

**С. В. ПУЗАЧ**, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: puzachsv@mail.ru)

**НГҮЕН ТАТ ДАТ**, аспирант кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: nguyentatdat1308@gmail.com)

УДК 614.841

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ КОНЦЕНТРАЦИЙ МОНОКСИДА УГЛЕРОДА И ПОКАЗАТЕЛЯ ТОКСИЧНОСТИ ПРИ ПОЖАРЕ В УСЛОВНО ГЕРМЕТИЧНОМ ПОМЕЩЕНИИ

Предложен новый теоретико-экспериментальный подход к расчету концентраций токсичных газов и показателя токсичности при пожаре в помещении на примере моноксида углерода. Предложены формулы для расчета среднеобъемной плотности CO и показателя токсичности по совместному влиянию концентраций CO и O<sub>2</sub>. Обнаружено, что зависимости среднеобъемной плотности CO моноксида углерода и показателя токсичности от среднеобъемной плотности кислорода не содержат геометрических размеров помещения и поверхностей горючих материалов и, следовательно, являются справедливыми в условиях как мелкомасштабного, так и крупномасштабного пожара. Получены экспериментальные зависимости среднеобъемной плотности моноксида углерода и показателя токсичности от среднеобъемной плотности кислорода в мелкомасштабной экспериментальной установке. Показано, что среднеобъемная плотность моноксида углерода и показатель токсичности по совместному воздействию CO и O<sub>2</sub> при горении твердых и жидкых веществ и материалов в условно герметичном объеме произвольных размеров могут быть рассчитаны с использованием только среднеобъемной плотности кислорода, а также удельных коэффициентов выделения CO и поглощения O<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** пожар; моделирование; интегральная модель; моноксид углерода; кислород; показатель токсичности.

**DOI:** 10.18322/PVB.2017.26.02.36-43

### Введение

По статистике более чем в 80 % случаев пожаров причиной смерти людей является отравление продуктами горения [1–3], поэтому математическое моделирование распространения токсичных продуктов горения при пожаре представляет собой актуальную задачу [4, 5].

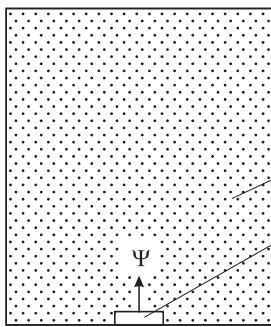
В настоящее время математические модели расчета динамики опасных факторов пожара в помещении, в том числе концентраций токсичных продуктов горения, получили достаточно широкое применение для решения практических задач пожарной безопасности, в частности расчета величины пожарных рисков [5–9].

Исходные данные по выделению токсичных продуктов горения представлены, например, в работах [10] и [4]. Удельные коэффициенты выделения токсичных газов приняты постоянными, не зависящими от термогазодинамической картины развития пожара (концентрации кислорода, температуры и т. д.).

Однако в работах [11, 12] показано, что удельные коэффициенты выделения CO значительно изменяются в зависимости от времени с начала горения, и их средние значения существенно зависят от периода осреднения по времени испытаний. Здесь же предложен новый подход к расчету концентраций токсичных продуктов горения, который заключается в определении среднеобъемных плотностей токсичных газов в каждый момент времени по их экспериментальным зависимостям от среднеобъемной температуры, полученным в разработанной экспериментальной установке. При этом отпадает необходимость в решении дифференциальных уравнений законов сохранения масс токсичных газов и, следовательно, в определении удельных коэффициентов выделения газов.

Точность предложенного в [11, 12] подхода в значительной степени зависит от погрешности определения коэффициента теплопотерь в экспериментальной мелкомасштабной установке и реальном полномасштабном помещении.

© Пузач С. В., Нгuyen Tat Dat, 2017



**Рис. 1.** Схема тепломассообмена в условно герметичном мелкомасштабном объеме: 1 — ограждающие конструкции; 2 — горючий материал; 3 — смесь продуктов горения и воздуха;  $\Psi$  — массовая скорость газификации горючего материала

В настоящей работе с использованием экспериментальных данных, полученных на мелкомасштабной установке [11, 12], предложен другой подход, основанный на применении теоретических и экспериментальных зависимостей среднеобъемных плотностей токсичных газов от среднеобъемной плотности кислорода. При этом отсутствует необходимость в определении коэффициента теплопотерь и решении дифференциальных уравнений законов сохранения масс токсичных газов.

### Постановка задачи

Рассмотрим процесс горения в условно герметичном мелкомасштабном объеме (рис. 1). В качестве токсичного газа будем рассматривать моноксид углерода.

Необходимо получить экспериментальные и теоретические зависимости среднеобъемной плотности моноксида углерода и показателя токсичности от среднеобъемной плотности кислорода в рассматриваемой мелкомасштабной экспериментальной установке.

