружных взрывах, а также использованы результаты испытаний конструкций на действие взрывных нагрузок и расчетные данные. При этом представилось возможным

рассмотреть следующие конструкции промышленных и гражданских зданий, по которым были получены сведения об их несущей способности при воздействии взрывных нагрузок:

- с несущими кирпичными стенами;
- бескаркасные крупнопанельные;
- с железобетонным и металлическим каркасами.

Ни по одному виду строительных конструкций нет столь многочисленных данных по их поведению при взрывах, как по каменным конструкциям. К сожалению, эти данные практически не обобщены, что ограничивает возможность решения многочисленных задач при проектировании каменных конструкций для зданий со взрывоопасными производствами.

Методы расчета несущей способности конструкции из кирпича отличаются большой степенью иде-

ализации их реальных свойств и условий работы под действием взрывных и других нагрузок. В какой-то степени несовершенство методов расчета компенсируется повышенными коэффициентами запаса прочности, принимаемыми при проектировании каменных конструкций, а также конструктивными ограничениями, которые предусматриваются нормами. Однако и при этих условиях о взрывоустойчивых каменных конструкциях можно говорить только в том случае, если обеспечивается надлежащее качество изготовления их по проектам, учитывающим их специфические особенности. Невыполнение этих условий ведет к разным повреждениям не только при сильных взрывных нагрузках, но и при относительно слабых.

Анализ имевших место аварий показывает, что одним из наиболее уязвимых мест в кирпичной кладке являются сечения по швам, сцепление в которых часто оказывается недостаточным для обеспечения сопротивления сдвигу, разрыву или главным растягивающим напряжениям. Таким образом, сцепление — одна из основных характеристик, определяющих взрывоустойчивость кладки. Так как одним из параметров, определяющих сцепление в кладке, является марка раствора, то классификацию кладок можно проводить с указанием минимальной марки раствора, при которой в этой кладке может быть достигнуто необходимое сцепление. В табл. 1 приведены значения нормального сцепления R_0^H для различных видов кладки из кирпича марки не менее 75, которые позволяют установить давления, разрушающие кирпичные стены, в зависимости от их размеров [1, 2].

Из рис. 1, на котором нанесены опытные и расчетные значения разрушающих нагрузок, видно, что кирпичная кладка разрушается при нагрузках от 2,5 до 30 кПа и более.

Крупнопанельное строительство занимает значительное место в общем объеме промышленного строительства. До настоящего времени мы не располагаем опытом поведения крупнопанельных зданий при взрывах горючих смесей внутри помещений. Однако, исходя из особенностей этой конструкции и основываясь на опыте проектирования, строительства и экспериментальных данных, можно прийти к выводу, что применение крупных панелей в строительстве зданий для взрывоопасных производств вполне оправданно.

Преимущества крупнопанельных промышленных зданий перед кирпичными с точки зрения их взрывоустойчивости могут быть обоснованы следующими соображениями.

Качество крупных панелей должно быть гарантировано заводскими условиями их изготовления, поэтому очевидно, что при надлежащем конструк-

Таблица 1. Нормативные значения нормального сцепления кладки в зависимости от марки раствора для разных видов кладки из кирпича

Вид кладки	R_0^H , кПа, в зависимости от марки раствора		
	50	25	10
Из обожженного кирпича	180	120–180	60–120
Из силикатного кирпича	120–180	60–120	—
Из бетонных камней марки 50 и выше:			
— сплошных	180	120–180	60–120
— пустотелых	120–180	60–120	—
Из бетонных камней марок 25–35:			
— сплошных	—	60–120	60–120
— пустотелых	—	60–120	—

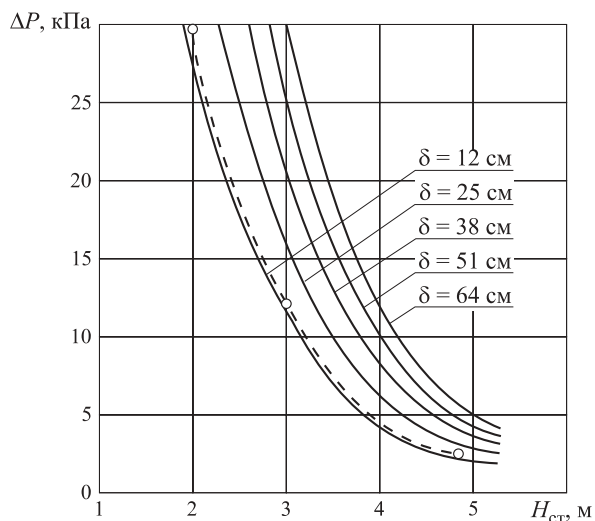


Рис. 1. Зависимость разрушающих нагрузок ΔP на кирпичные стены от их высоты $H_{ст}$ и толщины δ : — — — расчетные данные; — — — — опытные данные

тивном решении стыков крупнопанельные стены обладают значительно более высоким и устойчивым сопротивлением сдвигающим и растягивающим напряжениям, чем стены ручной кладки.

Обязательное наличие конструктивного или расчетного армирования дополнительно повышает несущую способность крупнопанельных стен, в то время как продольное армирование кладки весьма трудоемко, а выполнение его путем укладки только горизонтальной арматуры по растворным швам, без вертикальных стержней, малоэффективно. Применение панелей для несущих стен и необходимость соблюдения требований типизации сборных изделий обуславливают простые, четкие и благоприятные с точки зрения взрывоустойчивости архитектурно-

планировочные решения здания, отличающиеся симметричным расположением конструкций, равномерным и частым размещением несущих стен. Последнее обеспечивает большую надежность сборных покрытий как горизонтальных диафрагм жесткости пространственной коробки здания. Убедительным примером повышенной взрывоустойчивости крупнопанельных зданий по сравнению с кирпичными являются результаты осмотра конструкций после аварийных взрывов, когда здания с кирпичными стенами толщиной 51 см при нагрузке, не превышающей 20 кПа, имели значительные разрушения. В то же время в крупнопанельных зданиях при нагрузке до 30 кПа можно было наблюдать лишь в отдельных местах волосяные, типа усадочных, трещины вдоль монтажных швов.

Здания с несущим каркасом получили широкое распространение в строительстве. Опыт эксплуатации зданий со взрывоопасными производствами показывает, что каркасные здания довольно взрывоустойчивы, что обеспечивается надежной связью отдельных элементов, образующих единую пространственную конструкцию. При правильном расчете и конструировании каркасные конструкции следует отнести к наиболее взрывоустойчивым.

По способу восприятия нагрузок в практике одноэтажного и многоэтажного строительства нашли применение каркасы рамной конструкции, а также рамно-связевые и шарнирно-связевые. Каркасы рамной конструкции с жесткими узлами воспринимают как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки. Такие каркасы допускают свободную планировку помещений, что особенно ценно для большинства промышленных зданий. Каркасы рамной системы обладают четкой расчетной схемой, а это очень важно для правильного проектирования зданий на воздействие взрывных нагрузок внутри помещений. Для равномерного распределения усилий в элементах каркаса целесообразно для зданий со взрывоопасными производствами рекомендовать рамный каркас с жесткими узлами.

В рамно-связевом каркасе горизонтальные нагрузки воспринимаются как вертикальными диафрагмами, так и самим каркасом. Такое решение способствует выравниванию изгибающих моментов по высоте каркаса, позволяя в большей степени, чем при предыдущем решении, унифицировать номенклатуру сборных элементов. Вертикальные диафрагмы увеличивают жесткость здания, но их наличие иногда затрудняет свободную планировку помещений.

Совместная работа элементов каркаса межэтажных перекрытий и диафрагм наиболее просто достигается применением монолитного железобетона. При выполнении рамно-связевого каркаса из сбор-

ного железобетона требуется более тщательное замоналичивание межэтажных перекрытий в целях повышения его жесткости, чем в каркасах рамной системы без вертикальных диафрагм. В связи с этим для зданий со взрывоопасными производствами можно рекомендовать рамно-связевые каркасы из монолитного железобетона, что, в частности, уже находит применение в практике строительства. Вертикальные диафрагмы обеспечивают зданию требуемую жесткость каркаса и лучшие технико-экономические показатели несущих конструкций, чем при чисто каркасном решении.

В практике строительства зданий со взрывоопасными производствами получили распространение сборные железобетонные каркасы, выполняемые по шарнирно-связевой схеме с передачей всех горизонтальных нагрузок на жесткие вертикальные связи. В качестве последних используются конструкции лестничных клеток, лифтовых шахт, стены и железобетонные диафрагмы. В промышленных зданиях часто применяются стальные связи в продольном направлении. Вертикальные конструкции жесткости или связи рассчитываются на полное восприятие горизонтальных нагрузок, в том числе на воздействие взрывных нагрузок. Для шарнирно-связевой системы обычно предусматривается соединение элементов каркаса посредством сварки стальных закладных деталей, назначение которых состоит в обеспечении устойчивости каркаса на время монтажа. Недостатком конструкций, выполненных по шарнирно-связевой схеме, ограничивающей область их применения малоэтажными зданиями, с точки зрения взрывозащиты является то, что разрушение отдельных связей (где при взрыве могут возникать большие усилия) может привести к обрушению значительной части здания, так как каркас без связей представляет собой изменяемую шарнирную систему.

Для зарубежной практики строительства зданий со взрывоопасными производствами характерно решение каркасных зданий с применением монолитного железобетона с гибкой и жесткой арматурой или металла. Элементы таких конструкций выдерживают горизонтальные нагрузки до 50 кПа и более.

В нашей стране подавляющее большинство каркасных зданий выполняется из сборного железобетона. Сложность разработки взрывоустойчивого каркаса из сборного железобетона связана с ограниченным объемом данных по поведению их во время взрыва. Этим, а также рядом расчетных и производственных трудностей можно объяснить многообразие конструктивных решений сборных железобетонных каркасов, различающихся по разрезке на

монтажные элементы и в особенности по способам сопряжения сборных конструкций.

Учитывая, что разрезка каркасов на сборные элементы и конструирование узловых соединений являются одной из наиболее важных и сложных задач проектирования взрывоустойчивых зданий, на этом следует остановиться особо.

В практике проектирования и строительства сборных железобетонных каркасов для зданий со взрывоопасными производствами применяется несколько способов разрезки каркаса на сборные элементы. При этом каркас расчленяется либо на линейные элементы колонн и ригелей, либо на комбинированные элементы, включающие в себя и колонны, и ригели. Указанные способы разрезки могут осуществляться как в поперечном, так и в продольном направлении каркаса. При разрезке каркаса на линейные элементы значительно упрощается технология изготовления, транспортирование и монтаж сборных железобетонных элементов. Однако при этом стыкование ригелей с колоннами осуществляется в сечениях с максимальными изгибающими моментами, которые могут быть и знакопеременными, что может вызвать серьезные затруднения в конструировании стыков.

Большинство промышленных зданий как для взрывоопасных, так и для обычных производств проектируется и строится с каркасом с жесткими узлами из линейных элементов колонн и ригелей. В этих каркасах используются железобетонные изделия, выдерживающие горизонтальные нагрузки 30 кПа и более. Каркасы разработаны для сетки колонн 6×6 и 6×9 м с количеством этажей до 5 и высотой от 3,6 до 7,2 м и рассчитаны на нагрузки 10–25 кН/м². Усилия от вертикальных и горизонтальных взрывных нагрузок в поперечном направлении воспринимаются поперечными рамами каркаса с жесткими узлами. Наличие больших нагрузок на перекрытия промышленных зданий привело к необходимости устройства консолей на колоннах. Стыки колонн каркаса устраиваются на высоте 0,7–0,8 м от уровня перекрытия. В продольном направлении усилия от взрывных нагрузок воспринимаются продольными рамами каркаса, которые также имеют жесткие узлы и образуются из сборных железобетонных колонн и продольных монолитных ригелей.

С каркасом из линейных элементов, выполненным по рамной схеме, запроектировано и построено большое количество зданий для взрывоопасных производств, в том числе многоэтажных.

Разрезка каркаса по второму способу на комбинированные элементы вызвана желанием использовать положительные свойства каркасов из монолитного железобетона. При точной разрезке каркаса на элементы в заводских условиях последние могут

выполняться крестообразной формы с расположением стыков колонн в сечениях с нулевыми изгибающими моментами от взрывной нагрузки, а стыков ригелей — в четвертях или середине пролетов. При необходимости крестообразные элементы могут быть укрупнены в П-, Н- и Ж-образные железобетонные элементы. В таких железобетонных элементах жесткие узлы рам одного направления выполняются монолитными в заводских условиях, что благоприятно с точки зрения обеспечения взрывоустойчивости. Учитывая, что стыки колонн наиболее ответственны и трудоемки в выполнении, при проектировании сборных каркасов, собираемых из комбинированных железобетонных конструкций, следует стараться сокращать количество стыков колонн. Стремление к выносу стыков из зоны максимальных усилий в обоих направлениях каркаса привело к появлению пространственных крестообразных элементов.

При выборе способа разрезки каркаса на элементы в заводских условиях следует учитывать характер действующих в узле усилий (знакопостоянных или знакопеременных), конструкцию стыков, их прочность и деформативные особенности, изготовление, транспортировку и монтаж.

При проектировании сборных железобетонных каркасов зданий со взрывоопасными производствами следует стремиться к тому, чтобы стыки колонн были расположены в сечениях, работающих на центральное сжатие или внецентренное сжатие с малыми эксцентриситетами. Их следует относить от грани примыкания к узлу в целях удаления от зоны максимальных изгибающих моментов при разрезке каркаса на монтажные элементы. Необходимо также стремиться к уменьшению количества стыков колонн, проектируя сборные элементы высотой на несколько этажей. При проектировании стыков следует иметь в виду, что под воздействием взрывных нагрузок каркас здания может подвергаться повторным нагрузкам различной интенсивности и частоты и в его элементах могут возникать знакопеременные усилия.

Поскольку в настоящее время данные по поведению сборных каркасов при взрыве горючих смесей внутри здания очень ограничены, следует применять такие стыки, которые можно проверить экспериментально в лабораторных и приближенных к производственным условиям. Учитывая динамический характер взрывного воздействия, в каркасах, воспринимающих взрывную нагрузку, не следует применять шарнирные стыки колонн, а также стыки с приторцованными поверхностями без соединения продольной арматуры колонн.