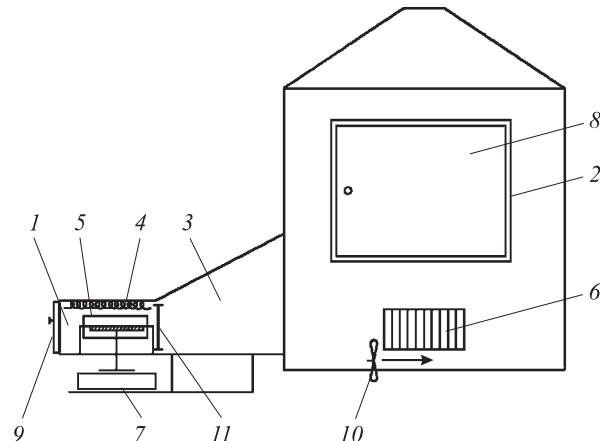
### Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Схема экспериментальной установки, приведенной в работах [11, 12], представлена на рис. 2.

Камера сгорания 1 соединена с экспозиционной камерой 2 переходным рукавом 3, оснащенным устройством теплового блокирования. В камере сгорания установлен экранированный электронагревательный излучатель 4 и держатель образца 5 на подвижной основе.

Камера сгорания объемом  $3 \times 10^{-3} \text{ м}^3$  выполнена из листовой нержавеющей стали толщиной  $(2,0 \pm 0,1) \text{ мм}$ . На боковой стенке камеры имеется окно из кварцевого стекла для наблюдения за образцом при испытаниях, а также шиберные отверстия 6 для изменения режимов испытания.

Экспозиционная камера представляет собой кубический объем ( $0,5887 \text{ м}^3$ ) с конусообразной верхней частью и шиберными отверстиями на двух боковых стенках.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки: 1 — камера сгорания; 2 — экспозиционная камера; 3 — переходной рукав; 4 — электронагревательный излучатель; 5 — держатель образца; 6 — шиберные отверстия; 7 — столик с весами; 8 — дверца экспозиционной камеры; 9 — дверца камеры сгорания; 10 — вентилятор; 11 — заслонка (перегородка) переходного рукава

Держатель образцов размещен на электронных весах с погрешностью не более  $\pm 1 \text{ mg}$ , расположенных на специальном подвижном столе 7.

Для непрерывного контроля температуры в экспозиционной камере использовались 32 низкоинерционные бронированные термопары с диапазоном измерений от минус 40 до  $+1100^\circ\text{C}$  с погрешностью не более  $\pm 1,5t$  ( $^\circ\text{C}$ ).

Для контроля плотности теплового потока, падающего на испытуемый образец, используется водоохлаждаемый датчик типа Гордона и регистрирующий прибор с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ. Погрешность измерения плотности теплового потока не превышает  $\pm 8 \%$ .

Для непрерывного контроля состава газовоздушной среды в экспозиционной камере используется многоканальный газоанализатор, измеряющий с допустимой погрешностью  $\pm 10 \%$  концентрацию оксида углерода в диапазоне от 0 до 1 % об., диоксида углерода — от 0 до 5 % об., кислорода — от 0 до 21 % об.

Горючие материалы испытывали в режиме пламенного горения, который обеспечивался при температуре испытания  $750^\circ\text{C}$  и плотности падающего теплового потока  $60 \text{ кВт}/\text{м}^2$ .

Предварительно взвешенный образец материала, имеющий комнатную температуру, помещали в держатель образца (вкладыш). С момента выхода электронагревательного излучателя на стабилизированный режим открывали заслонку переходного рукава и дверцу камеры сгорания. Вкладыш с образцом без задержки помещали в держатель образца, после чего дверцу камеры сгорания закрывали.

В процессе испытаний в режиме постоянного мониторинга фиксировали показания концентраций CO (% об.), CO<sub>2</sub> (% об.), O<sub>2</sub> (% об.), температуры и изменение (потери) массы образца.

### Зависимость плотности моноксида углерода от температуры

В работах [11, 12] показано, что среднеобъемная плотность CO может быть описана зависимостью

$$\rho_{\text{CO}} = \rho^* L_{\text{CO}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{CO}}$  — среднеобъемная плотность CO, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho^*$  — характерная плотность, зависящая только от схемы термогазодинамической картины пожара, теплофизических параметров пожара и горючего материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho^* = K/Q_{\text{h}}^{\text{p}}$ ;

$K$  — коэффициент пропорциональности между среднеобъемной плотностью токсичного газа и отношением  $L_{\text{CO}}/Q_{\text{h}}^{\text{p}}$ , Дж/м<sup>3</sup>;  $K = f(T_{\text{cp}}, T_{\text{v}}, \varphi)$ ;  $T_{\text{cp}}$  — среднеобъемная температура газовой среды, К;

$T_{\text{v}}$  — температура воздуха в помещении, К;  $\varphi$  — коэффициент теплопотерь, равный доле теплоты, выделившейся в очаге горения и поступающей в ограждающие конструкции помещения из всего его объема;

$L_{\text{CO}}$  — удельный коэффициент выделения моноксида углерода [9];

$Q_{\text{h}}^{\text{p}}$  — низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг.

Для рассматриваемой схемы пожара [13]

$$K = \frac{2,5 \cdot 10^5}{1 - \varphi} \frac{T_{\text{cp}} - T_{\text{v}}}{T_{\text{v}}}. \quad (2)$$

Формула (1), выражающая зависимость среднеобъемной плотности CO от среднеобъемной температуры, не содержит геометрических размеров помещения и поверхностей горючих материалов и, следовательно, является справедливой в условиях как мелкомасштабного, так и крупномасштабного пожара в помещении. Этот вывод экспериментально подтвержден в работе [12] путем сопоставления результатов расчетов среднеобъемной плотности моноксида углерода, полученных для полномасштабного помещения с использованием аналитического решения интегральной модели и полной системы уравнений зонной математической модели, с экспериментальными данными по проточной схеме термогазодинамики пожара [12].

К основному недостатку такого подхода относится высокая погрешность определения коэффициента теплопотерь в экспериментальной мелкомасштабной установке и реальном полномасштабном помещении.

### Зависимость плотности моноксида углерода от плотности кислорода

Дифференциальное уравнение закона сохранения массы оксида углерода имеет вид [10]:

$$V \frac{d\rho_{\text{CO}}}{dt} = \eta L_{\text{CO}} \Psi, \quad (3)$$

где  $V$  — внутренний объем установки, м<sup>3</sup>;

$t$  — время, с;

$\eta$  — коэффициент полноты сгорания;

$\Psi$  — массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с.

Удельный коэффициент выделения моноксида углерода в экспериментальной установке в каждый момент времени определяется из формулы (3):

$$L_{\text{CO}} = \frac{V}{\eta \Psi} \frac{d\rho_{\text{CO}}}{dt}. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение закона сохранения массы кислорода [10] имеет вид:

$$V \frac{d\rho_{\text{O}_2}}{dt} = -\eta L_{\text{O}_2} \Psi, \quad (5)$$

где  $\rho_{\text{O}_2}$  — среднеобъемная плотность кислорода, кг/м<sup>3</sup>;

$L_{\text{O}_2}$  — удельный коэффициент поглощения кислорода.

Удельный коэффициент поглощения кислорода в экспериментальной установке рассчитывается с использованием выражения (5):

$$L_{\text{O}_2} = \left| \frac{V}{\eta \Psi} \frac{d\rho_{\text{O}_2}}{dt} \right|. \quad (6)$$

Зависимость плотности моноксида углерода от плотности кислорода в каждый момент времени от начала горения может быть получена из совместного интегрирования уравнений (3) и (5) от  $t = 0$  до рассматриваемого момента времени  $t$ :

$$\rho_{\text{CO}} = L_{\text{CO}} / L_{\text{O}_2} (\rho_{\text{O}_{2\text{в}}} - \rho_{\text{O}_2}), \quad (7)$$

где  $\rho_{\text{O}_{2\text{в}}}$  — плотность кислорода в атмосферном воздухе, кг/м<sup>3</sup>.

Из выражения (7) видно, что для расчета плотности CO необходимо использовать значения плотности кислорода и удельных коэффициентов поглощения O<sub>2</sub> и выделения CO.

Основным достоинством предложенной формулы (7) по сравнению с выражением (1) является отсутствие необходимости экспериментального или теоретического определения коэффициента теплопотерь  $\varphi$ .

### Показатель токсичности

Будем рассматривать показатель токсичности  $H_t$  по совместному влиянию концентраций CO и O<sub>2</sub>. В соответствии с работами [2, 13] можно записать:

$$H_t = \frac{\rho_{CO}}{\rho_{CO_{kp}}} + \frac{\rho_{O_2} - \rho_{O_2}}{\rho_{O_2} - \rho_{O_2_{kp}}}, \quad (8)$$

где  $\rho_{CO_{kp}}$  — предельно допустимая для человека (критическая) плотность моноксида углерода, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{O_2_{kp}}$  — предельно допустимая для человека (критическая) плотность кислорода, кг/м<sup>3</sup>.

Критическое значение показателя токсичности больше единицы и требует обоснования [2, 13].

Используя формулу (7), выражение (8) можно представить в виде зависимости показателя  $H_t$  только от плотности кислорода:

$$H_t = (\rho_{O_2} - \rho_{O_2}) \left( \frac{L_{CO}}{L_{O_2}} \frac{1}{\rho_{CO_{kp}}} + \frac{1}{\rho_{O_2} - \rho_{O_2_{kp}}} \right) \quad (9)$$

или

$$H_t = H_{t,CO} + H_{t,O_2}, \quad (10)$$

где  $H_{t,CO}$  — показатель токсичности по воздействию моноксида углерода;  $H_{t,CO} = \frac{L_{CO}}{L_{O_2}} \frac{\rho_{O_2} - \rho_{O_2}}{\rho_{CO_{kp}}}$ ;

$H_{t,O_2}$  — показатель токсичности по воздействию кислорода;  $H_{t,O_2} = \frac{\rho_{O_2} - \rho_{O_2}}{\rho_{O_2} - \rho_{O_2_{kp}}}$ .

### Исходные данные

Рассматриваются следующие горючие материалы [10]:

а) твердая горючая нагрузка:

— хвойные древесные стройматериалы:  $Q_h^p = 13,8 \text{ МДж/кг}$ ,  $\Psi_{ud} = 0,0063 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ ,  $L_{CO} = 0,024$ ;  $L_{O_2} = 1,15$ ;

— оболочка кабелей ПВХ:  $Q_h^p = 25 \text{ МДж/кг}$ ,  $\Psi_{ud} = 0,0244 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ ,  $L_{CO} = 0,109$ ;  $L_{O_2} = 2,19$ ;

б) жидккая горючая нагрузка — масло трансформаторное:  $Q_h^p = 41,9 \text{ МДж/кг}$ ,  $\Psi_{ud} = 0,03 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ ,  $L_{CO} = 0,122$ ;  $L_{O_2} = 2,82$ ;

где  $\Psi_{ud}$  — удельная массовая скорость выгорания горючего материала, кг/(м<sup>2</sup>·с).