Все существующие конструкции стыков колонн могут быть разделены на две группы — на стальных

Таблица 2. Характер разрушения конструкций и сооружений в зависимости от величины действующей нагрузки по опытным данным

Вид сооружения, конструкции	Степень разрушения	Давление взрыва, кН/м ²
<i>По данным П. Л. Савича [3]</i>		
Остекление	Частичное разрушение	3,3
Остекление	Полное разрушение	7,2
Кирпичные стены	Опрокидывание стен	4,6
Оконные рамы, кровля	Разрушение оконных рам, кровли	10,4
Одноэтажные кирпичные дома	Полное разрушение	30,4
<i>По данным М. А. Садовского [4]</i>		
Остекление	Полное разрушение	5–10
Легкие перегородки	То же	5
Перекрытие по деревянным балкам	«	1–16
Кирпичные стены, $\delta = 38$ см	Значительное разрушение	25
Кирпичные стены, $\delta = 51$ см	То же	45
<i>По данным Н. А. Стрельчука [5]</i>		
Кирпичные стены, $\delta = 64$ см	Значительное разрушение	55
Кирпичные стены, $\delta = 51$ см	То же	25
Кирпичные стены, $\delta = 38$ см	«	15
Кирпичные стены, $\delta = 25$ см	Опрокидывание стен	7
Железобетонные стены, $\delta = 25$ см	Разрушение	80
Железобетонные стены, $\delta = 12$ см	То же	60
Свободно опертые покрытия массой, кг/м ² :		
60	«	2,9
104	«	3,7
132	«	4,8
270	«	27,1
Покрытия по деревянным балкам	«	10–16
Деревянные ЛСК (вышибные)	Сбрасывание конструкций	2,6–4,7
Остекление	Полное разрушение	5–10
Легкие перегородки	Разрушение	5
<i>По данным Ю. А. Юрманова [6]</i>		
Кирпичные стены, $\delta = 25 \div 38$ см	Сильная деформация, образование трещин	49–56
Бетонные и шлакобетонные стены, $\delta = 24 \div 26$ см	Полное разрушение	49–56
Деревянные балки диаметром 14–16 см	Разрушение	10–13
Фундаменты, оборудование массой до 1 т (лебедки, вентиляторы)	Смещение фундаментов, поломка оборудования	40–60
Воздуховоды	Обрыв креплений, деформация	15–35
<i>По данным Ю. С. Яковлева [7]</i>		
Бетонные стены, $\delta = 25 \div 36$ см	Разрушение	35–45
Кирпичные стены, $\delta = 25 \div 38$ см	То же	45–56
Деревянные балки, $\delta = 14 \div 16$ см	«	10–18
<i>По данным В. И. Ганушкина [8]</i>		
Остекление	Полное разрушение	5
Перегородки, перекрытия по деревянным балкам	То же	10
Деревянные здания	Разрушение	14–20
Каменные здания	То же	35–45

Вид сооружения, конструкции	Степень разрушения	Давление взрыва, кН/м ²
<i>По данным С. М. Козарко [9]</i>		
Остекление	Частичное разрушение	1,5–2
Остекление	Полное разрушение	3,5–7
Перегородки, двери	Разрушение	12
Дома с деревянным каркасом	Сильное повреждение	17
Промышленные здания	То же	17
Шлакоблочные стены	Разрушение	22
Кирпичные здания	Среднее повреждение	28
Кирпичные здания	Сильное повреждение	38
Здания с железобетонным каркасом	Среднее повреждение	38
Промышленные здания со стальным и железобетонным каркасом	Сильное повреждение	58
Кирпичные стены, $\delta = 38$ см	Разрушение	53

Таблица 3. Нагрузки, разрушающие ограждающие и несущие конструкции зданий

Тип и характеристика конструкций		Несущая способность конструкций, кПа	Величина разрушающей нагрузки, кПа
Ограждающие	Кирпичные стены толщиной в 1,5 или 2 кирпича	40–50	40–50
	Стеновые однослойные панели из легкого бетона длиной 6 м, высотой 1,2–1,8 м, толщиной 20 и 24 см серии 1.432-5	5,5–7	5–7
	Железобетонные плиты размером 1,5×6,0 м для покрытия промышленных зданий серии 1.466-7	7–8	7–8
	Остекление толщиной 4 мм стальных оконных панелей и переплетов промышленных серий ПР-05-50/73 и ПР-05-32	Не более 3,5	Не более 3,5
	Участки ЛСК покрытия	–	Не более 1,2
	Ворота распашные промышленных зданий серий ПР-05-36.1, ПР-05.36.2, ПР-05-36.3 и ПР-05-36.4	4,3*	3,5–0,95
	Двери промышленных зданий по ГОСТ 6629–74	1,5*	1,1–1,8
Несущие	Сборные железобетонные колонны сплошного сечения 40×40 см для одноэтажных зданий с расчетной высотой 6,2 и 7,4 м серии КЭ-01-49	150–200	8–15 (при сплошной навеске стеновых панелей); 24–45 (при наличии остекления)
	Сборные железобетонные предварительно напряженные двускатные балки для покрытий зданий пролетами 12 и 18 м с шагом балок 6 м серии ПК-01-06	85–90	6–7 (при отсутствии участков ЛСК покрытия); 18–20 (при наличии участков ЛСК покрытия)
* Разрушающее усилие на узлы запорного устройства.			

закладных деталях и замоноличенные. В стыках первой группы усилия передаются через закладные детали путем их сварки при монтаже каркаса. Стальные закладные детали должны быть приварены к рабочей арматуре или надежно заделаны в бетоне стыкуемых элементов. Стыки второй группы выполняются сваркой арматурных выпусков и замоноличиванием бетоном или раствором.

Наиболее надежными являются стыки колонн с соединением оголовков путем приварки к ним накладок из арматурной или полосовой стали. Эти стыки способны сопротивляться действию значительных изгибающих моментов, поэтому они применяются для сопряжения колонн, работающих в условиях внецентренного сжатия даже с большими эксцентриситетами. Большинство типовых проектов,

Таблица 4. Классификация строительных конструкций по степени их разрушения

Степень разрушения строительных конструкций	Характеристика	Характер повреждений			Давление, кПа
		строительных конструкций зданий		оборудования	
		одноэтажных	многоэтажных		
Слабая	Взрывы внутри помещения без разрушения основных строительных конструкций и оборудования. Возможно продолжение эксплуатации здания после выполнения незначительных ремонтных работ	Разрушение остекления; отрыв дверей, ворот; образование трещин на внутренних перегородках; вскрытие ЛСК		Незначительное повреждение вентиляционных коробов; сдвиг незакрепленного оборудования	До 3,5
Средняя	Частичное разрушение второстепенных строительных конструкций и оборудования. Возможна эксплуатация здания после восстановительных работ	Вскрытие ЛСК, полное разрушение остекления; опрокидывание кирпичных стен, легких перегородок; разрушение покрытия с массой 1 м ² до 75 кг		Разрушение воздуховодов, вентиляционных коробов	От 3,5 до 6
Повышенная	Частичное разрушение основных несущих строительных конструкций и значительное разрушение оборудования. Возможна эксплуатация после восстановительных работ	Разрушение части каркаса; разрушение деревянных зданий; образование трещин в блочных стенах; полное разрушение перекрытий	Разрушение перегородок, покрытий по деревянным балкам, перекрытий	Частичное разрушение технологического оборудования	От 6 до 12
Сильная	Сильное разрушение основных несущих конструкций, остаточные деформации в стальных конструкциях. Возможна эксплуатация после значительных восстановительных работ	Значительное разрушение несущих конструкций; образование трещин в кирпичных стенах	Разрушение кирпичных самонесущих стен; деформация стального легкого каркаса	Сильное разрушение оборудования	От 12 до 20
Чрезвычайно сильная	Разрушение зданий кирпичных, каркасных. Эксплуатация возможна только зданий из монолитного железобетона, с тяжелым металлическим каркасом, сборных железобетонных с повышенной несущей способностью	Разрушение каменных зданий, кирпичных стен, стального каркаса, железобетонного каркаса без повышенной несущей способности	Разрушение сборных железобетонных конструкций без повышенной несущей способности	Чрезвычайно сильное разрушение оборудования	От 20 до 30

разработанных как для обычных промышленных зданий, так и для зданий со взрывоопасными производствами, имеют стыки колонн данного типа.

Правильно рассчитанные и сконструированные замоноличенные стыки колонн могут приближаться по своей работе и взрывоустойчивости к целым сечениям. В этих стыках имеются благоприятные условия для развития пластических деформаций, способствующих поглощению взрывной энергии и создающих дополнительный резерв несущей способности стыка. В большинстве случаев такие стыки выполняются путем сварки выпусков арматурных стержней из торцов стыкуемых элементов сборных железобетонных колонн с последующим замоноличиванием зоны стыка раствором или бетоном.

Результаты исследований и опыт строительства дают основание рекомендовать замоноличенные стыки колонн со сваркой выпусков арматурных стержней для применения в сборных железобетонных каркасах зданий, предназначенных для взрывоопасных производств.

Анализ последствий аварий показывает, что большинство повреждений является результатом разрушения узловых соединений. Ответственность узловых сопряжений возрастает в зданиях с навесными панелями, в которых заполнение в значительной степени выключается из работы и все функции по обеспечению прочности, жесткости и пространственной неизменяемости здания возлагаются только на каркас.

Таблица 5. Нагрузки, разрушающие элементы крепления ограждающих легкосбрасываемых конструкций

№ п/п	Тип ограждающей конструкции	Геометрические размеры, м			Поверхностная плотность, кг/м ²	Элемент крепления и его напряженное состояние	Расчетное сопротивление материала крепления при особом сочетании нагрузок, кН/см ²	Нагрузка, разрушающая узел крепления ЛСК, кПа
		высота	ширина	толщина				
1	Керамзитобетонная панель сплошного сечения с плотностью 900 кг/м ³	1,2	6	0,16 0,20 0,24 0,30	195 222 264 320	Арматурный стержень Ø14, растяжение	60	50,3
2	Панели из автоклавного ячеистого бетона с плотностью 700 кг/м ³	1,2	6	0,16 0,20 0,24 0,30	125 167 195 250	Арматурный стержень Ø14	60	50,3
3	Панели из автоклавного ячеистого бетона с плотностью 550 кг/м ³	1,2	6	0,16 0,20	110 140	То же	60	50,3
4	Стеновая панель из профилированного настила с заполнением стекло- или минераловатным материалом	2,4; 3; 3,6; 4,2; 4,8–12	6	0,31	47; 59	Арматурный стержень Ø12, растяжение	60	11
5	Стеновая панель с профилированным листом и несгораемым утеплителем из жестких минераловатных плит (разработка ГПИ “Теплопроект”)	2,4; 3; 3,6; 4,2–12	3	0,18	35	Стержень с резьбой М 6, растяжение	60	7,9
6	Стеновая асбестоцементная экструзионная панель (чертежи серии 1.830.8-2, вып. 1 и 2)	6	6	0,12 0,14 0,16 0,18	71 91 97 108	Стержень с резьбой М 8, растяжение	60	9,3
7	Стеновая панель ПСМ (чертежи ТЭП 190933.0000041.02955.000.КМ03)	3	6	0,12	45	Стержень с резьбой М 16, растяжение	60	7,9
8	Стеновая асбестоцементная панель СКВр для завода СКГ (проект Гипрокаучука):							
	а) проектное решение	3	6	0,16	82	Болт М 14, растяжение	73	67,2
	б) фактическое выполнение	3	6	0,16	82	Арматурный стержень Ø16, срез	35	35,7
9	Волнистые асбестоцементные листы	2,5	1,097	—	—	—	—	3,2
10	Волнистые алюминиевые листы	5,4	0,65	—	—	Болт М 8, растяжение	60	2,6
11	Алюминиевые листы трапецидального профиля	5,4	0,65	—	—	То же	60	3,3

Узлы каркаса — место пересечения колонн и ригелей — могут выполняться монолитными, сборно-монолитными и сварными.

При линейной разрезке каркаса стыкование сборных элементов осуществляется в узлах различными способами. В промышленных зданиях с тяжелыми нагрузками для сопряжения ригелей поперечной рамы с колоннами применяется соединение с помо-

щью ванной сварки выпусков верхней арматуры из ригеля и колонны, дуговой сварки стальных закладных деталей ригеля и консоли колонны с последующим замоноличиванием зазора между стыкуемыми элементами каркаса.

Конструкции зданий с монолитным железобетонным каркасом с успехом противостояли воздействию взрывных нагрузок. Характер повреждений

ограничивался небольшими трещинами в перегородках, а заметные повреждения отмечались только в тех сооружениях, при возведении которых были допущены ошибки в производстве работ, в частности некачественное выполнение рабочих швов в железобетонных элементах монолитного каркаса.

Таким образом, данные по несущей способности конструкций промышленных зданий, полученные на основании материалов аварийных взрывов, анализа результатов исследований, изложенных в литературных источниках [3–11], а также данные по нагрузкам, вызывающим различную степень и характер разрушений сооружений и конструкций [12–15], приведены в табл. 2 и 3.

Итак, в зависимости от характера повреждения строительные конструкции по степени разрушения можно разделить на пять степеней: слабую, среднюю, повышенную, сильную и чрезвычайно сильную (табл. 4).

Слабые разрушения характеризуются тем, что основные строительные конструкции сохраняют свою целостность, но имеет место разрушение остекления, отрыв дверей и ворот, образование трещин на внутренних перегородках, незначительное повреждение технологического оборудования, вентиляционных коробов, сдвиг незакрепленного оборудования. Такой характер повреждений наблюдается при нагрузках до 3,5 кПа. При этом возможно продолжение эксплуатации здания после незначительного ремонта. Если применение легкосбрасываемых конструкций (ЛСК) обеспечивает снижение нагрузок, действующих на ограждающие конструкции при взрывном горении ГВС, до 3,5 кПа, то при этом обычно не возникает необходимости в проверке несущей способности основных конструкций.

Разрушения средней и повышенной степени характеризуются частичным разрушением основных несущих строительных конструкций, плит покрытия, дверей, перекрытий, кровли и оборудования [16, 17], образованием трещин в шлакоблочных стенах, раз-

рушением деревянных зданий. Эти повреждения вызываются нагрузкой до 12 кПа. При возникновении таких нагрузок возможно продолжение эксплуатации здания после проведения восстановительных работ. В ряде случаев может оказаться целесообразным (как видно из анализа разрушающих нагрузок) заблаговременное усиление отдельных конструкций здания.

Сильные разрушения характеризуются разрушением каменных конструкций зданий, возникновением остаточных деформаций в стальных конструкциях. Эксплуатация здания возможна после восстановительного ремонта. При нагрузках до 20 кПа и использовании ЛСК потребуется некоторое усиление отдельных конструкций [18–21].

Чрезвычайно сильные разрушения характеризуются разрушением железобетонных каркасов, выполненных без учета их повышенной несущей способности. Вместе с тем нагрузки до 30 кПа без заметных повреждений выдерживают здания из монолитного железобетона, железобетонные и стальные каркасные здания, рассчитанные на повышенную несущую способность (см. табл. 3).

Данные по нагрузкам, при которых начинают разрушаться ограждающие конструкции, узлы их крепления и запорные устройства, а также легкосбрасываемые конструкции, приведены в табл. 5.

Данные табл. 5, а также данные по взрывным нагрузкам, при которых начинают разрушаться различные виды основных строительных конструкций и здания в целом, могут быть использованы для построения системы взрывозащиты зданий со взрывоопасными производствами строительными методами.

На основании изучения поведения конструкций при аварийных взрывах, испытаний и расчета конструкций установлены значения допустимых нагрузок на основные несущие и ограждающие конструкции в целях получения исходных данных для составления рекомендаций по проектированию зданий для взрывоопасных производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Н. Н., Расторгуев Б. С. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений. — М. : Стройиздат, 1980. — 190 с.
2. Попов Н. Н., Расторгуев Б. С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. — М. : Стройиздат, 1964. — 152 с.
3. Савич П. Л. Динамика взрывных волн. — Ч. 1–2. — М. : Военно-инженерная академия Красной армии им. В. В. Куйбышева, 1941. — 208 с.
4. Садовский М. А. Опытные исследования механического действия ударной волны взрыва. — М.–Л. : Изд-во АН СССР, 1945. — 44 с.
5. Стрельчук Н. А., Мишуев А. В., Никитин А. Г., Орахелашвили Н. В. Газодинамика горения газозо-воздушной смеси в полужамкнутом объеме при сбросе давления в незагазованный смежный объем // Физика горения и взрыва. — 1984. — № 1. — С. 65–69.
6. Юрманов Ю. А. Защита сооружений от действия воздушной УВ // Записки Ленинградского горного института. — 1966. — Т. 52, вып. 1. — С. 34–38.

7. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. — Л. : Судпромгиз, 1961. — 314 с.
8. Ганушкин В. И., Морозов В. И., Никонов Б. И., Орлов Г. И. Приспособление подвалов существующих зданий под убежища. — М. : Стройиздат, 1971. — 208 с.
9. Когарко С. М., Адушкин В. В., Лямин А. Г. Исследование сферической детонации газовых смесей // Научно-технические проблемы горения и взрыва. — 1965. — № 2. — С. 22–34.
10. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 475–476. — P. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475–476.1344.
11. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Тушение пламени огнетушащими порошками и аэрозольными составами // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 8. — С. 63–68.
12. Горев В. А., Пилюгин Л. П. и др. Расчет и проектирование предохранительных конструкций. Объекты гражданской обороны. Защитные сооружения : сб. научн. тр. — М. : ЦНИИПромзданий, 1991. — № 5.
13. Орлов Г. Г., Корольченко Д. А. Анализ причин взрывов горючих смесей внутри производственных зданий // Научное обозрение. — 2015. — № 12. — С. 119–123.
14. Корольченко Д. А., Громовай В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Вестник МГСУ. — 2011. — № 1-2. — С. 331–335.
15. Шароварников А. Ф., Корольченко Д. А. Влияние дисперсности капель воды на эффективность тушения пожаров горючей жидкости // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 12. — С. 69–74.
16. Орлов Г. Г., Корольченко Д. А., Корольченко А. Я. Экономическая оценка эффективности применения предохранительных конструкций для обеспечения взрывоустойчивости зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 6. — С. 51–57.
17. Орлов Г. Г., Корольченко Д. А. Оценка степени интенсификации взрывного горения газозвдушной смеси // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 5. — С. 62–67.
18. Bradley D., Mitcheson A. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels // Combustion and Flame. — 1976. — Vol. 26. — P. 201–217. DOI: 10.1016/0010-2180(76)90072-9.
19. Crescitelli S., Russo G., Tufano V. Analysis and design of venting systems: A simplified approach // Journal of Occupational Accidents. — 1979. — Vol. 2, No. 2. — P. 125–133. DOI: 10.1016/0376-6349(79)90004-x.
20. Орлов Г. Г., Корольченко Д. А., Корольченко А. Я. Определение величины и характера взрывных нагрузок при применении инерционных предохранительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 4. — С. 47–55.
21. Орлов Г. Г., Корольченко Д. А., Ляпин А. В. Оптимизация требований к конструктивным и объемно-планировочным решениям при проектировании зданий и сооружений для взрывоопасных производств // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 11. — С. 67–74.