В соответствии с работой [10] предельно допустимые (критические) значения плотности составляют:  $\rho_{CO_{kp}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{O_2_{kp}} = 0,226 \text{ кг/м}^3$ .

Значения  $L_{CO}$  определялись также по результатам экспериментов осреднением по времени выражения (4).

### Результаты численных и натурных экспериментов и их анализ

Эксперименты осуществлялись до температур газовой смеси внутри помещений, не превыша-

### Результаты экспериментов

Горючий материал	Условия проведения эксперимента	Среднее значение $L_{CO}$	$L_{CO}$ [9]	Газ*	$H_{t,kp}$
Хвойные древесные стройматериалы	$F = 0,0072 \text{ м}^2$	0,024	0,024	CO	1,90
	$F = 0,0145 \text{ м}^2$	0,011		O <sub>2</sub>	1,29
Оболочка кабелей ПВХ	$F = 0,0067 \text{ м}^2$	0,100	0,109	CO	1,54
	$F = 0,0122 \text{ м}^2$	0,096		CO	1,65
Масло трансформаторное	$F = 0,01 \text{ м}^2$	0,056	0,122	CO	1,93
	$\delta = 1,15 \text{ мм}$				
	$F = 0,01 \text{ м}^2$	0,020		O <sub>2</sub>	1,57
	$\delta = 7,3 \text{ мм}$				

\* Газ, плотность которого раньше другого газа достигла критического значения.

Примечание.  $F$  — площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>;  $\delta$  — толщина слоя трансформаторного масла в кювете, мм;  $H_{t,kp}$  — критическое значение показателя токсичности, при котором плотность CO или O<sub>2</sub> достигает критической величины.

ющих критического для человека значения, равного 70 °C [10].

Средние по времени проведения экспериментов значения  $L_{CO}$  представлены в таблице.

Зависимости среднеобъемной плотности моноксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода представлены на рис. 3 для случая горения хвойных древесных стройматериалов, на рис. 4 — трансформаторного масла и на рис. 5 — оболочки кабелей ПВХ.

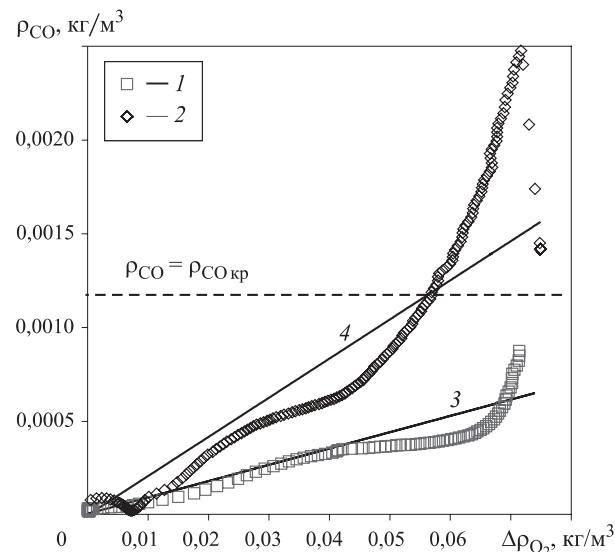
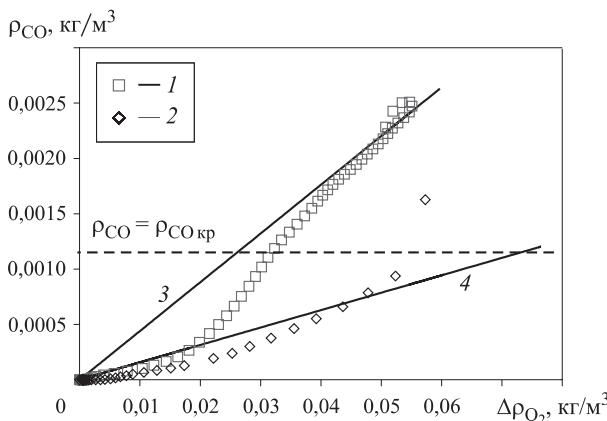
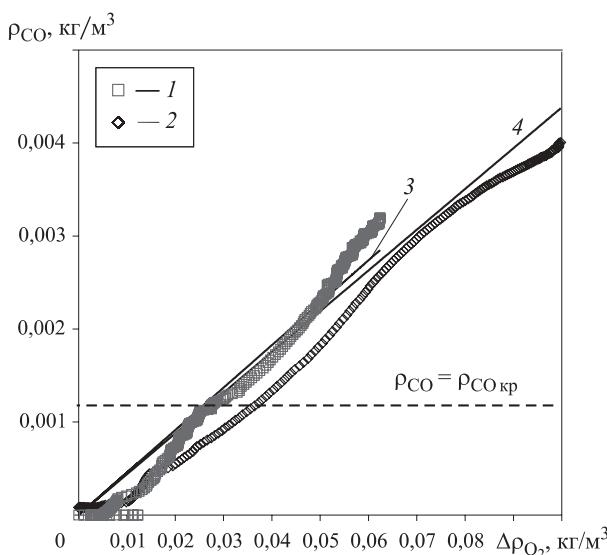