Материал поступил в редакцию 10 января 2015 г.

Для цитирования: Орлов Г. Г., Корольченко А. Д. Нагрузки, разрушающие строительные конструкции в результате аварийных взрывов // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 45–56. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.45-56.

English

LOADINGS WHICH DESTROY BUILDING STRUCTURES IN CONSEQUENCE OF EMERGENCY EXPLOSIONS

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

KOROLCHENKO A. D., Laboratory Assistant of Test Laboratory, Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ikbs@mgsu.ru)

ABSTRACT

To determine the bearing capacity limits of main structures of buildings and constructions with explosive productions it was analyzed data on destruction and damage rate of various constructive elements of buildings and constructions which took place as due to emergency explosions inside production premises so due to external explosion; it were also used results of tests of structures under the action of explosive loads. The analysis of past accidents shows that one of the most vulnerable spots of brickwork created during construction of buildings are sections at seams which cohesion is often insufficient to provide shearing resistance, breaking strength or resistance to the main tensile stresses. Advantages of large-panel industrial buildings before brick buildings, in regards to their explosion stability, are proved. Recommendations on designing of collapsible reinforced concrete structural frames of buildings with explosive productions are given. Data on bearing capacity of structures of industrial buildings obtained on the basis of materials on emergency explosions, analysis of results of researches stated in literary sources and also data on loadings causing destruction of constructions and structures of various degree and character are presented. Classification of building structures according to their damage rate is given. Data on explosive loads which cause destruction of different types of the main building structures that can be used for creation of the explosion protection system of buildings (using construction methods) with explosive productions are given. Behavior of structures in case of emergency explosions, tests and calculations of structures is defined; permissible loads on the bearing and filler structures with the purpose to obtain the initial data for recommendations on design of buildings for explosive productions is determined.

Key words: explosion stability of buildings; building structures; destroying loads; limits of bearing capacity; emergency explosions; explosive loads; explosive productions.

REFERENCES

1. Popov N. N., Rastorguev B. S. *Voprosy rascheta i konstruirovaniya spetsialnykh sooruzheniy* [Matters of calculation and designing of specific constructions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 190 p.
2. Popov N. N., Rastorguev B. S. *Raschet zhelezobetonnykh konstruktsey na deystviye kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzok* [Calculation of reinforced concrete structures under action of a short-term dynamic loadings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964. 152 p.
3. Savich P. L. *Dinamika vzryvnykh voln* [Dynamics of blast waves]. Moscow, Military and Engineering Academy of Red Army named after V. V. Kuibyshev Publ., 1941. Part 1-2, 208 p.
4. Sadovskiy M. A. *Opytnyye issledovaniya mekhanicheskogo deystviya udarnoy volny vzryva* [Empirical researches of mechanical action of air shock wave from explosion]. Moscow–Leningrad, Academy of Sciences of USSR Publ., 1945. 44 p.
5. Strelchuk N. A., Mishuev A. V., Nikitin A. G., Orakhelashvili N. V. *Gazodinamika gorennya gazovozdushnoy smesi v poluzamknutom obyeme pri sbroze davleniya v nezagazovannyi smezhnyy obyem* [Gas dynamics of the burning process of a gas-air mixture in a half-closed volume in conditions when pressure is released into adjacent not gas-laden volume]. *Fizika gorennya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1984, no. 1, pp. 65–69.
6. Yurmanov Yu. A. *Zashchita sooruzheniy ot deystviya vozdushnoy UV* [Protection of constructions against action of air shock wave]. *Zapiski Leningradskogo gornogo instituta — Proceedings of Leningrad Mining Institute*, 1966, vol. 52, issue 1, pp. 34–38.
7. Yakovlev Yu. S. *Gidrodinamika vzryva* [The hydrodynamics of an explosion]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1961. 314 p.
8. Ganushkin V. I., Morozov V. I., Nikonov B. I., Orlov G. I. *Prisposobleniye podvalov sushchestvuyushchikh zdaniy pod ubezhishcha* [Adaptation of cellars of the existing buildings under shelters]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971. 208 p.
9. Kogarko S. M., Adushkin V. V., Lyamin A. G. *Issledovaniye sfericheskoy detonatsii gazovykh smesey* [Investigation of the spherical detonation of gas mixtures]. *Nauchno-tekhnicheskiye problemy gorennya i vzryva — Scientific and Technical Problems of Burning and Explosion*, 1965, no. 2, pp. 22–34.
10. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. *Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings. Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 475–476, pp. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.

11. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Tusheniye plameni ognetushashchimi poroshkami i aerolnymi sostavami [Extinguishing of a flame by dry chemical powders and aerosol compositions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 8, pp. 63–68.
12. Gorev V. A., Pilyugin L. P. et al. *Raschet i proyektirovaniye predokhranitelnykh konstruktсий. Obyekty grazhdanskoй oborony. Zashchitnyye sooruzheniya: sb. nauchn. tr.* [Calculation and design of safety structures. Objects of civil defense. Protective constructions. Collection of scientific papers]. Moscow, TsNIIPromzdaniy Publ., 1991, no. 5.
13. Orlov G. G., Korolchenko D. A. Analiz prichin vzryvov goryuchikh smesey vnutri proizvodstvennykh zdaniy [Analysis of the causes of inflammable mixture explosions in production buildings]. *Nauchnoye obozreniye — Science Review*, 2015, no. 12, pp. 119–123.
14. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, no. 1-2, pp. 331–335.
15. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Vliyaniye dispersnosti kapel vody na effektivnost tusheniya pozharov goryuchey zhidkosti [Impact of dispersion of water drops on the efficiency of fire extinguishing of combustible liquid]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 69–74.
16. Orlov G. G., Korolchenko D. A., Korolchenko A. Ya. Ekonomicheskaya otsenka effektivnosti primeniya predokhranitelnykh konstruktсий dlya obespecheniya vzryvoustoychivosti zdaniy i sooruzheniy [Economic efficiency of application of explosion-relief valves in order to ensure explosion stability of buildings and constructions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 6, pp. 51–57.
17. Orlov G. G., Korolchenko D. A. Otsenka stepeni intensivifikatsii vzryvnogo goreniya gazovozdushnoy smesi [Assessment of intensification degree of explosive combustion of a gas-air mixture]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 5, pp. 62–67.
18. Bradley D., Mitcheson A. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels. *Combustion and Flame*, 1976, vol. 26, pp. 201–217. DOI: 10.1016/0010-2180(76)90072-9.
19. Crescitelli S., Russo G., Tufano V. Analysis and design of venting systems: A simplified approach. *Journal of Occupational Accidents*, 1979, vol. 2, no. 2, pp. 125–133. DOI: 10.1016/0376-6349(79)90004-x.
20. Orlov G. G., Korolchenko D. A., Korolchenko A. Ya. Opredeleniye velichiny i kharaktera vzryvnykh nagruzok pri primeneniі inertsiionnykh predokhranitelnykh konstruktсий [Determination of the value and character of the explosive loads in case of using of the inertial safety constructions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 4, pp. 47–55.
21. Orlov G. G., Korolchenko D. A., Lyapin A. V. Optimizatsiya trebovaniy k konstruktivnym i obyemno-planirovochnym resheniyam pri proyektirovaniі zdaniy i sooruzheniy dlya vzryvoopasnykh proizvodstv [Optimization of requirements to constructive and space-planning decisions when designing buildings and constructions for explosive productions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 11, pp. 67–74.

For citation: Orlov G. G., Korolchenko A. D. Nagruzki, razrushayushchiye stroitelnyye konstruktсії v rezultate avariynykh vzryvov [Loadings which destroy building structures in consequence of emergency explosions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 45–56. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.45-56.

И. А. КАЙБИЧЕВ, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор, Уральский институт ГПС МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; e-mail: Kaibitchev@mail.ru)

Е. И. КАЙБИЧЕВА, главный специалист, Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Свердловской области "Свердловстат" (Россия, 620041, г. Екатеринбург, ул. Толмачева, 23)

УДК 332.01+336.52+519.25

ИНДЕКС ПОЖАРОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ЗА 2006–2010 ГОДЫ

Выполнен расчет индекса пожаров в Российской Федерации за 2006–2010 годы. Проведено категорирование регионов, которое поможет сравнить ситуации с пожарами. Выявлены "опасная" и "кризисная" группы регионов. Определены частоты попадания регионов в "опасную" и "кризисную" группы. Показано, что полученные результаты могут быть полезны для обоснования управленческих и кадровых решений.

Ключевые слова: национальная безопасность; число пожаров; статистика пожаров; индекс Доу-Джонса; индекс пожаров.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.57-65

Один из важных показателей национальной безопасности – число пожаров [1, 2]. Этот показатель позволяет сравнивать обстановку в регионах, а общее число пожаров на территории Российской Федерации служит основой для количественной оценки ситуации с пожарами в целом.

Показатель числа пожаров используется во многих исследованиях. Например, в работе Куликовой он применен для обоснования актуальности создания в России системы обязательного страхования строений от пожаров на основе метода взаимного страхования [3]. Обращение к методу взаимного страхования является для современной России новым подходом, однако до 1917 г. этот метод использовался достаточно широко. К началу XX века в Российской империи действовала система обязательного взаимного страхования недвижимого и движимого имущества [4–13]. В Российской Федерации взаимные страховые организации [14], осуществляющие обязательное страхование строений от пожара, могут стать важным элементом инфраструктуры рыночной экономики, способствующим решению ряда экономических и социальных задач.

Сравнительный анализ пожарной опасности регионов в интересах повышения эффективности деятельности органов ГПН на примере Мурманской области выполнен в работе [15]. Для оценки степени пожарной опасности при этом использованы показатели: числа пожаров, числа погибших, числа травмированных, материального ущерба [16].

Особенности территорий России по природной, техногенной и экологической опасности приведены

в работах Акимова [17–19]. Методика оценки и ранжирования объектов и территорий на железнодорожном транспорте по показателям чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами, на примере Восточно-Сибирской железной дороги разработана Тарасенко [20]. В качестве основных из 68 показателей пожарной опасности объектов Восточно-Сибирской дороги были отобраны восемь: количество зданий с чердаками, количество зданий с подвалами, сумма поэтажных площадей (отнесенных по пожаровзрывоопасности к категории В), сумма поэтажных площадей (отнесенных к категориям Г и Д), срок эксплуатации основного оборудования, максимальная численность людей в расчете на одно здание, количество зданий 1-й и 2-й степени огнестойкости, количество зданий 3-й степени огнестойкости.

Исследования в области оптимизации управления пожарной безопасностью региона [21–23], совершенствования методов обоснования ресурсной потребности территориальных подразделений ГПС [24] делают актуальным решение проблемы категорирования регионов России по числу пожаров. В экономике и на фондовом рынке существовавшая ранее проблема категорирования промышленных корпораций была решена с помощью введения фондовых индексов [25–27], наиболее известным из которых является индекс Доу-Джонса.

Для решения этой проблемы было предложено по аналогии с индексом Доу-Джонса ввести индекс пожаров [28–30]. Первоначально этот индекс был рассчитан по данным 2010 г. [28–30]. Расширим эти расчеты на период 2006–2010 гг.

Таблица 1. Листинг расчета индекса пожаров за 2006 г.

№ п/п	Регион	Число пожаров
1	Москва	10887
2	Московская область	10767
3	Приморский край	8215
4	Санкт-Петербург	7314
5	Свердловская область	6716
6	Красноярский край	5354
7	Челябинская область	5222
8	Ростовская область	5121
9	Кемеровская область	5070
10	Хабаровский край	4993
11	Нижегородская область	4801
12	Иркутская область	4790
13	Самарская область	4714
14	Алтайский край	4661
15	Ленинградская область	4600
16	Краснодарский край	4560
17	Республика Башкортостан	4532
18	Новосибирская область	4326
19	Пермский край	4264
20	Омская область	4027
21	Республика Татарстан	4003
22	Волгоградская область	3635
23	Воронежская область	3224
24	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	3196
25	Оренбургская область	2763
26	Саратовская область	2649
27	Архангельская область	2492
28	Кировская область	2484
29	Владимирская область	2474
30	Брянская область	2382
Индекс пожаров		4808

В листингах (табл. 1–5) можно выделить критическую группу регионов, для которых число пожаров превышает значение индекса. Состав этой группы постоянно меняется.

В кризисную группу 2006 г. попали регионы (см. табл. 1): г. Москва, Московская область; Приморский край; г. Санкт-Петербург; Свердловская область; Красноярский край; Челябинская, Ростовская, Кемеровская области; Хабаровский край.

В 2007 г. в списке критических регионов оказались (см. табл. 2): г. Москва, Московская область; Приморский край; г. Санкт-Петербург; Свердловская, Челябинская области; Красноярский край; Рес-

Таблица 2. Листинг расчета индекса пожаров за 2007 г.

№ п/п	Регион	Число пожаров
1	Москва	10558
2	Московская область	10179
3	Приморский край	8082
4	Санкт-Петербург	7055
5	Свердловская область	6646
6	Челябинская область	5139
7	Красноярский край	5057
8	Республика Башкортостан	5045
9	Хабаровский край	4989
10	Кемеровская область	4732
11	Самарская область	4699
12	Ростовская область	4675
13	Нижегородская область	4651
14	Иркутская область	4636
15	Алтайский край	4510
16	Ленинградская область	4441
17	Краснодарский край	4391
18	Новосибирская область	4217
19	Пермский край	4013
20	Республика Татарстан	3947
21	Омская область	3820
22	Волгоградская область	3693
23	Воронежская область	3094
24	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	3036
25	Оренбургская область	2755
26	Саратовская область	2622
27	Кировская область	2425
28	Архангельская область	2346
29	Ставропольский край	2342
30	Владимирская область	2319
Индекс пожаров		4670

публика Башкортостан; Хабаровский край; Кемеровская, Самарская, Ростовская области.

В состав критической группы в 2008 г. вошли (см. табл. 3): г. Москва, Московская область; Приморский край; г. Санкт-Петербург; Свердловская, Челябинская области; Республика Башкортостан; Хабаровский край; Кемеровская, Ростовская, Самарская области; Красноярский край; Нижегородская область.

В критическую группу 2009 г. попали регионы (см. табл. 4): Московская область, г. Москва; Приморский край; Свердловская, Челябинская области; Республика Башкортостан; г. Санкт-Петербург;

Таблица 3. Листинг расчета индекса пожаров за 2008 г.

№ п/п	Регион	Число пожаров
1	Москва	9718
2	Московская область	9710
3	Приморский край	7776
4	Санкт-Петербург	6317
5	Свердловская область	5957
6	Челябинская область	4997
7	Республика Башкортостан	4994
8	Хабаровский край	4981
9	Кемеровская область	4572
10	Ростовская область	4540
11	Самарская область	4538
12	Красноярский край	4523
13	Нижегородская область	4495
14	Ленинградская область	4358
15	Краснодарский край	4338
16	Алтайский край	4314
17	Новосибирская область	4121
18	Иркутская область	4078
19	Республика Татарстан	3865
20	Волгоградская область	3655
21	Пермский край	3423
22	Омская область	3384
23	Воронежская область	3045
24	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	2920
25	Саратовская область	2612
26	Оренбургская область	2521
27	Кировская область	2328
28	Ставропольский край	2278
29	Амурская область	2207
30	Архангельская область	2202
Индекс пожаров		4426

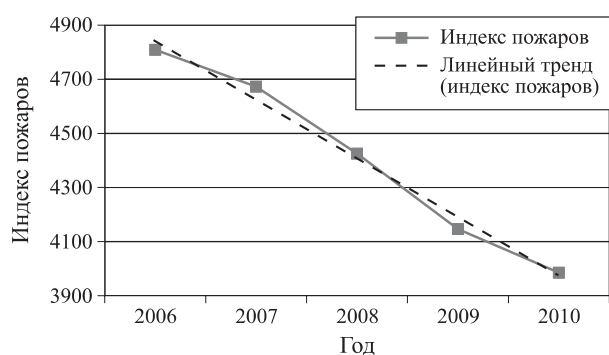
Таблица 4. Листинг расчета индекса пожаров за 2009 г.

№ п/п	Регион	Число пожаров
1	Московская область	10302
2	Москва	8772
3	Приморский край	6677
4	Свердловская область	5130
5	Челябинская область	4898
6	Республика Башкортостан	4827
7	Санкт-Петербург	4793
8	Красноярский край	4487
9	Хабаровский край	4474
10	Кемеровская область	4357
11	Самарская область	4345
12	Нижегородская область	4282
13	Краснодарский край	4252
14	Ростовская область	4145
15	Ленинградская область	4112
16	Иркутская область	4068
17	Алтайский край	4045
18	Новосибирская область	3958
19	Республика Татарстан	3739
20	Волгоградская область	3283
21	Омская область	3028
22	Пермский край	3004
23	Воронежская область	2981
24	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	2805
25	Саратовская область	2584
26	Оренбургская область	2428
27	Архангельская область	2197
28	Кировская область	2146
29	Брянская область	2075
30	Ярославская область	2064
Индекс пожаров		4142

Красноярский, Хабаровский края; Кемеровская, Самарская, Нижегородская области; Краснодарский край; Ростовская область.

В 2010 г. критическая ситуация сложилась в следующих регионах (см. табл. 5): Московская область, г. Москва; Приморский край; Свердловская, Челябинская области; Республика Башкортостан; Красноярский, Краснодарский края; г. Санкт-Петербург; Нижегородская область; Хабаровский край; Самарская, Кемеровская области.

Индекс пожаров для 2006–2010 гг. продемонстрировал тенденцию к понижению (см. рисунок).



Динамика изменения индекса пожаров на территории РФ за 2006–2010 гг.

Таблица 5. Листинг расчета индекса пожаров за 2010 г.

№ п/п	Регион	Число пожаров
1	Московская область	9933
2	Москва	8249
3	Приморский край	6171
4	Свердловская область	4867
5	Челябинская область	4851
6	Республика Башкортостан	4781
7	Красноярский край	4703
8	Краснодарский край	4223
9	Санкт-Петербург	4218
10	Нижегородская область	4136
11	Хабаровский край	4131
12	Самарская область	4113
13	Кемеровская область	4087
14	Алтайский край	3979
15	Ростовская область	3947
16	Ленинградская область	3940
17	Иркутская область	3898
18	Новосибирская область	3891
19	Республика Татарстан	3627
20	Волгоградская область	3238
21	Воронежская область	2952
22	Омская область	2943
23	Пермский край	2733
24	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	2638
25	Саратовская область	2579
26	Оренбургская область	2350
27	Кировская область	2149
28	Архангельская область	2134
29	Брянская область	2035
30	Тюменская область	2020
Индекс пожаров		3984

Наблюдаемые данные аппроксимируются линейным трендом:

$$y = -217,6x + 5058, \quad (1)$$

где y — число пожаров;

x — порядковый номер года (1 — 2006, 2 — 2007, 3 — 2008, 4 — 2009, 5 — 2010 г.).

Анализ мест регионов в листингах расчета индекса пожаров показывает (табл. 6) наличие шести групп регионов, играющих различную роль.

Первая группа включает регионы, попавшие за 2006–2010 г. в листинг 5 раз (табл. 7), вторая — 4 раза, третья — 3 раза, четвертая — 2 раза, пятая — 1 раз, шестая — 0 раз (т. е. регионы этой группы не присутствовали в составе листинга в течение 5 лет).

Таблица 6. Места регионов в листингах расчета индекса пожаров за 2006–2010 г.

№ п/п	Регион	Место региона в листинге в году				
		2006	2007	2008	2009	2010
Центральный федеральный округ (ЦФО)						
1	Брянская область	30			29	29
2	Владимирская область	29	30			
3	Воронежская область	23	23	23	23	21
4	Московская область	2	2	2	1	1
5	Ярославская область				30	
6	Москва	1	1	1	2	2
Северо-Западный федеральный округ (СЗФО)						
7	Архангельская область	27	28	30	27	28
8	Ленинградская область	15	16	14	15	16
9	Санкт-Петербург	4	4	4	7	9
Южный федеральный округ (ЮФО)						
10	Краснодарский край	16	17	15	13	8
11	Волгоградская область	22	22	20	20	20
12	Ростовская область	8	12	10	14	15
Северо-Кавказский федеральный округ (СКФО)						
13	Ставропольский край		29	28		
Приволжский федеральный округ (ПФО)						
14	Республика Башкортостан	17	8	7	6	6
15	Республика Татарстан	21	20	19	19	19
16	Пермский край	19	19	21	22	23
17	Кировская область	28	27	27	28	27
18	Нижегородская область	11	13	13	12	10
19	Оренбургская область	25	25	26	26	26
20	Самарская область	13	11	11	11	12
21	Саратовская область	26	26	25	25	25
Уральский федеральный округ (УрФО)						
22	Свердловская область	5	5	5	4	4
23	Тюменская область					30
24	Ханты-Мансийский авто- номный округ – Югра	24	24	24	24	24
25	Челябинская область	7	6	6	5	5
Сибирский федеральный округ (СФО)						
26	Алтайский край	14	15	16	17	14
27	Красноярский край	6	7	12	8	7
28	Иркутская область	12	14	18	16	17
29	Кемеровская область	9	10	9	10	13
30	Новосибирская область	18	18	17	18	18
31	Омская область	20	21	22	21	22
Дальневосточный федеральный округ (ДФО)						
32	Приморский край	3	3	3	3	3
33	Хабаровский край	10	9	8	9	11
34	Амурская область			29		

Таблица 7. Частота попадания регионов РФ в листинг расчета индекса пожаров за период 2006–2010 гг.

Группа	Регионы	Частота
1	Воронежская, Московская области, г. Москва (ЦФО); Архангельская, Ленинградская области, г. Санкт-Петербург (СЗФО); Краснодарский край, Волгоградская, Ростовская области (ЮФО); Республики Башкортостан и Татарстан, Пермский край, Кировская, Нижегородская, Оренбургская, Самарская, Саратовская области (ПФО); Свердловская область, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Челябинская область (УрФО); Алтайский, Красноярский края, Иркутская, Кемеровская, Новосибирская, Омская области (СФО); Приморский, Хабаровский края (ДФО)	0,033
2	Нет	0
3	Брянская область (ЦФО)	0,020
4	Владимирская область (ЦФО); Ставропольский край (СКФО)	0,013
5	Ярославская область (ЦФО); Тюменская область (УрФО); Амурская область (ДФО)	0,007
6	Все остальные регионы РФ, не попавшие в группы 1–5	0

Таблица 8. Частота попадания регионов в кризисную группу в 2006–2010 гг.

Группа	Регионы	Частота
1	Московская область, г. Москва (ЦФО); г. Санкт-Петербург (СЗФО); Свердловская, Челябинская области (УрФО); Красноярский край, Кемеровская область (СФО); Приморский, Хабаровский края (ДФО)	0,081
2	Ростовская область (ЮФО); Республика Башкортостан, Самарская область (ПФО)	0,065
3	Нижегородская область (ПФО)	0,048
4	Краснодарский край (ЮФО)	0,032
5	Нет	0
6	Все остальные регионы РФ, не попавшие в группы 1–5	0

Кроме того, можно определить частоту попадания региона в кризисную группу (табл. 8). При этом также выделено шесть групп регионов. В первую группу вошли регионы, попавшие в состав кризисной группы 5 раз, во вторую — 4 раза, в третью — 3 раза, в четвертую — 2 раза, в пятую — 1 раз,

в шестую — 0 раз. Основной вклад в состав кризисной группы вносят регионы пятой и шестой групп.

Систематическое присутствие ряда регионов в составе кризисной группы в течение 2006–2010 гг. свидетельствует о необходимости поиска новых управленческих решений.

В итоге рассчитан индекс пожаров в Российской Федерации за 2006–2010 гг. Для каждого года определены 30 регионов с опасной обстановкой с пожарами, вошедшие в листинг расчета индекса. Для каждого года определен также состав кризисной группы, для которой необходимы неотложные меры. Вычислены частоты попадания регионов в листинг и в состав кризисной группы, в результате чего определены группы регионов, систематически попадающие в листинг расчета индекса и в состав кризисной группы. Отметим, что аналогичный подход был использован при введении индекса пожаров в сельской местности РФ [31], а также индекса погибших при пожарах в сельской местности РФ [32].

Индекс пожаров может быть использован для обоснования управленческих и кадровых решений аналогично тому, как индекс Доу-Джонса употребляется в экономике и сфере финансов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2010 году : статистический сборник / Под общ. ред. В. И. Климкина. — М. : ВНИИПО, 2011. — 140 с.
2. World Fire Statistics // Information Bulletin of the World Fire Statics Centre. Geneva Association Information Newsletter. — 2011. — No. 27. — 20 p.
3. Куликова М. Н. Обязательное взаимное страхование строений от пожара в России : дис. ... канд. экон. наук. — М., 2011. — 160 с.
4. Васин П. Н. Из истории развития страхования в России. URL: <http://www.sib-insur.ru/ofni02-1.htm> (дата обращения: 30.12.2015).
5. Дадьков В. Н. Экономика взаимного страхования в дореволюционной России // Страховое дело. — 2002. — № 1. — С. 15–23.
6. Жилкина М. Государственное регулирование страхования в дореволюционной России // Российский страховой бюллетень. — 1999. — № 3. — С. 22–30.

7. Логвинова И. Л. Первые опыты взаимного страхования крестьянских строений от огня в Российской Империи // Страхование дело. — 2008. — № 12 (191). — С. 53–61.
8. Луневский С. П. Страхование от огня. — СПб. : Типолитография К. Фельдман, 1912. — 206 с.
9. Пожары и страхование от огня в г. Москве : статистический очерк. — М. : Товарищество скоропечатни А. А. Левенсон, 1914. — 120 с.
10. Прежнецов А. О. Взаимное страхование от пожаров и его реформа. — СПб. : Типография товарищества “Общественная польза”, 1867. — 282 с.
11. Шахт А. А. Пожары и страхование от огня в России в наблюдениях и заметках. — М. : Типолитография Лашкевич, Знаменский и К^о, 1892. — 68 с.
12. Иванов А. К. История противопожарного страхования в Российской империи 1827–1921 гг. (на материалах Восточной Сибири) : автореф. дис. ... канд. ист. наук. — Иркутск, 2007. — 27 с.
13. Тимофеев В. В. Организационно-правовые основы пожарной охраны в Российской империи и ее особенности на Кубани. Конец XVIII — начало XX вв. : автореф. дис. ... канд. юрид. наук. — Краснодар, 2011. — 32 с.
14. Дадьков В. Н. Формирование отраслевых систем взаимного страхования и перспективы их развития : дис. ... д-ра экон. наук. — М., 2007. — 395 с.
15. Давиденко М. В. Сравнительный анализ пожарной опасности регионов в интересах повышения эффективности деятельности органов ГПН (на примере Мурманской области) : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2012. — 128 с.
16. Давиденко М. В., Войтенко О. В. Основные направления совершенствования деятельности органов ГПН по предупреждению пожаров // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. — 2012. — № 1. — С. 5–9.
17. Шахраманьян М. А., Акимов В. А., Козлов К. А. Сибирский регион России: опасности природного, техногенного и экологического характера // Экология и промышленность России. — 2003. — № 5. — С. 22–23.
18. Шахраманьян М. А., Акимов В. А. Субъекты Северо-Кавказского региона: опасности природного, техногенного и экологического характера // Экология и промышленность России. — 2000. — № 8. — С. 12–16.
19. Шахраманьян М. А., Акимов В. А., Козлов К. А. Субъекты Уральского региона: опасности природного, техногенного и экологического характера // Экология и промышленность России. — 2003. — № 1. — С. 28–32.
20. Тарасенко В. А. Методика оценки и ранжирования объектов и территорий железнодорожного транспорта по показателям чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами (на примере Восточно-Сибирской железной дороги) : дис. ... канд. техн. наук. — Иркутск, 2006. — 192 с.
21. Половинкина А. И. Модели и механизмы оптимального управления пожарной безопасностью региона : дис. ... канд. техн. наук. — Воронеж, 2003. — 189 с.
22. Савинский А. Ф. Совершенствование процессов управления подразделениями государственной пожарно-спасательной службы в условиях функционирования единой дежурно-диспетчерской службы : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2004. — 24 с.
23. Кузнецов М. Ю. Совершенствование процессов управления при реорганизации структуры государственной противопожарной службы МЧС России : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2006. — 169 с.
24. Путин В. С. Совершенствование методов обоснования ресурсной потребности территориальных подразделений Государственной противопожарной службы : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2004. — 213 с.
25. Берзон Н. И., Ариавский А. Ю., Буянова Е. А. Фондовый рынок. — 3-е изд. — М. : ИТА-ПРЕСС, 2002. — 559 с.
26. O'Sullivan A., Sheffrin S. M. Economics: Principles in action. — Boston : Pearson Prentice Hall, 2007. — 609 p.
27. Anderson B. Economics and the public welfare. Financial and economic history of the United States, 1914–1946. — New York : Liberty Press, 1979. — 602 p.
28. Кайбичев И. А. Аналоги индекса Доу-Джонса в статистике пожаров // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации : V Всероссийская научно-практическая конференция (26 октября 2011 г.). — Екатеринбург : УрИ ГПС МЧС России, 2011. — Ч. 1. — С. 104–109.
29. Кайбичев И. А. Подход Доу-Джонса в статистике пожаров // Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: теория и практика : материалы II Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. Р. Н. Минниханова. — Казань : ГУ “Научный центр безопасности жизнедеятельности детей”, 2012. — С. 639–646.

30. Кайбичев И. А., Орлов С. А. Индексы пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 6. — С. 50–54.
31. Kaibichev I. A., Kaibicheva E. I. Fire number index in rural terrain in Russian Federation for 2006–2010 years // Safety engineering in function of improvement of the working conditions : Proceedings. Ohrid, 10–12 of May, 2013. — Republic of Makedonia, Ohrid : “St. Cyril and Methodius” University in Skopje, 2013. — P. 136–140.
32. Kaibicheva E. I., Kaibichev I. A. Index numbers of those killed in fires in rural areas of the Russian Federation in the 2006–2010 period // Facta Universitatis. — 2013. — Vol. 10, No. 2. — P. 93–98.

Материал поступил в редакцию 5 января 2016 г.

Для цитирования: Кайбичев И. А., Кайбичева Е. И. Индекс пожаров в Российской Федерации за 2006–2010 годы // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 57–65. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.57-65.

English

FIRE INDEX IN RUSSIAN FEDERATION FOR 2006–2010 YEARS

KAIBICHEV I. A., Doctor of Mathematics and Physics Sciences, Associated Professor, Professor, Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; e-mail address: Kaibichev@mail.ru)

KAIBICHEVA E. I., Head Specialist, Federal Service Government Statics in Sverdlovsk District “Sverdlovstat” (Tolmacheva St., 23, Yekaterinburg, 620041, Russian Federation)

ABSTRACT

As a result called on review of the scientific studies it's shown regions category need in Russian Federation on number of fires. This will allow to compare the situation with fires in region. The authors consider expedient to select two groups region (dangerous and crisis). In dangerous regions group it will be necessary to develop the program on reduction of the number of fires, but in crisis group — take urgent and priority measures. In economy and stocks market for estimation of the condition Dow Jones Average is actively used. The similar approach is possible fireman for estimation to dangers. The methods of the calculation of the fire index are enough simple. On the first stage regions of Russian Federation are ranked in order of the decrease of the number of fires. Then 30 regions with maximum importance of the number of fires are selected. They form the listings of the calculation of the fire index and the first category of the countries, which is considered dangerous. The fire index is paid by averaging the factors region in listings. Except this amongst groups dangerous region, came in listings, it's possible select the second category a region — a crisis group. The regions will get in this group with importance of the number of fires exceeding value of the index. There are computed frequencies of the hit region Russia in listings of the calculation of the fire index for 2006–2010 years, as well as in crisis group. The got results useful for shaping the programs of the reduction number of fires in region in dangerous and crisis category.

Keywords: national safety; number of fires; fires statistics; Dow Jones Average; fire index.