Рис. 3. Зависимости среднеобъемной плотности оксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода при горении хвойных древесных стройматериалов, полученные экспериментально (1, 2) и расчетом по формуле (7) (3, 4): 1, 3 —  $F = 0,0145 \text{ м}^2$ ; 2, 4 —  $F = 0,0072 \text{ м}^2$



**Рис. 4.** Зависимости среднеобъемной плотности оксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода  $\Delta\rho_{\text{O}_2}$  при горении трансформаторного масла на площади  $F = 0,01 \text{ м}^2$ , полученные экспериментально (1, 2) и расчетом по формуле (7) (3, 4): 1, 3 —  $\delta = 1,15 \text{ мм}$ ; 2, 4 —  $\delta = 7,3 \text{ мм}$

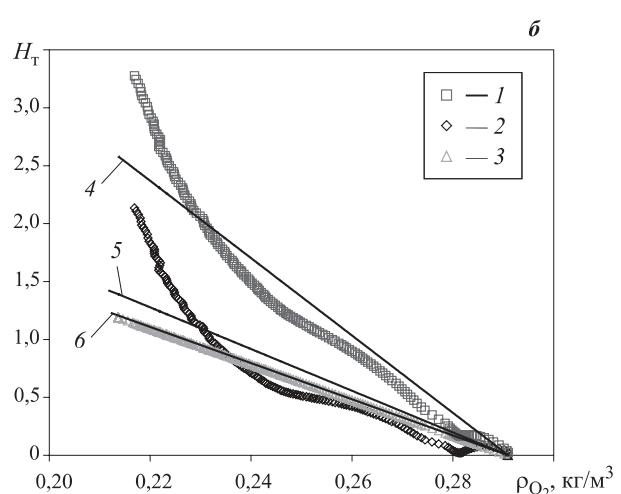
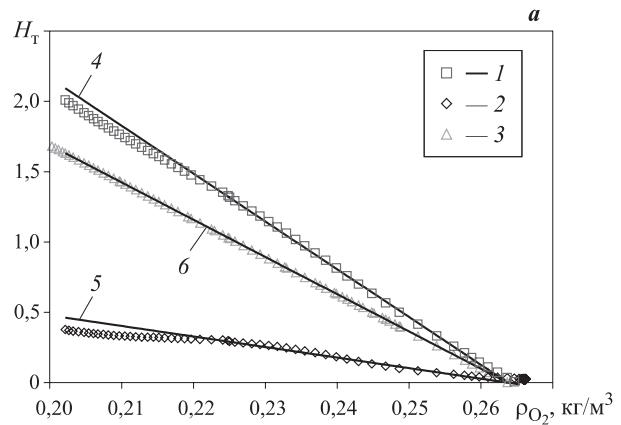


**Рис. 5.** Зависимости среднеобъемной плотности оксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода  $\Delta\rho_{\text{O}_2}$  при горении оболочки кабелей ПВХ, полученные экспериментально (1, 2) и расчетом по формуле (7) (3, 4): 1, 3 —  $F = 0,0067 \text{ м}^2$ ; 2, 4 —  $F = 0,0122 \text{ м}$

Из рис. 3–5 видно, что теоретические значения среднеобъемной плотности СО, полученные с использованием выражения (7) и экспериментальных средних значений  $L_{\text{CO}}$ , достаточно точно для инженерного метода расчета совпадают с экспериментальными данными для всех рассматриваемых горючих материалов.

Зависимости показателя токсичности от среднеобъемной плотности кислорода при горении хвойных древесных стройматериалов приведены на рис. 6, трансформаторного масла — на рис. 7, оболочки кабелей ПВХ — на рис. 8.

Из рис. 6–8 видно, что теоретические значения показателей токсичности  $H_t$ ,  $H_{t\text{CO}}$  и  $H_{t\text{O}_2}$ , получен-