REFERENCES

1. Klimkin V. I. (ed.). *Pozhary i pozharnaya bezopasnost v 2010 godu: statisticheskiy sbornik* [Fires and fire safety in 2010. Statistical yearbook]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2011. 140 p.
2. World Fire Statistics. *Information Bulletin of the World Fire Statics Centre. Geneva Association Information Newsletter*, 2011, no. 27. 20 p.
3. Kulikova M. N. *Obyazatelnoye vzaimnoye strakhovaniye stroyeniy ot pozhara v Rossii*. Dis. kand. ekon. nauk [Compulsory mutual insurance of buildings against fire in Russia. Cand. econom. sci. diss.]. Moscow, 2011. 160 p.

4. Vasin P. N. *Iz istorii razvitiya strakhovaniya v Rossii* [From the history of development of insurance in Russia]. Available at: <http://www.sib-insur.ru/ofni02-1.htm> (Accessed 30 December 2015).
5. Dadkov V. N. *Ekonomika vzaimnogo strakhovaniya v dorevolutsionnoy Rossii* [The Economics of mutual insurance in pre-revolutionary Russia]. *Strakhovoye delo — Insurance Business*, 2002, no. 1, pp. 15–23.
6. Zhilkina M. *Gosudarstvennoye regulirovaniye strakhovaniya v dorevolutsionnoy Rossii* [State regulation of insurance in pre-revolutionary Russia]. *Rossiyskiy strakhovoy byulleten — Russian Insurance Bulletin*, 1999, no. 3, pp. 22–30.
7. Logvinova I. L. *Pervyye opyty vzaimnogo strakhovaniya krestyanskikh stroyeniy ot ognya v Rossiyskoy Imperii* [The first experiments of mutual insurance of peasant buildings from fire in the Russian Empire]. *Strakhovoye delo — Insurance Business*, 2008, no. 12 (191), pp. 53–61.
8. Lunevskiy S. P. *Strakhovaniye ot ognya* [Fire Insurance]. Saint Petersburg, Tipolitografiya K. Feldman, 1912. 206 p.
9. *Pozhary i strakhovaniye ot ognya v g. Moskve: statisticheskiy ocherk* [Fires and fire insurance in Moscow. A statistical essay]. Moscow, Tovarichestvo skoropechatni A. A. Levenson Publ., 1914. 120 p.
10. Prezhentsov A. O. *Vzaimnoye strakhovaniye ot pozharov i yego reforma* [Mutual fire insurance and its reform]. Saint Petersburg, Tipografiya tovarishchestva “Obshchestvennaya polza”, 1867. 282 p.
11. Shakht A. A. *Pozhary i strakhovaniye ot ognya v Rossii v nablyudeniyyakh i zametkakh* [Fires and fire insurance in Russia in the observations and notes]. Moscow, Tipolitografiya Lashkevich, Znamenskiy i Ko., 1892. 68 p.
12. Ivanov A. K. *Istoriya protivopozharnogo strakhovaniya v Rossiyskoy imperii 1827–1921 gg. (na materialakh Vostochnoy Sibiri)*. Avtoref. dis. kand. ist. nauk [The history of fire insurance in the Russian Empire, 1827–1921 (on materials of Eastern Siberia). Abstr. cand. historic. sci. diss.]. Irkutsk, 2007. 27 p.
13. Timofeev V. V. *Organizatsionno-pravovyye osnovy pozharnoy okhrany v Rossiyskoy imperii i yeye osobennosti na Kubani. Konets XVIII – nachalo XX vv. Avtoref. dis. kand. yurid. nauk* [Organizational and legal foundations of fire protection in the Russian Empire and its features in the Kuban. Late XVIII – early XX centuries. Abstr. cand. law sci. diss.]. Krasnodar, 2011. 32 p.
14. Dadkov V. N. *Formirovaniye otraslevykh system vzaimnogo strakhovaniya i perspektivy ikh razvitiya*. Dis. dokt. ekon. nauk [Formation of branch systems of mutual insurance and the prospects of their development. Dr. econom. sci. diss.]. Moscow, 2007. 395 p.
15. Davidenko M. V. *Sravnitelnyy analiz pozharnoy opasnosti regionov v interesakh povysheniya effektivnosti deyatelnosti organov GPN (na primere Murmanskoy oblasti)*. Dis. kand. tekhn. nauk [Comparative analysis of fire risk regions in order to enhance the effectiveness of the local GPN (on the example of Murmansk region). Cand. tech. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2012. 128 p.
16. Davidenko M. V., Voitenok O. V. *Osnovnyye napravleniya sovershenstvovaniya deyatelnosti organov GPN po preduprezhdeniyu pozharov* [The basic directions of activity improvement of bodies state fire supervision (SFS) for fire prevention]. *Nadzornaya deyatelnost i sudebnaya ekspertiza v sisteme bezopasnosti — Monitoring and Expertise in Safety Systems*, 2012, no. 1, pp. 5–9.
17. Shakhramanyan M. A., Akimov V. A., Kozlov K. A. *Sibirskiy region Rossii: opasnosti prirodnogo, tekhnogenno i ekologicheskogo kharaktera* [Siberian region of Russia: hazards of natural, technogen and ecological type]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii — Ecology and Industry of Russia*, 2003, no. 5, pp. 22–23.
18. Shakhramanyan M. A., Akimov V. A. *Subyekty Severo-Kavkazskogo regiona: opasnosti prirodnogo, tekhnogenno i ekologicheskogo kharaktera* [Subjects of the North Caucasus region: hazards of natural, technogen and ecological type]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii — Ecology and Industry of Russia*, 2000, no. 8, pp. 12–16.
19. Shakhramanyan M. A., Akimov V. A., Kozlov K. A. *Subyekty Uralskogo regiona: opasnosti prirodnogo, tekhnogenno i ekologicheskogo kharaktera* [Subjects of Ural region: hazards of natural, technogen and ecological type]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii — Ecology and Industry of Russia*, 2003, no. 1, pp. 28–32.
20. Tarasenko V. A. *Metodika otsenki i ranzhirovaniya obyektov i territoriy zheleznodorozhnogo transporta po pokazatelyam chrezvychaynykh situatsiy, svyazannykh s pozharemi (na primere Vostochno-Sibirskoy zheleznoy dorogi)*. Dis. kand. tekhn. nauk [Methods of evaluation and ranking of objects and territories of railway transport on indicators of emergency situations involving fires (on the example of East-Siberian railway). Cand. tech. sci. diss.]. Irkutsk, 2006. 192 p.

21. Polovinkina A. I. *Modeli i mekhanizmy optimalnogo upravleniya pozharoy bezopasnostyu regiona. Dis. kand. tekhn. nauk* [Models and tools for the optimal management of fire safety in the region. Cand. tech. sci. diss.]. Voronezh, 2003. 189 p.
22. Savinskiy A. F. *Sovershenstvovaniye protsessov upravleniya podrazdeleniyami gosudarstvennoy pozharo-spasatelnoy sluzhby v usloviyakh funktsionirovaniya edinoy dezhurno-dispatcherskoy sluzhby. Avtoref dis. kand. tekhn. nauk* [Process improvement management units of the state fire and rescue service in terms of the operation of the single dispatcher service. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2004. 24 p.
23. Kuznetsov M. Yu. *Sovershenstvovaniye protsessov upravleniya pri reorganizatsii struktury gosudarstvennoy protivopozharoy sluzhby MChS Rossii. Dis. kand. tekhn. nauk* [Improvement of management processes in the restructuring of the state fire service of Emercom of Russia. Cand. tech. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2006. 169 p.
24. Putin V. S. *Sovershenstvovaniye metodov obosnovaniya resursnoy potrebnosti territorialnykh podrazdeleniy Gosudarstvennoy protivopozharoy sluzhby. Dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the methods of resource requirements justification of territorial divisions of the State fire service. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2004. 213 p.
25. Berzon N. I., Arshavskiy A. Yu., Buyanova Ye. A. *Fondovyy rynek. 3-e izd.* [Stock market. 3rd ed.]. Moscow, ITA-PRESS Publ., 2002. 559 p.
26. O'Sullivan A., Sheffrin S. M. *Economics: Principles in action*. Boston, Pearson Prentice Hall, 2007. 609 p.
27. Anderson B. *Economics and the public welfare. Financial and economic history of the United States, 1914–1946*. New York, Liberty Press, 1979. 602 p.
28. Kaibichev I. A. *Analogi indeksa Dou-Dzhonsa v statistike pozharov* [Analogues of the Dow Jones index in fire statistics]. *Aktualnyye problemy obespecheniya bezopasnosti v Rossiyskoy Federatsii: V Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (26 oktyabrya 2011)* [Actual problems of safety provision in the Russian Federation. V All-Russian Scientific Conference, 26 October 2011]. Yekaterinburg, Ural State Fire Service Institute of Emercom of Russia Publ., 2011, part 1, pp. 104–109.
29. Kaibichev I. A. *Podkhod Dou-Dzhonsa v statistike pozharov* [Dow Jones approach in fire statistics]. *Sovremennyye problemy bezopasnosti zhiznedeyatelnosti: teoriya i praktika. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern problems to safety to vital activity: theory and practice. Proceedings of II International Scientific and Practical Conference]. Kazan, Scientific Center of Security Life of Children Publ., 2012, part II, pp. 639–646.
30. Kaibichev I. A., Orlov S. A. *Indeksy pozharoy opasnosti* [Fireman dangers indexes]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 6, pp. 50–54.
31. Kaibichev I. A., Kaibicheva E. I. *Fire number index in rural terrain in Russian Federation for 2006–2010 years. Safety engineering in function of improvement of the working conditions: Proceedings*. Ohrid, 10–12 May, 2013, Republic of Makedonia, Ohrid, “St. Cyril and Methodius” University in Skopje, 2013, pp. 136–140.
32. Kaibicheva E. I., Kaibichev I. A. *Index numbers of those killed in fires in rural areas of the Russian Federation in the 2006–2010 period. Facta Universitatis*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 93–98.

For citation: Kaibichev I. A., Kaibicheva E. I. Indeks pozharov v Rossiyskoy Federatsii za 2006–2010 gody [Fire index in Russian Federation for 2006–2010 years]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 57–65. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.57-65.

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

АНАЛИЗ ТИПОВОГО СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ВРЕМЕНИ ТУШЕНИЯ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА РАЗЛИЧНЫХ ОГNETУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ИХ ПОДАЧИ

На основе анализа экспериментального материала по тушению пламени горючих жидкостей предложена модель процесса тушения, которая включает локальное взаимодействие основания распыленной струи с участком факела пламени и дальнейшее растекание тушащего слоя по горячей поверхности нефтепродукта. Рассмотрен материальный баланс процесса тушения пламени углеводорода методом покрытия горячей поверхности слоем огнетушащего вещества (ОТВ). На конкретной модели тушения пламени бензина распыленной водой высокой степени дисперсности приведено описание экспериментальных результатов зависимости времени тушения и удельного расхода ОТВ от интенсивности его подачи, на основе которых определены оптимальная интенсивность подачи и минимальный удельный расход распыленной воды. Проведен анализ тушения пламени бензина струей распыленного фреона 114B2 и огнетушащим порошком. Рассмотрен процесс тушения пламени гептана подачей пены на горящую поверхность и в слой нефтепродукта. Для описания результатов эксперимента предложена формула, в которой используются данные по процессу тушения пламени пенами, полученными из углеводородных и фторированных пенообразователей. Показана возможность создания типового уравнения для описания зависимости удельного расхода и времени тушения от интенсивности подачи вещества различной природы. Показана возможность определения оптимальной интенсивности и минимального удельного расхода огнетушащего вещества независимо от его природы, а также возможность применения типового расчетного соотношения для описания процесса тушения пламени как распыленными струями, так и пеной при подаче на горящую поверхность и в слой нефтепродукта.

Ключевые слова: модель процесса тушения; удельный расход; время тушения; интенсивность подачи; огнетушащие вещества; механизм тушения.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76

Комплексные исследования огнетушащего действия веществ различной природы (воды грубой и тонкой дисперсности, водных пленкообразующих растворов, химически активных хладонов, порошковых составов различной степени дисперсности, твердых аэрозолей и пен различной кратности) показали возможность применения типовой модели тушения пламени горючих жидкостей огнетушащими веществами (ОТВ). Данная модель базируется на принципе двойственного механизма тушащего действия огнетушащих веществ [1, 2].

Для описания экспериментальных результатов зависимости удельного расхода и времени тушения

от интенсивности подачи огнетушащего вещества в литературе предлагаются различные варианты уравнений [3–9].

Цель настоящей работы — показать возможность создания типового уравнения для описания зависимости удельного расхода и времени тушения от интенсивности подачи веществ различной природы. На основе анализа экспериментального материала по тушению пламени горючих жидкостей показана также возможность определения оптимальной интенсивности и минимального удельного расхода ОТВ независимо от его природы. Методы экспериментального исследования описаны в работах [10–12].

Основой для анализа является двойственный механизм тушащего действия ОТВ [1, 2]. Двойственный механизм отличается универсальностью и особенно сильно проявляется при тушении, например, пламени горючих жидкостей распыленными струями воды и хладона, струей порошка и воздуха, пеной при подаче в основание горящего резервуара с нефтепродуктом.

Двойственный механизм сопровождается увлечением кислорода воздуха струей вещества, поэтому в первый момент подачи струи факел пламени резко увеличивается в объеме. Учет действия притока дополнительного объема воздуха позволил выявить природу экстремальной зависимости удельного расхода от интенсивности подачи огнетушащего вещества и существование оптимальной интенсивности его подачи при тушении пламени.

Двойственный механизм тушения пламени огнетушащими веществами включает основное и сопутствующее действия ОТВ: основное — снижение температуры в зоне горения с поглощением тепла на фазовые превращения, снижение концентрации горючего компонента; сопутствующее — повышение температуры, расширение зоны горения, снижение эффективности действия огнетушащего вещества.

На основе систематических исследований процесса тушения пламени горючих жидкостей различными ОТВ предложен локальный механизм тушения пламени струей огнетушащего вещества [13]. В соответствии с этим механизмом тушение дисперсными ОТВ происходит через локальное взаимодействие основания струи с частью факела пламени. Таким образом, струя огнетушащего вещества, не подвергаясь воздействию высокой температуры всего факела пламени, поступает через потушенный участок в предпламенную зону, снизу факела пламени, и далее растекается по поверхности горящего нефтепродукта.

Тушение происходит за счет постепенного покрытия горячей поверхности слоем ОТВ, концентрация которого в смеси с воздухом выше или соответствует минимальной флегматизирующей концентрации. Флегматизированный слой, поднимаясь в зону горения, прекращает процесс горения.

Высокодисперсные жидкости, включая воду и жидкие фреоны, при подаче в зону горения после прохождения пламенной зоны превращаются в пар. Через потушенный участок факела пламени струя пара попадает непосредственно на поверхность жидкости. Тушение пламени происходит за счет распространения слоя флегматизированной паровоздушной смеси по горячей поверхности нефтепродукта. Для водяного пара минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора (МФКФ) составляет 30–35 % об., для фреонов — 3–10 % об.

Вывод расчетного выражения для описания зависимости времени тушения и удельного расхода ОТВ от интенсивности его подачи осуществляется на основании результатов ранее проведенных работ [3–9, 14–19].

Рассмотрим материальный баланс процесса тушения пламени углеводорода методом покрытия горячей поверхности слоем огнетушащего вещества средней толщиной h (м), со средней удельной скоростью потерь, пропорциональной площади поверхности растекающегося слоя:

$$q \, d\tau = U S d\tau + \rho h dS, \quad (1)$$

где q — расход ОТВ, кг/с или $\text{м}^3/\text{с}$;

τ — время тушения, с;

U — удельная скорость выгорания жидкости, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

S — площадь горения, м^2 ;

ρ — плотность тушащего слоя, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Решая уравнение (1) при начальных условиях $\tau = 0$, $S = 0$ и замене отношения $q/S = J$, получаем формулу

$$\tau = -\frac{\rho h}{U} \ln \left(1 - \frac{U}{J} \right), \quad (2)$$

где J — текущее значение интенсивности подачи раствора, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Из формулы (2) следует, что при $J = U$ время тушения стремится к бесконечности, т. е. возникает критическая ситуация, при которой все поданное вещество полностью утрачивается. Обозначив $J = U \equiv J_{\text{кр}}$ (где $J_{\text{кр}}$ — критическая интенсивность подачи ОТВ, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), получим известное соотношение [7–11], которое связывает время тушения с критической интенсивностью подачи огнетушащего вещества:

$$\tau = -\frac{\rho h}{J_{\text{кр}}} \ln \left(1 - \frac{J_{\text{кр}}}{J} \right). \quad (3)$$

Если принять во внимание, что средняя толщина тушащего слоя неодинакова в месте падения и на фронте распространения слоя, то среднее значение определяется полусуммой толщин слоя в месте падения струи и на фронте слоя. Толщина слоя в месте падения струи на горящую поверхность зависит от интенсивности подачи распыленной струи. Предложенная зависимость средней толщины тушащего слоя h от интенсивности подачи струи может быть описана формулой

$$h = \frac{h_0 + \beta J^n}{2}, \quad (4)$$

где h_0 — толщина слоя в месте падения струи на горящую поверхность, м;

β — коэффициент пропорциональности;

n — показатель степени, характеризующий темп нарастания средней толщины тушащего слоя.