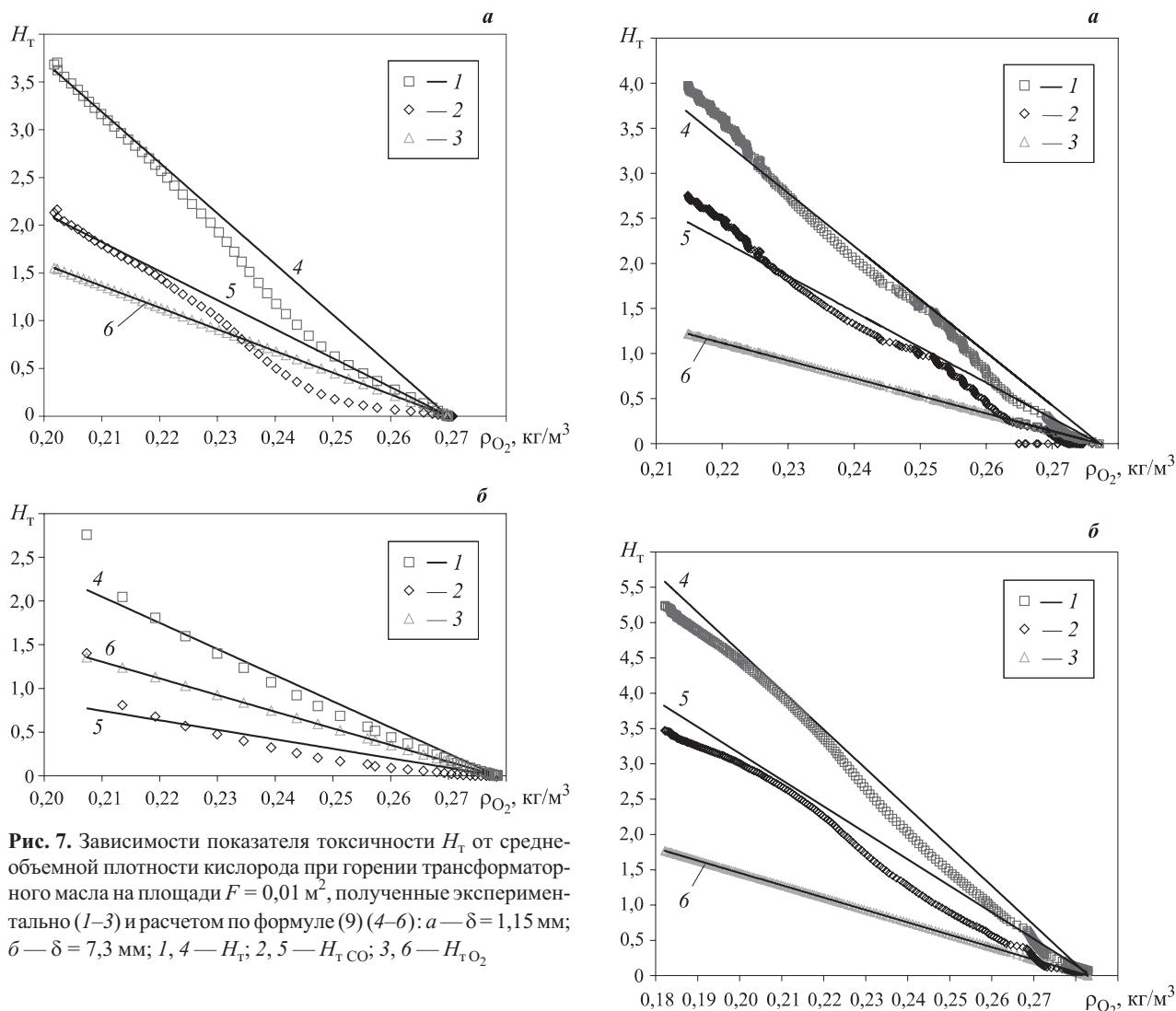
**Рис. 6.** Зависимости показателя токсичности  $H_t$  от среднеобъемной плотности кислорода при горении хвойных древесных стройматериалов на площади  $F = 0,0145 \text{ м}^2$  (a) и  $F = 0,0072 \text{ м}^2$  (б), полученные экспериментально (1–3) и расчетом по формуле (9) (4–6): 1, 4 —  $H_t$ ; 2, 5 —  $H_{t\text{CO}}$ ; 3, 6 —  $H_{t\text{O}_2}$

ные с использованием формулы (10) и экспериментальных средних значений  $L_{\text{CO}}$ , достаточно точно совпадают с соответствующими экспериментальными данными для случаев горения всех рассматриваемых материалов.

Теоретические значения  $\rho_{\text{CO}}$ ,  $H_t$ ,  $H_{t\text{CO}}$  и  $H_{t\text{O}_2}$  в начале процесса горения больше соответствующих экспериментальных значений (см. рис. 3–8), так как в расчетах по формулам (7) и (9) используется среднее значение коэффициента  $L_{\text{CO}}$ , а его локальное значение меньше среднего при плотности кислорода, близкой к его плотности в атмосферном воздухе [11, 12]. Таким образом, расчет с использованием выражений (7) и (9) дает некоторый запас по надежности оценки времени блокирования путей эвакуации моноксидом углерода.

Критические значения показателя токсичности, полученные в экспериментах, приведены в таблице.

Для рассматриваемых условий проведения экспериментов критическое значение показателя токсичности  $H_{t\text{кр}}$  находится в диапазоне от 1,29 до 1,93.