Функциональная зависимость средней толщины тушащего слоя от интенсивности подачи ОТВ, в первом приближении, может быть линейной, т. е. $n = 1$. Однако это неоднозначно, поэтому в формулу зависимости средней толщины от интенсивности вводится показатель степени, значение которого может изменяться от 0,5 до 2,5. После проведения экспериментальных исследований по наклону восходящей ветви кривой зависимости удельного расхода от интенсивности подачи можно уточнить значение показателя степени. Вначале принимаем, что $n = 1,0$. Тогда, полагая, что $h = h_0$ при $J = J_{кр}$, из формулы (4) получим:

$$\beta = h_0 / J_{кр}^n. \quad (5)$$

Соответственно, средняя толщина тушащего слоя

$$h = h_0 \left[1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^n \right]. \quad (6)$$

Перепишав формулу (3) с учетом (6), получим:

$$\tau = -\frac{\rho h_0}{J_{кр}} \left[1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^n \right] \ln \left(1 + \frac{J_{кр}}{J} \right). \quad (7)$$

Для определения удельного расхода огнетушащего вещества Q (кг/(м²·с)) время тушения умножаем на соответствующую интенсивность подачи:

$$Q = J\tau. \quad (8)$$

Описание полученных результатов с помощью формул (7) и (8) проводят построением кривых зависимости времени тушения и минимального удельного расхода от интенсивности подачи ОТВ.

Если тушение пламени происходит не распыленной струей вещества, а водяным туманом или фреоном, то следовало бы пересчитать массу жидкости в объем газа, например, по формуле [20]:

$$q_v = q_m \cdot 22,4 / M_{ОТВ}, \quad (9)$$

где q_v — расход газа, м³/с;

q_m — массовый расход водяной струи, кг/с;

$M_{ОТВ}$ — молярная масса ОТВ;

22,4 — мольный объем, м³/кмоль.

При использовании формул (7) и (8) для веществ, превращающихся в пар, необходимо плотность, представленную в числителе, и критическую интенсивность (в знаменателе) умножить на $22,4 / M_{ОТВ}$, чтобы перевести жидкость в пар. Точно так же отношение интенсивностей под логарифмом необходимо умножить на тот же множитель. Однако даже если произвести данные операции, это ничего не изменит, поскольку множители в числителе и знаменателе сократятся. Следовательно, анализ формул (7) и (8) для определения соответственно времени тушения и удельного расхода огнетушащего вещества

можно выполнять без перевода массовых единиц в объемные.

На конкретной модели тушения пламени бензина распыленной водой высокой степени дисперсности проведем описание экспериментальных результатов зависимости времени тушения и удельного расхода воды от интенсивности ее подачи, на основе которых определим оптимальную интенсивность подачи и минимальный удельный расход распыленной воды. Акцент на высокую степень дисперсности делается для того, чтобы считать, что вся вода, поданная на тушение пламени, после прохождения пламенной зоны превращается в пар, т. е. коэффициент превращения воды в пар равен единице.

Удельный расход распыленной воды, затраченной на тушение пламени, рассчитывали умножением времени тушения на соответствующую интенсивность подачи распыленной воды по формуле (8).

Анализ формул (7) и (8) показывает, что умножением времени тушения на соответствующую интенсивность подачи распыленной струи удастся получить экстремальную зависимость удельного расхода огнетушащего вещества от интенсивности его подачи. Этот эффект обнаружен во всех экспериментах по тушению пламени углеводородов распыленной водой, распыленным фреоном или огнетушащим порошком.

Определение удельной скорости потерь осуществляется исходя из скорости выгорания и флегматизирующей концентрации ОТВ. Расчет может дать хорошие результаты, если весь поток распыленного огнетушащего вещества превращается в пар. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчетов, полученных с помощью формул (7) и (8), представлены на рис. 1.

Если принять, что при дисперсности распыленной воды менее 20 мкм весь поток при прохождении через фронт пламени превращается в пар, то критическая интенсивность может быть определена умножением удельной скорости выгорания жидкости на флегматизирующую концентрацию водяного пара и коэффициент его использования. Если скорость выгорания бензина равна 0,05 кг/(м²·с), а флегматизирующая концентрация водяного пара в смеси паров бензина и воздуха составляет 35 %, то критическая интенсивность

$$J_{кр} = U u_m \varphi_T = 0,05 \cdot 0,35 \cdot 1,0 = 0,0175 \text{ кг/(м}^2\text{·с)}. \quad (10)$$

На рис. 1 представлена экспериментально полученная зависимость времени тушения пламени гептана и удельного расхода распыленной воды высокой степени дисперсности (со средним размером капель 20 мкм). Сопоставление этой зависимости с рассчитанной по принятой модели дало удовлетворительное совпадение.

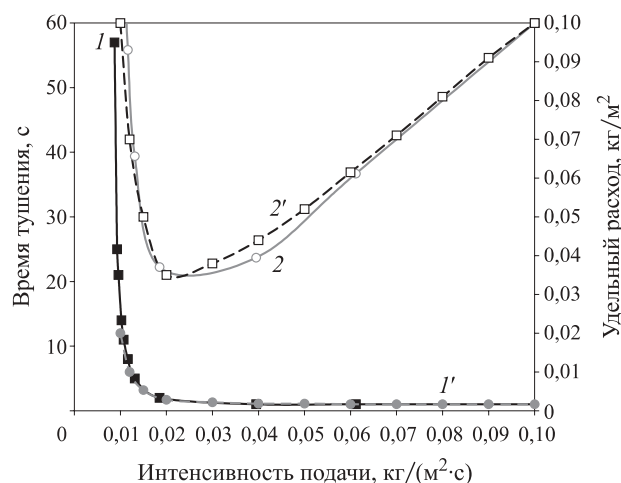


Рис. 1. Зависимость времени тушения пламени дизельного топлива (I , I') и удельного расхода (2 , $2'$) распыленной воды со средним размером капель 20 мкм: I , 2 — эксперимент; I' , $2'$ — расчет

Описание полученных результатов с помощью формул (7) и (8) проводят путем графического построения кривых зависимости времени тушения и минимального удельного расхода от интенсивности подачи, например, пенообразующего раствора. Критическую интенсивность при тушении распыленными огнетушащими веществами определяют по формуле (10). Если же это невозможно, то используют величину, полученную из графика, построенного на основе экспериментальных измерений. Затем вводят показатель степени, равный единице, и ориентировочные значения минимальной толщины флегматизированного слоя и его средней плотности. При этом ориентируются на ход кривой зависимости удельного расхода от интенсивности подачи. Если кривые не совпадают по наклону восходящей ветви кривой удельного расхода, то изменяют показатель степени. Если не совпадает минимальный удельный расход, то меняют минимальную толщину флегматизированного слоя. Последовательным подбором значений параметров, входящих в формулу (7), можно получить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

По результатам описания результатов эксперимента можно объяснить различие в поведении разных веществ при тушении нефтепродуктов. Судя по наклону восходящей ветви кривой зависимости удельного расхода от интенсивности подачи, представленной на рис. 1, показатель степени в расчетной формуле равен 1,2. Используя различные сочетания критической интенсивности и минимальной толщины слоя водяного пара, удастся получить удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с результатами расчета по предложенным формулам (7) и (8).

При описании результатов эксперимента по тушению пламени дизельного топлива распыленной водой с размером капель 20 мкм использовали следующие параметры:

Критическая интенсивность подачи воды, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,014
Толщина слоя в месте падения струи, м	0,01
Плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$	0,80
Степень n	1,20

Рассмотрим тушение пламени бензина струей распыленного фреона 114B2. Несмотря на ограничения, введенные в связи с негативным воздействием этого фреона на озоновый слой Земли, он является наиболее эффективным средством тушения пожара, поскольку его флегматизирующая концентрация составляет 3–4 %.

Во всех исследованных случаях тушения фреоном при подаче его распыленной струи вначале происходило резкое увеличение объема факела пламени, что обусловлено дополнительным притоком кислорода воздуха, увлекаемого распыленной струей. В дальнейшем слой пара фреона растекался по всей поверхности жидкости и тем самым обеспечивал прекращение горения.

Процесс тушения дизельного топлива фреоном имеет особенность, которая связана с опусканием зоны горения непосредственно к горячей поверхности углеводорода. Капли фреона размером 20 мкм испаряются при прохождении через зону горения. Как и в случае с распыленной водой, основание струи фреона взаимодействует с локальным участком пламени и испаряется. Далее поток пара достигает поверхности жидкости и начинает растекаться по горячей поверхности в виде тонкого слоя смеси фреона с воздухом и паром нефтепродукта. Поскольку концентрация флегматизатора выше МФКФ, слой вместе с паром поступает в зону горения и тушит пламя.

Результаты экспериментальных измерений и расчетов по формулам (7) и (8) времени тушения и удельного расхода фреона при тушении пламени дизельного топлива представлены на рис. 2.

При описании результатов эксперимента по тушению пламени дизельного топлива фреоном 114B2 со средним размером частиц 20 мкм использовали следующие параметры:

Критическая интенсивность подачи, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,007
Толщина слоя в месте падения струи, мм	2,5
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	6,5
Степень n	1,0

При использовании в расчетах данных параметров наблюдается хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными.

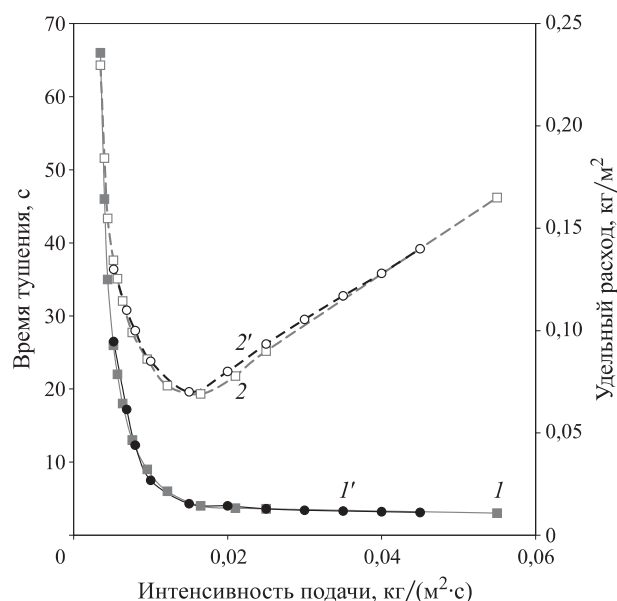


Рис. 2. Зависимость времени тушения пламени бензина (1, 1') и удельного расхода (2, 2') фреона 114В2 со средним размером частиц 20 мкм: 1, 2 — эксперимент; 1', 2' — расчет

Рассмотрим тушение пламени бензина огнетушащим порошком. Прежде всего отметим, что его подача по трубкам малого диаметра затруднительна, поэтому необходимо использовать порошок более грубой дисперсности. Для эксперимента проведем диспергирование порошка перед подачей его с помощью воздуха в зону горения. Поскольку размер частиц порошка неоднороден, то и состав порошковой струи, подаваемой в очаг горения, будет неоднородным. Результаты эксперимента нанесем на диаграмму зависимости времени тушения и удельного расхода порошка от интенсивности его подачи. Удельный расход определяется делением секундного расхода на площадь горящей жидкости. Основная сложность заключается в обеспечении постоянства расхода порошка в процессе тушения пламени.

Подача порошка на факел пламени производится в виде струи с дозированной концентрацией, а прекращается в момент тушения пламени. Взвешиванием определяют убыль массы порошка, поданного на тушение пламени. Обеспечить постоянство концентрации порошка сложно, поэтому измерения проводят многократно, а их результаты наносят на диаграмму зависимости удельного расхода порошка от интенсивности его подачи.

На рис. 3 представлены фрагменты процесса тушения пламени распыленной струей порошка. В момент подачи распыленной струи факел пламени резко увеличивается в размерах за счет дополнительного притока кислорода воздуха, который увлекается в зону горения. Затем пламя постепенно вытесняется слоем порошка с воздухом. Поскольку концентрация порошка выше огнетушащей, то горение посте-



Рис. 3. Фрагменты тушения бензина порошком дисперсностью 80 мкм: а — воздух, увлекаемый струей порошка, раздувает факел пламени; б — формируется слой порошка над горячей поверхностью бензина

пенно прекращается на всей поверхности нефтепродукта.

Результаты эксперимента, оформленные в виде зависимости времени тушения пламени бензина и удельного расхода порошка со средним размером частиц 80 мкм от интенсивности его подачи, представлены на рис. 4.

При описании результатов эксперимента по тушению пламени дизельного топлива порошком “Вексон 24” со средним размером частиц 80 мкм использовались следующие параметры:

Критическая интенсивность подачи, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,165
Толщина слоя в месте падения струи, м	3,0
Плотность порошка, $\text{кг}/\text{м}^3$	120
Степень n	0,85

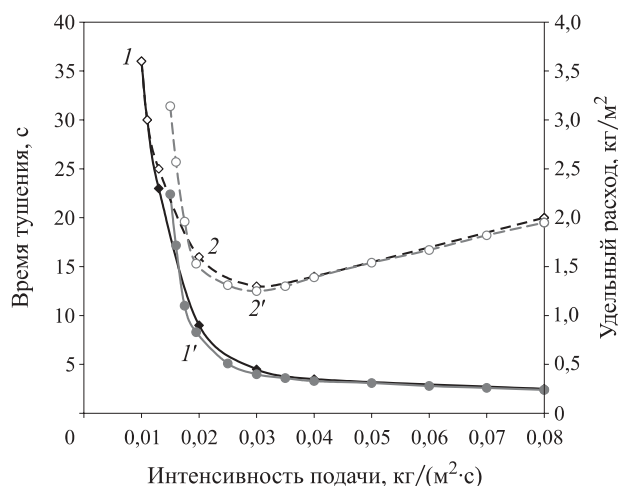


Рис. 4. Зависимость времени тушения пламени бензина (I , I') и удельного расхода (2 , $2'$) огнетушащего порошка со средним размером частиц 80 мкм от интенсивности подачи порошковой струи: 1 , 2 — эксперимент; $1'$, $2'$ — расчет по формулам (7) и (8)

Наблюдается хорошее совпадение расчета с экспериментом, что подтверждает правильность принятой модели тушения, предусматривающей локальный механизм тушения с постепенным распространением флегматизированного слоя по горячей поверхности жидкости.

Результаты систематических исследований процесса тушения нефти подачей струи воздуха в основание резервуара, проводившихся в 50-е годы прошлого столетия, представлены в работах Блинова – Худякова [15, 16]. Так как в этот период добывали нефть с высокой температурой вспышки, то наиболее эффективным методом тушения нефти в резервуаре представлялся метод перемешивания, в частности подачей воздуха в основание резервуара. Однако поскольку этот метод оказался применимым только для тушения пожаров нефти и нефтепродуктов с высокой температурой вспышки, таких как керосин и дизельное топливо, то интерес к нему постепенно снижался, и сейчас он используется только в исследовательской практике.

Представляется интересным проверить возможность описания процесса тушения пламени дизельного топлива подачей струи воздуха в основание резервуара с помощью типовых формул (7) и (8). Согласно этой модели, как и в предыдущих случаях, тушение достигается распространением по горячей поверхности холодного тушащего слоя жидкости, температура которой ниже температуры вспышки. При подаче струи воздуха в основание резервуара вверх увлекается масса жидкости из нижних слоев нефтепродукта. По мере растекания “холодного” слоя жидкости по горячей поверхности снижается скорость ее испарения и, соответственно, уменьшается тепловой поток от факела пламени к горячей

поверхности. Пламя будет потушено, если вся поверхность горячей жидкости будет покрыта слоем “холодной” жидкости.