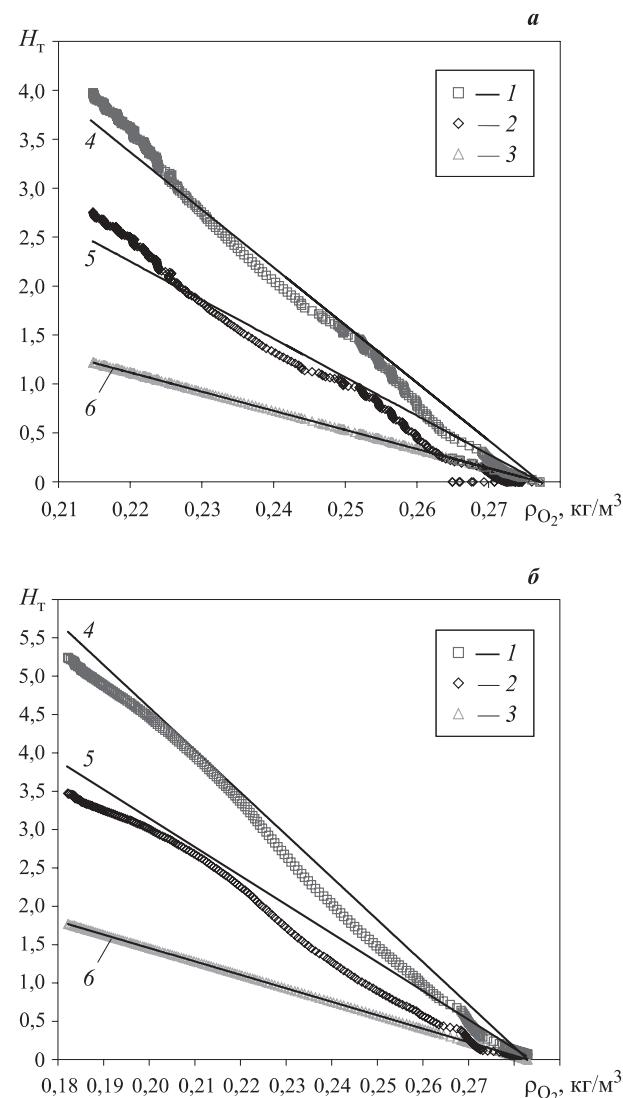


**Рис. 7.** Зависимости показателя токсичности  $H_T$  от среднеобъемной плотности кислорода при горении трансформаторного масла на площади  $F = 0,01 \text{ м}^2$ , полученные экспериментально (1–3) и расчетом по формуле (9) (4–6): *a* —  $\delta = 1,15 \text{ мм}$ ; *б* —  $\delta = 7,3 \text{ мм}$ ; 1, 4 —  $H_T$ ; 2, 5 —  $H_{CO}$ ; 3, 6 —  $H_{O_2}$

### Заключение

Среднеобъемная плотность моноксида углерода и показатель токсичности по совместному воздействию CO и O<sub>2</sub> при горении твердых и жидкого веществ и материалов в условно герметичном объеме произвольных размеров могут быть рассчитаны с использованием только среднеобъемной плотности кислорода, а также удельных коэффициентов выделения моноксида углерода и поглощения кислорода.

Предложенная математическая модель позволяет проводить расчет динамики изменения среднеобъемной плотности CO при пожаре в реальном



**Рис. 8.** Зависимости показателя токсичности  $H_T$  от среднеобъемной плотности кислорода при горении оболочки кабелей ПВХ на площади  $F = 0,0067 \text{ м}^2$  (*а*) и  $F = 0,0122 \text{ м}^2$  (*б*), полученные экспериментально (1–3) и расчетом по формуле (9) (4–6): 1, 4 —  $H_T$ ; 2, 5 —  $H_{CO}$ ; 3, 6 —  $H_{O_2}$

полномасштабном помещении без решения дифференциального уравнения закона сохранения массы моноксида углерода, а с использованием экспериментальной зависимости плотности CO от плотности O<sub>2</sub> и расчетных значений среднеобъемной плотности O<sub>2</sub>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецников И. Л. Судебно-медицинская оценка содержания цианидов в органах и тканях людей, погибших в условиях пожара : автореф. дис. ... канд. мед. наук. — СПб., 1996. — 24 с.
2. Иличкин В. С. Токсичность продуктов горения полимерных материалов: принципы и методы определения. — СПб. : Химия, 1993. — 136 с.
3. NFPA 269. Standard test method for developing toxic potency data for use in fire hazard modeling. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2016. — 29 p.
4. Пузач С. В., Смагин А. В., Лебедченко О. С., Абакумов Е. С. Новые представления о расчете необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2007. — 222 с.

5. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. — М. : МЧС России, 2009. — 45 с.
6. NFPA 92B. Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2014.
7. McGrattan K., Klein B., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics Simulator (Version 6). NIST Special Publication 1018. — Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2013. — 149 p.
8. Welch S., Rubini P. SOFIE: Simulation of fires in enclosures. User guide. — United Kingdom, Cranfield : Cranfield University, 1996. — 340 p.
9. Tanaka T., Yamada S. BRI2002: Two layer zone smoke transport model — Chapter 1. Outline of the model // Fire Science and Technology. — 2004. — Vol. 23, No. 1. — P. 1–44. DOI: 10.3210/fst.23.1.
10. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. — М. : Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
11. Пузач С. В., Сулейкин Е. В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 2. — С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
12. Пузач С. В., Акперов Р. Г. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования моноксида углерода при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 5. — С. 18–25. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25.
13. Пузач С. В., Пузач В. Г., Доан В. М. К определению показателя токсичности продуктов горения горючих веществ и материалов в помещении // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 4. — С. 4–13.

*Материал поступил в редакцию 5 декабря 2016 г.*

**Для цитирования:** Пузач С. В., Нгуен Тат Дат. Экспериментально-теоретический подход к расчету концентраций моноксида углерода и показателя токсичности при пожаре в условно герметичном помещении // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 2. — С. 36–43. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.36-43.