Технология анализа основана на рассмотрении материального баланса жидкости, поступающей в поверхностный слой и опускающейся из поверхностного слоя за счет конвективных потоков, формируемых восходящим потоком воздуха, и из-за разницы плотностей “холодной” и горячей жидкости.

При анализе результатов эксперимента основная трудность связана с определением интенсивности потока жидкости, образуемого струей поднимающихся пузырей воздуха. Судя по работам [13, 14], эта зависимость при невысоких расходах воздуха близка к линейной, при этом количество поднимающегося раствора в 7–10 раз меньше расхода воздуха, измеренного в объемных единицах.

Для анализа использовали результаты экспериментов по тушению пламени дизельного топлива, полученные на стендовой установке и взятые из литературных источников [13, 14].

Результаты экспериментальных измерений времени тушения в зависимости от интенсивности подачи воздуха при тушении пламени дизельного топлива в полигонных условиях и на стендовой установке представлены на рис. 5. Здесь же показана зависимость удельного расхода воздуха, рассчитанная по формулам (7) и (8).

При описании процесса тушения пламени дизельного топлива подачей воздуха в основание резервуара возникает обратная по сравнению с распыленной водой ситуация. Если в случае с распыленной водой тушение происходит за счет слоя пара, образующегося в результате испарения капель воды (т. е. при переходе из жидкости в пар), то при туше-

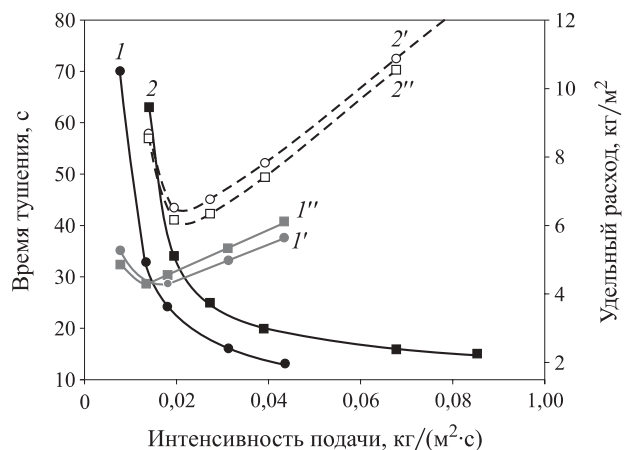


Рис. 5. Зависимость времени тушения дизельного топлива (I , 2) и удельного расхода воздуха (I' , I'' , $2'$, $2''$) подачи его в основание резервуара при тушении на полигоне (I , I' , I'') и на стендовой установке (2 , $2'$, $2''$): I' , $2'$ — эксперимент; I'' , $2''$ — расчет по формулам (7) и (8) (I , 2 — результаты, заимствованные из работ Блинова – Худякова)

нии подачи воздуха его струя увлекает за собой поток жидкости. Как и в предыдущем случае, исходным является расход воздуха, который увлекает за собой вверх холодные слои нефтепродукта. Тушение пламени произойдет после того, как вся поверхность горения покроется слоем углеводорода, температура которого ниже температуры воспламенения.

При сопоставлении результатов расчета с экспериментальными данными была оценена толщина “холодного” слоя на поверхности дизельного топлива. Она составила 2,0 мм в стендовых испытаниях и 2,5 мм — в полигонных. Показатель степени изменялся от 0,78 до 0,73, соответственно, изменялись и оптимальная интенсивность подачи и минимальный удельный расход воздуха (табл. 1).

Тушение пожаров нефтепродуктов проводят с использованием пены, полученной на основе углеводородных и фторированных пенообразователей. Пену на основе углеводородных пенообразователей подают на горящую поверхность, а на основе фторсодержащих пенообразователей — в основание резервуара, непосредственно в горючую жидкость.

Рассмотрим процесс тушения пламени гептана подачей пены на горящую поверхность и в слой нефтепродукта. Для описания результатов эксперимента по предлагаемым формулам (7) и (8) используются данные по процессу тушения пламени пеной, полученной из углеводородных и фторированного пенообразователей. Наиболее надежной характеристикой природы фторсодержащих пенообразователей являются изотермы поверхностного и межфазного натяжения водного раствора на границе с углеводородом. Обычно в качестве эталонного нефтепродукта используют гептан нормального строения, поэтому, прежде чем приступить к экспериментальным исследованиям огнетушащей эффективности,

проверяли поверхностную активность рабочих водных растворов на границе с гептаном.

Сопоставление результатов расчета по формулам (7) и (8) с экспериментальными данными при тушении пламени бензина подачей пены, полученной из фторированного пенообразователя, на горящую поверхность и в основание резервуара приведено на рис. 6.

Основные параметры, входящие в уравнение тушения пламени бензина фторсодержащим пленкообразующим пенообразователем, даны в табл. 2.

Результаты тушения бензина пеной низкой кратности, полученной из растворов углеводородного пенообразователя, при подаче ее на горящую поверхность и в слой углеводорода, а также пеной, полученной из фторсодержащего пленкообразующего пенообразователя, при подаче в основание резервуара представлены на рис. 7.

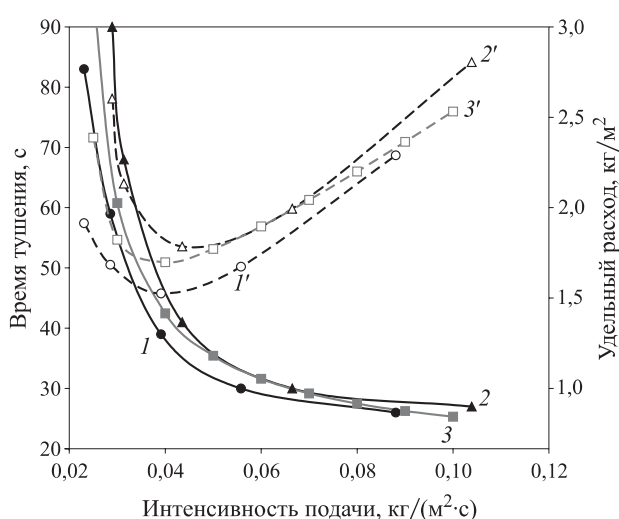


Рис. 6. Зависимость времени тушения бензина (1–3) и удельного расхода (1'–3') пены из фторированного пенообразователя при ее подаче в слой горючего (1, 1') и на его поверхность (2, 2'): 1, 1', 2, 2' — эксперимент; 3, 3' — расчет по формулам (7) и (8)

Таблица 1. Основные параметры процесса тушения дизельного топлива подачей пены на горящую поверхность и в основание резервуара

Параметр	Значение параметра при испытаниях	
	на стендовой установке	на полигоне
Критическая интенсивность подачи $J_{кр}$, л/(м²·с)	0,0105	0,08
Оптимальная интенсивность подачи $J_{опт}$, л/(м²·с)	0,22	0,15
Минимальный расход Q_{min} , л/м²	6,3	4,3
Плотность дизельного топлива, кг/м³	800	800
Толщина слоя в месте падения пены, мм	1,75	1,45
Показатель степени n	0,78	0,73

Таблица 2. Основные параметры процесса тушения бензина пеной, полученной из растворов фторсодержащего пленкообразующего пенообразователя, подачей ее на горящую поверхность и в основание резервуара

Параметр	Значение параметра при подаче пены	
	на поверхность	в основание резервуара
Критическая интенсивность подачи, кг/(м²·с)	0,018	0,040
Кратность пены	10	10
Плотность пены, кг/м³	1000	1000
Показатель степени n	0,68	0,75

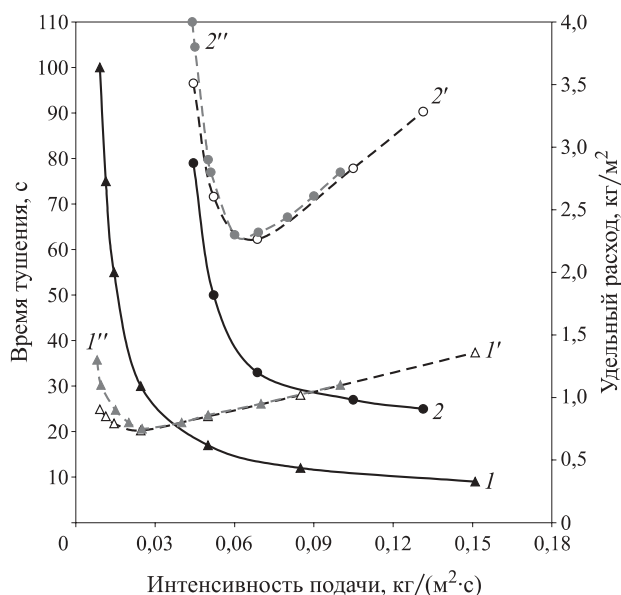


Рис. 7. Зависимость времени тушения бензина (I , 2) и удельного расхода (I' , I'' , $2'$, $2''$) пены низкой кратности, полученной из фторированного (I , I' , I'') и углеводородного (2 , $2'$, $2''$) пенообразователей: I , I' , 2 , $2'$ — эксперимент; I'' , $2''$ — расчет по формулам (7) и (8)

Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчета по типовым формулам (7) и (8) показало их удовлетворительное совпадение при тушении пламени пеной различной природы и при различных способах ее подачи.

Выводы

На основе анализа результатов экспериментов по тушению пламени горючих жидкостей предложена модель процесса тушения, которая включает локальное взаимодействие основания распыленной струи воды грубой и тонкой дисперсности, водных пленкообразующих растворов, химически активных хладонов, порошковых составов различной степени дисперсности, твердых аэрозолей с участком факела пламени и далее растекание флегматизированного слоя жидкости по горящей поверхности.

Показана возможность применения типовых расчетных соотношений для описания процесса тушения пламени как распыленными струями, так и пеной при подаче на горящую поверхность и в слой нефтепродукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корольченко Д. А. Универсальность механизмов тушения огнетушащими веществами // Техника и технология: новые перспективы развития. — 2015. — № XVIII. — С. 35–40.
2. Корольченко Д. А. Анализ двойственного механизма тушения пламени // Техника и технология: новые перспективы развития. — 2015. — № XVIII. — С. 28–34.
3. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П., Воевода С. С., Шароварников С. А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. — М.: Изд. дом “Калан”, 2002. — 448 с.
4. Кузнецов Г. В., Куйбин П. А., Стрижак П. А. Движение капель мелкодисперсной жидкости в потоке высокотемпературных газов // Теплофизика и аэромеханика. — 2014. — Т. 21, № 5. — С. 637–645.
5. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние начальных параметров распыленной воды на характеристики ее движения через встречный поток высокотемпературных газов // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, № 7. — С. 15–23.
6. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Heat balance of extinguishing process of flammable liquid by sprayed water // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 1070–1072. — P. 1794–1798. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1070-1072.1794.
7. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. — М.: Пожнаука, 2007. — 267 с.
8. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Особенности тушения пламени высокодисперсными газоаэрозольными системами // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 10. — С. 67–72.
9. Абдурагимов И. М., Говоров В. И., Макаров Е. В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. — М.: ВИПТШ МВД РФ, 1988. — 255 с.
10. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф., Дегаев Е. Н. Огнетушащая эффективность пены низкой кратности // Научное обозрение. — 2015. — № 8. — С. 114–120.
11. Шароварников А. Ф., Мельников А. И. Экспериментальные исследования огнетушащей способности водных пленкообразующих растворов фторированных поверхностно-активных веществ // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 9. — С. 74–81. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.74-81.
12. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф., Дегаев Е. Н. Лабораторная методика определения изолирующих свойств пены на поверхности гептана // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 4. — С. 72–76.
13. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф., Дегаев Е. Н., Власов Н. А., Мельников А. И. Тушение пламени горючих жидкостей химически активным ингибитором // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 11. — С. 70–76. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.70-76.

14. Корольченко Д. А., Дегаев Е. Н., Шароварников А. Ф. Горение гептана в модельном резервуаре // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 2. — С. 67–70.
15. Блинов В. И., Худяков Г. Н. Диффузионное горение жидкостей. — М. : АН СССР, 1961. — 208 с.
16. Петров И. И., Реутт В. Ч. Тушение пламени горючих жидкостей. — М. : Изд. МКХ РСФСР, 1961. — 143 с.
17. Cortina T. The safety & benefits of AFFF agents. Special analysis: Foam // Industrial Fire Journal. — June 2007. — No. 68. — P. 70–75.
18. Cortina T. The phaseout that didn't happen. AFFF foams move into the future // International Fire Protection. — May 2010. — P. 29–33.
19. Rasbash D. J. The extinction of fire with plain water: a review // Fire Safety Science. — 1986. — Vol. 1. — P. 1145–1163. DOI: 10.3801/iafss.fss.1-1145.
20. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 475–476. — P. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.

Материал поступил в редакцию 25 декабря 2015 г.

Для цитирования: Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Анализ типового соотношения для описания зависимости времени тушения горючих жидкостей и удельного расхода различных огнетушащих веществ от интенсивности их подачи // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 66–76. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76.

English

ANALYSIS OF A TYPICAL RELATION USED FOR DESCRIPTION OF DEPENDENCE OF THE EXTINGUISHING TIME OF FLAMMABLE LIQUIDS AND THE SPECIFIC CONSUMPTION OF VARIOUS EXTINGUISHING AGENTS ON THEIR FLOW RATE

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

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

On the basis of analysis of experimental data on extinguishing of flammable liquids it is offered the model of extinguishing process which includes local interaction of the base of dispersed stream with part of a flame jet and further spreading of extinguishing layer on the burning surface of oil product. The basis of analysis is a dual suppression mechanism of fire extinguishing agents. The dual suppression mechanism is universal and is especially strongly revealed during extinguishing of flammable liquids by dispersed streams of water and freon, by stream of powder and air, by foam giving into the bottom of burning tank with oil product. The dual mechanism is accompanied by fact that the stream of agent carries away atmospheric oxygen that sharply increases volume of flame jet at the initial stage of stream supplying. Taking into account action of inflow of additional air we can reveal the nature of extreme dependence of specific consumption on flow rate of extinguishing agent and existence of its optimal flow rate during fire extinguishing. Material balance of extinguishing process of hydrocarbon flame using method of covering of the burning surface by layer of fire extinguishing agent (FEA) is considered. As a result, it was defined that the thickness of layer in the place where stream falls onto the burning surface depends on flow rate of dispersed stream. Dependence of average thickness of extinguishing layer on flow rate of stream is offered. Based on the results of experiment, conducted on specific model of extinguishing of gasoline flame using water with

high dispersion degree, it was described dependence of specific consumption of FEA and extinguishing time on its flow rate. This allowed us to determine the optimal flow rate and the minimal specific consumption of dispersed water. The analysis of formulas, deduced during research, shows that multiplication of extinguishing time by corresponding value of flow rate of dispersed stream allow to obtain the extreme dependence of specific consumption of extinguishing agent on its flow rate. This effect was found in all experiments on fire extinguishing of hydrocarbons by dispersed water, dispersed freon or extinguishing powder. The analysis of extinguishing of gasoline flame by dispersed freon 114B2 and fire extinguishing powder is carried out. Process of extinguishing of a heptane flame by giving of foam onto the burning surface and into the layer of oil product is considered. It is shown that description of extinguishing process of diesel fuel due to giving of air into the bottom of tank reveal the reverse, as compared with dispersed water, situation. In case of application of dispersed water, extinguishing process is realized due to the steam layer which is formed as a result of evaporation of water drops. If extinguishing is realized due to the giving of air, its stream carries away the flow of liquid. As in the previous case, the initial value is a flow rate of air which carries out cold layers of oil product to the upper level. Suppression of flame will occur when the entire burning surface will be covered by hydrocarbon layer which temperature is lower than temperature of ignition. To describe the experimental results it is offered the formula which includes data of the process of fire extinguishing using foams formed from hydrocarbon agents and from fluorinated agents. Possibility of creation of the standard equation which describe dependence of specific consumption and extinguishing time on flow rate of extinguishing agents of different nature is shown. Possibility of determination of the optimal flow rate and the minimal specific consumption of fire extinguishing agent, irrespective of its nature, and possibility of application of the standard calculated ratio for description of the process of extinguishing as by dispersed streams, so by foam giving onto the burning surface and into the layer of oil product are shown.

Keywords: model of extinguishing process; specific consumption; extinguishing time; flow rate; fire extinguishing agents; mechanism of extinguishing.