English

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL APPROACH FOR CALCULATION OF CARBON MONOXIDE CONCENTRATION AND TOXICITY INDEX DURING FIRE IN CONVENTIONALLY HERMETIC ROOM

**PUZACH S. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: puzachsv@mail.ru)

**NGUYEN TAT DAT**, Postgraduated Student, Thermal Physics and Hydraulic Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: nguyentatdat1308@gmail.com)

### ABSTRACT

**Introduction.** In previous works, the authors proposed a new approach to the calculation of the concentration of toxic products of combustion. The approach is based on determination the volume average density of toxic gases at any given time by using their experimental dependences on the mean volume temperature. The accuracy of this approach depends heavily on the error of determining the heat losses coefficients in small-scale experimental setup and real full scale room.

In this paper, using experimental data obtained on small-scale pilot plant, it is proposed a different approach, that uses the theoretical and experimental dependences between average volume densities of toxic gases and the mean volume density of oxygen. It is not necessary to determine the heat losses coefficient and also solve differential equations of the conservation laws of toxic gases masses.

**Materials and methods.** Coniferous wood building materials, transformer oil and PVC sheath cables are considered as combustible materials. Theoretical and experimental methods of gas dynamics and heat and mass transfer are used to determine the parameters of gases mixture during free convection.

**Theory and calculation.** A physical and mathematical model for calculating the mean volume density of carbon monoxide and toxic index for the combined effects of CO and O<sub>2</sub> during the combustion of solid and liquid substances and materials in conventionally hermetic volume of arbitrary

sizes is proposed. The model is based on the integral method for calculating thermal and gas dynamics of fire in the room.

Formulas for calculating the mean volume density of CO and toxicity index for mutual effect of the action of CO and O<sub>2</sub> are obtained.

**Results.** Experimental dependencies of mean volume density of carbon monoxide and toxicity index from mean volume density of oxygen are obtained in a small-scale pilot plant.

A comparison of the theoretical values of mean volume density of CO and toxicity index derived using the proposed formulas with experimental values is made.

**Discussion.** It is shown that the volume average density of carbon monoxide and the toxicity index for the combined effects of CO and O<sub>2</sub> during combustion of solid and liquid materials in conventionally hermetic volume of arbitrary sizes can be calculated by using only the average volume oxygen density and specific coefficients of separation of CO and deleting O<sub>2</sub>.

The resulting formulas for calculating the mean density of CO and toxicity index of the mutual influence of CO and O<sub>2</sub> do not contain the geometric sizes of the room and combustible materials surfaces and, therefore, are fair in both small-scale and large-scale fire in the room.

**Conclusions.** The proposed physical and mathematical model allows calculation of mean volume density of CO and toxicity index for combined effects of CO and O<sub>2</sub> during fire in a real full-scale room without solving the differential equation of conservation law of carbon monoxide mass and using the experimental dependence between the mean volume densities of CO and O<sub>2</sub> and the calculated average volume density of O<sub>2</sub>.

**Keywords:** fire; modeling; integral model; carbon monoxide; oxygen; toxicity index.

## REFERENCES

1. Beleshnikov I. L. *Forensic medical assessment of the content of cyanide in the organs and tissues of people who died in a fire*. Abstr. cand. med. sci. diss. Saint Petersburg, 1996. 24 p. (in Russian).
2. Ilichkin V. S. *Toxicity of combustion products of polymeric materials: principles and methods of determination*. Saint Petersburg, Khimiya Publ., 1993. 136 p. (in Russian).
3. NFPA 269. *Standard test method for developing toxic potency data for use in fire hazard modeling*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2016. 29 p.
4. Puzach S. V., Smagin A. V., Lebedchenko O. S., Abakumov E. S. *New ideas about the calculation of necessary time of evacuation of people and the effectiveness of using a portable filter self-rescuers during evacuation at fires*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2007. 222 p. (in Russian).
5. *Method of determining the estimated values of the fire risk in buildings, construction and structures of various classes of functional fire hazard*. Moscow, Emercom of Russia Publ., 2009. 45 p. (in Russian).
6. NFPA 92B. *Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2014.
7. McGrattan K., Klein B., Hostikka S., Floyd J. *Fire dynamics simulator (version 6)*. NIST Special Publication 1018. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2013. 149 p.
8. Welch S., Rubini P. *SOFIE: Simulation of fires in enclosures. User guide*. United Kingdom, Cranfield, Cranfield University, 1996. 340 p.
9. Tanaka T., Yamada S. *BRI2002: Two layer zone smoke transport model — Chapter 1. Outline of the model*. *Fire Science and Technology*, 2004, vol. 23, no. 1, pp. 1–44. DOI: 10.3210/fst.23.1.
10. Koshmarov Yu. A. *Forecasting of fire hazards in the case of indoor fire*. Moscow, State Fire Academy of Ministry of Interior of Russia Publ., 2000. 118 p. (in Russian).
11. Puzach S. V., Suleykin E. V. New united theoretical and experimental approach to the calculation of the distribution of toxic gases in case of fire in the room. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 2, pp. 13–20 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
12. Puzach S. V., Akperov R. G. Experimental determination of the specific coefficient of release of carbon monoxide during a fire in the room. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 5, pp. 18–25 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25.
13. Puzach S. V., Puzach V. G., Doan V. M. To definition of toxic potency of combustion products of combustible materials in compartment. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 4, pp. 4–13 (in Russian).

**For citation:** Puzach S. V., Nguyen Tat Dat. Experimental and theoretical approach for calculation of carbon monoxide concentration and toxicity index during fire in conventionally hermetic room. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 2, pp. 36–43. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.36-43.