REFERENCES

1. Korolchenko D. A. Universalnost mekhanizmov tusheniya ognetushashchimi veshchestvami [Universality of mechanisms of fire suppression by extinguishing agents]. *Tekhnika i tekhnologiya: novyye perspektivy razvitiya — Equipment and Technology: New Prospects of Development*, 2015, no. XVIII, pp. 35–40.
2. Korolchenko D. A. Analiz dvoystvennogo mekhanizma tusheniya plameni [Analysis of the dual fire suppression mechanism]. *Tekhnika i tekhnologiya: novyye perspektivy razvitiya — Equipment and Technology: New Prospects of Development*, 2015, no. XVIII, pp. 28–34.
3. Sharovarnikov A. F., Molchanov V. P., Voevoda S. S., Sharovarnikov S. A. *Tusheniye pozharov nefti i nefteproduktov* [Fire extinguishing of oil and oil products]. Moscow, Kalan Publ., 2002. 448 p.
4. Kuznetsov G. V., Kuibin P. A., Strizhak P. A. Motion of fine-spray liquid droplets in hot gas flow. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 609–616. DOI: 10.1134/s0869864314050096.
5. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 59, no. 7, pp. 959–967. DOI: 10.1134/s1063784214070263.
6. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Heat balance of extinguishing process of flammable liquid by sprayed water. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1070–1072, pp. 1794–1798. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1070-1072.1794.
7. Gorshkov V. I. *Tushenie plameni goryuchikh zhidkostey* [Extinguishing of combustible liquids' flame]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 267 p.
8. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Osobennosti tusheniya plameni vysokodispersnymi gazo-aero-zolnymi sistemami [Features of fire extinguishing by finely dispersed gas-aerosol systems]. *Pozharo-vzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 10, pp. 67–72.
9. Abduragimov I. M., Govorov V. I., Makarov Ye. V. *Fiziko-khimicheskiye osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physico-chemical basis of development and extinguishing of fires]. Moscow, High Engineering Fire Technical School of Ministry of the Interior of Russia Publ., 1988. 255 p.

10. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Degaev E. N. Ognetushashchaya effektivnost peny nizkoy kratnosti [Fire extinguishing effectiveness of low multiplicity foam]. *Nauchnoye obozreniye — Science Review*, 2015, no. 8, pp. 114–120.
11. Sharovarnikov A. F., Melnikov A. I. Eksperimentalnyye issledovaniya ognetushashchey sposobnosti vodnykh plenkoobrazuyushchikh rastvorov fluorirovannykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Experimental studies of fire extinguishing capacity of the water film forming solutions containing fluorinated surfactants]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 74–81. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.74-81.
12. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Degaev E. N. Laboratornaya metodika opredeleniya izoliruyushchikh svoystv peny na poverkhnosti heptana [Laboratory standard technique for insulating properties of foam on heptane surface]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 72–76.
13. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Degaev E. N., Vlasov N. A., Melnikov A. I. Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey khimicheski aktivnym ingibitorom [Suppression of a flame of combustible liquids by reaction inhibitor]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 11, pp. 70–76. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.70-76.
14. Korolchenko D. A., Degaev E. N., Sharovarnikov A. F. Goreniye heptana v modelnom rezervuare [Combustion of heptane in a model tank]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 2, pp. 67–70.
15. Blinov V. I., Khudyakov G. N. *Diffuzionnoye goreniye zhidkostey* [Diffusion burning of liquids]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 1961. 208 p.
16. Petrov I. I., Reutt V. Ch. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Suppression of combustible liquids flame]. Moscow, Ministry of Utilities Sector Publ., 1961. 143 p.
17. Cortina T. The safety & benefits of AFFF agents. Special analysis: Foam. *Industrial Fire Journal*, June 2007, no. 68, pp. 70–75.
18. Cortina T. The phaseout that didn't happen. AFFF foams move into the future. *International Fire Protection*, May 2010, pp. 29–33.
19. Rasbash D. J. The extinction of fire with plain water: a review. *Fire Safety Science*, 1986, vol. 1, pp. 1145–1163. DOI: 10.3801/iafss.fss.1-1145.
20. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 475–476, pp. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.

For citation: Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Analiz tipovogo sootnosheniya dlya opisaniya zavisimosti vremeni tusheniya goryuchikh zhidkostey i udelnogo raskhoda razlichnykh ognetushashchikh veshchestv ot intensivnosti ikh podachi [Analysis of a typical relation used for description of dependence of the extinguishing time of flammable liquids and the specific consumption of various extinguishing agents on their flow rate]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 66–76. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76.

**ВОПРОС:**

При выборе взрывозащищенного электрооборудования для объектов с пожаровзрывоопасными производствами необходимо учитывать класс взрывоопасной зоны, а также категорию и группу взрывоопасной смеси. Категория смеси зависит от величины безопасного экспериментального максимального зазора (БЭМЗ), которая варьируется в пределах от 0,5 до 1,0 мм и указывается в нормативных документах. Каким образом следует использовать значения БЭМЗ, приведенные в нормативных документах, при определении допустимых безопасных зазоров в конструкции взрывозащищенного электрооборудования?

ОТВЕТ:

В области обеспечения пожаровзрывобезопасности электроустановок важное место занимает правильная оценка характеристик горючих смесей, обращающихся в производстве. Одной из таких характеристик является категория взрывоопасной смеси. В гл. 7.3 Правил устройства электроустановок (ПУЭ) [1], в частности в табл. 7.3.1, указано, что для рудничного газа (метан) присваивается категория смеси I, а для промышленных газов и паров — категория II, подразделяемая на подкатегории IIA, IIB и IIC. Категория смеси является определяющей при выборе подгруппы взрывозащищенного электрооборудования (далее — *Ex*-оборудование). Главным критерием отнесения смеси к той или иной категории является безопасный экспериментальный максимальный зазор, а также минимальный воспламеняющий ток (МВТ). Значения БЭМЗ (для электрооборудования со взрывозащитой вида **d** — “взрывонепроницаемая оболочка”) и МВТ (для электрооборудования со взрывозащитой вида **i** — “искробезопасная электрическая цепь”) указаны в ГОСТ 30852.2–2002 [2], ГОСТ 30852.11–2002 [3] и ГОСТ Р МЭК 60079-20-1–2011 [4].

По ГОСТу [4] БЭМЗ (*MESG*) — максимальный зазор между двумя частями внутренней камеры, который при указанных испытательных условиях препятствует воспламенению смеси газа во внешней камере через дорожку воспламенения длиной 25 мм при воспламенении смеси во внутренней камере при любых концентрациях газа или пара в воздухе.

В ГОСТе [4] также указано, что МВТ (*MIC*) — минимальный ток в резистивных и индуктивных цепях, который вызывает воспламенение взрывоопасной испытательной смеси в искробразующем механизме согласно ГОСТ 30852.4–2002 [5].

В ГОСТах [2, 4] для определения БЭМЗ приводятся одинаковые методы испытаний с использованием идентичного экспериментального оборудования. Для испытаний применяется установка с двумя камерами — внутренней объемом 20 см³ и внешней — от 2,3 до 4,0 дм³. Внутренняя камера состоит из двух частей, зазор между которыми регулируется. С точки зрения механической прочности установка должна выдержи-

вать давление 1,5 МПа без значительного увеличения зазора. Измерения БЭМЗ проводят при давлении окружающей среды (1±0,01) кПа и ее температуре (20±5) °С.

При проведении испытаний наблюдение за воспламенением смеси во внутренней камере осуществляется через зазор. Если внутреннего воспламенения не происходит, то испытание считается недействительным. При воспламенении смеси во внешней камере видно, как пламя заполняет весь ее объем.

При заданной концентрации горючего пара или газа в воздухе проводят по два испытания на воспламенение смеси на каждом из зазоров в интервале между безопасным и опасным значениями зазоров с шагом 0,2 мм. На основании результатов определяют наибольший зазор, при котором вероятность воспламенения равна нулю, и наименьший зазор с вероятностью воспламенения 100 %. В заданном диапазоне концентраций смесей проводят серии испытаний для установления динамики изменения пределов максимальных и минимальных зазоров. Самой опасной смеси будет соответствовать минимальное значение зазора.

Испытания повторяют 10 раз для каждого установленного значения зазора при концентрации смеси, близкой к наиболее опасной по передаче взрыва, полученной при начальных испытаниях. При этом наибольшая разница между значениями максимальных и минимальных зазоров, полученная после серий испытаний, не должна превышать 0,04 мм.

Общий принцип ограничения распространения пламени по узким зазорам в конструкции оборудования заключается в том, что при очень малом объеме удельная площадь поверхности теплоотвода стенок (отношение площади стенок *S* к объему сосуда *V* (м⁻¹)) становится такой большой, что скорость выделения тепла за счет окисления горючей смеси при ее сжигании не может превысить скорость теплоотвода, поэтому дальнейшего распространения пламени не происходит.

В ГОСТах [2–5] испытания проводятся с помощью конкретных установок, имеющих определенные характеристики (размеры, форму зазоров, конструктивные материалы и т. д.), от которых во многом зависят конечные значения как БЭМЗ, так и МВТ. Для фактического испытуемого *Ex*-оборудования, имеющего иные характеристики, значения БЭМЗ и МВТ могут отличаться от указанных в нормативной литературе. Это значит, что для оценки группы (подгруппы) *Ex*-оборудования недостаточно выполнить зазоры, установленные стандартами для различных категорий смесей.

Для *Ex*-оборудования установлен собственный перечень испытаний на конкретный вид (**d, i, q, o, p, m, e, n, s**) в соответствии с отдельными частями серии ГОСТ ИЕС (Р МЭК) 60079. С учетом того что при испытаниях закладываются коэффициенты безопасности для подгрупп оборудования, нельзя говорить о том, что указанная в маркировке подгруппа (I, IIA, IIB, IIC) будет обеспечи-

вать безопасность работы оборудования для всех смесей, имеющих соответствующую подгруппу категории (I, IIA, IIB, IIC). Если условия технологического процесса как внутри, так и снаружи оборудования отличаются от установленных в стандартах, то необходимо проводить дополнительные испытания оборудования с целью проверки его соответствия категории смеси в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, при определении категории взрывоопасной смеси и группы (подгруппы) Ех-оборудования нельзя опираться только на данные, приведенные в стандартах. На практике при выборе безопасного электрооборудования в первую очередь следует руководствоваться особенностями технологического процесса и условиями обращения в производстве горючих смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. — 6-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 640 с.
2. ГОСТ 30852.2-2002 (МЭК 60079-1А:1975). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 1. Взрывозащи-

та вида “взрывонепроницаемая оболочка”. Дополнение 1. Приложение D. Метод определения безопасного максимального зазора. — Введ. 15.02.2014. — М. : Стандартинформ, 2014.

3. ГОСТ 30852.11-2002 (МЭК 60079-12:1978). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 12. Классификация смесей газов и паров с воздухом по безопасным экспериментальным максимальным зазорам и минимальным воспламеняющим токам. — Введ. 15.02.2014. — М. : Стандартинформ, 2014.

4. ГОСТ Р МЭК 60079-20-1-2011. Взрывоопасные среды. Часть 0. Оборудование. Общие требования. — Введ. 01.07.2012. — М. : Стандартинформ, 2012.

5. ГОСТ 30852.4-2002 (МЭК 60079-3:1990). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 3. Искрообразующие механизмы для испытаний электрических цепей на искробезопасность. — Введ. 15.02.2014. — М. : Стандартинформ, 2014.

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



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу



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

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

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

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

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

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал “ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ” статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов, проблемные обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т. п. Методы расчета и экспериментальные данные, полученные автором, должны быть оформлены в соответствии с рекомендациями КОДАТА. Остальные численные данные, за исключением общеизвестных величин, следует снабжать ссылками на первоисточник. Научные статьи должны иметь практическую направленность. В начале работы (например, во введении) целесообразно кратко изложить состояние проблемы и место в ней данной задачи. В конце публикации должны быть сделаны краткие выводы с указанием научной новизны и практической полезности материала.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены в редакцию в электронном виде по электронному адресу (info@fire-smi.ru), а также в бумажном виде по почте (121352, Российская Федерация, г. Москва, а/я 43). Статья должна быть ясно изложена, тщательно отредактирована и подписана всеми авторами.

2. Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустимы транслитерации с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

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

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

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, индекс, страну, город, название улицы, номер дома, а также контактные телефоны и электронный адрес всех или хотя бы одного из авторов. При этом не следует приводить составные части названий организаций, обозначающие принадлежность ведомству, форму собственности, статус организации (например, “Учреждение Российской академии наук...”, “Федеральное государственное унитарное предприятие...”, “ФГОУ ВПО...” и т. п.), что затрудняет идентификацию организации. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

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

2.4. Аннотация на русском языке (не менее 5–7 предложений).

2.5. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторские резюме на английском

языке в русскоязычном издании являются для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- оригинальным (не быть калькой с русскоязычной аннотации с дословным переводом);
- содержательным (отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т. е. следовать логике описания результатов в публикации);
- “англоязычным” (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объем текста авторского резюме должен быть не менее 250–300 слов.

Рекомендуется структура резюме, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). Однако предмет, тема, цель работы указываются в том случае, если они неясны из заглавия статьи. Метод или методологию проведения работы целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной или представляют интерес с точки зрения данной работы.

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать один из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общеупотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом употреблении в авторском резюме.

В авторское резюме не рекомендуется включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

2.6. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или словосочетаний). Указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т. п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации.

2.7. Текст статьи должен быть ясным, лаконичным и структурированным. Редакция рекомендует деление текста на традици-

онные для научной статьи разделы: введение (актуальность, состояние вопроса), цели и задачи, материалы и методы, результаты и их обсуждение, заключение (выводы). Редакция допускает и иную структуру соответственно специфике конкретной статьи при условии четкого наименования разделов.

Текст должен быть набран через 1,5 интервала и предоставляться в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и др., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.п.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ.

Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений представляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо напечатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций не приемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

2.8. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Список литературы должен содержать не менее 10 источников (не включая в это число нормативные документы, патенты и т. п.), в том числе не менее 3 иностранных. Выполнение данного требования будет свидетельствовать о том, что авторы используют предыдущие научные достижения в необходимой мере.

Не менее половины источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс науч-

ного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее 5 современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы не должно быть более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

2.9. References (пристайные списки литературы в транслитерации (на латинице) и на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо.

При переводе русскоязычного источника (книги, монографии, диссертации, электронного ресурса и пр.) приводится транслитерация фамилий и инициалов авторов, транслитерация названия источника и в квадратных скобках его перевод на английский язык, год, место издания, название издательства, количество страниц. Место издания должно быть указано на английском языке (Moscow, Saint Petersburg и т. п.). Транслитерированное название издания выделяется курсивом.

Если приводится русскоязычная статья в журнале, то, помимо транслитерации названия статьи и его перевода на английский язык, указанного в квадратных скобках, необходимо дать официальную английскую версию названия журнала (перевод обычно есть на сайте журнала). Если ее нет, то приводится обычная транслитерация. Указывается также год издания, том, номер выпуска, страницы статьи. Название издания выделяется курсивом.

Примеры описаний в References можно найти на сайте издательства (www.fire-smi.ru).

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

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

5. Не допускается направление в редакцию работ, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

ISSN 0869-7493

Открыта
подписка
на журнал

2016

ПОЖАРОВЗРЫВО- БЕЗОПАСНОСТЬ



По вопросам подписки
просьба обращаться
по тел.: (495) 228-09-03,
8-909-940-01-85 или
по e-mail info@fire-smi.ru

При оформлении подписки
через редакцию —
электронная версия
журнала в подарок!

- Стоимость подписки
на 1-е полугодие 2016 г.
(6 номеров) — 5700 руб.
- Стоимость годовой подписки
(12 номеров) — 11400 руб.

ПОДПИСКА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ:

- через ООО “Издательство “Пожнаука”;
- через агентство “РОСПЕЧАТЬ”,
индекс 81913 (полугодовой), 70753 (годовой);
- через агентство “АПР”,
индекс 83647 (полугодовой), 90121 (годовой)
(в любом почтовом отделении в каталоге
“Газеты и журналы”);
- через подписные агентства:
ООО “Урал-Пресс”, ООО “Информнаука”.



ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Московский государственный
строительный университет

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21AM09 от 24.06.2014 г.



Научно-исследовательские
и сертификационные
испытания:

- ♦ строительных материалов;
- ♦ строительных конструкций;
- ♦ огнезащитных составов;
- ♦ кабельных изделий;
- ♦ пенообразователей;
- ♦ фасадных систем.

Контакты:

Тел.: (495) 662-69-70

e-mail: ikbs@mgsu.ru

www.ikbs-mgsu.ru