

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)

НГУЕН ДАТ ТАТ, адъюнкт 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

КРИТИЧЕСКИЕ ВРЕМЕНА ВОЗДЕЙСТВИЯ МОНОКСИДА УГЛЕРОДА НА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ

Разработана математическая модель расчета содержания карбоксигемоглобина в крови человека при воздействии переменной по времени концентрации монооксида углерода. Предложены критерии для определения критической продолжительности пожара по условиям безопасной эвакуации и спасения людей. Представлены результаты численных экспериментов по определению концентрации карбоксигемоглобина при повышенной скорости легочной вентиляции, характерной для условий пожара в помещении, с использованием аналитического решения интегральной модели расчета термодинамики пожара. Выполнено сравнение данных по критической продолжительности пожара по СО, полученных с использованием предложенной модели и существующего подхода. Показано, что существующая в научной и нормативной литературе по пожарной безопасности методика расчета критической продолжительности пожара по СО может приводить к качественно и количественно неправильным результатам.

Ключевые слова: пожар; монооксид углерода; критическое время; карбоксигемоглобин; интоксикация человека; время воздействия СО.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.27-34

Введение

Исследованию токсикологической опасности воздействия монооксида углерода СО на человека на пожарах посвящено большое количество работ [1–6]. Принятая в отечественной научной и нормативной литературе по пожарной безопасности [7, 8] величина критической плотности монооксида углерода $\rho_{\text{СОкр}} = 1,16 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ при повышенной объемной скорости легочной вентиляции, характерной для условий пожара, может сделать невозможной при определенных условиях безопасную эвакуацию людей [9].

В работе [9] предложена математическая модель расчета количества карбоксигемоглобина в крови человека; выполнено ее тестирование на экспериментальных данных при спокойном дыхании человека; проведено исследование влияния воздействия постоянной плотности монооксида углерода на степень интоксикации человека при повышенной объемной скорости легочной вентиляции.

В настоящей работе математическая модель распространена на случай переменной плотности СО, характерной для начальной стадии пожара в помещении, при повышенной объемной скорости легочной вентиляции.

Некоторые особенности поражения организма человека монооксидом углерода

Токсическое действие СО на организм человека основано на взаимодействии его с гемоглобином крови и образовании вследствие этого карбоксигемоглобина (HbCO), который не способен переносить кислород [10].

Одна молекула гемоглобина способна присоединить четыре молекулы O₂ или СО [11]. Образующаяся молекула карбоксигемоглобина даже при одной присоединенной молекуле СО увеличивает сродство к кислороду остальных трех участков его связывания, в результате чего кислород с большим трудом отдается тканям [12].

Газообмен между воздухом внешней среды и кровью человека на его заключительном этапе состоит из поступления воздуха в альвеолы легких и последующей диффузии газов через альвеолярно-капиллярную мембрану в кровь [13].

Экспериментальные исследования влияния СО на человека, как правило, проводились в условиях отсутствия воздействия других опасных факторов пожара [11, 13, 14], поэтому дыхание человека было спокойным, с объемной скоростью легочной вентиляции порядка 5–9 л/мин [13]. В то же время при на-

личии хотя бы одного из факторов, воздействующих на нейроны дыхательного центра человека (повышенной концентрации углекислого газа, пониженной концентрации кислорода и интенсивной работы), глубина и частота дыхания существенно изменяются [13]. В этом случае объемная скорость легочной вентиляции может достигать 100–150 л/мин [13], что приводит, соответственно, к увеличению количества поглощаемого организмом человека СО.

Математическая модель расчета содержания карбоксигемоглобина

Рассмотрим внешнее дыхание человека, состоящее в обмене воздуха между внешней средой и альвеолами легких и диффузии газов в легких (обмен газов между альвеолярным воздухом и кровью через альвеолярно-капиллярную мембрану) [12].

Воздух, находящийся в воздухоносных путях (полость рта и носа, глотка, трахея, бронхи и бронхиолы), не участвует в газообмене [12], поэтому только часть объема воздуха, поступающего в организм человека, передает в кровь монооксид углерода.

Принимаем следующие допущения условий процесса поступления монооксида углерода в кровь человека:

- вся масса монооксида углерода, поступающего в альвеолы легких, диффундирует через альвеолярно-капиллярную мембрану в кровь при количестве СО, меньшем диффузионной способности легких [13];
- диффузионная способность легких по СО $D_{л.СО}$ (мл/(мм рт. ст. · мин)) (количество монооксида углерода, проходящего через альвеолярно-капиллярную мембрану за 1 мин из расчета на 1 мм рт. ст. разницы парциального давления газа по обе стороны мембраны [13]) определяет максимально возможное количество монооксида углерода, попадающего в кровь за минуту;
- вся масса СО, проходящего через альвеолярно-капиллярную мембрану и попадающего в кровь, участвует в образовании карбоксигемоглобина, так как из-за высокой аффинности гемоглобина к СО даже очень низкие парциальные давления СО приводят к связыванию значительного количества гемоглобина с СО с образованием НbСО [13];
- парциальное давление СО в крови после его перехода через альвеолярно-капиллярную мембрану пренебрежимо мало по сравнению с парциальным давлением СО в альвеолах перед альвеолярно-капиллярной мембраной [13].

Содержание карбоксигемоглобина в крови определяется как

$$\bar{M}_{\text{НbCO}} = M_{\text{НbCO}} / M_{\text{Нb}}, \quad (1)$$

где $\bar{M}_{\text{НbCO}}$ — массовая доля гемоглобина, перешедшего в карбоксигемоглобин;

$M_{\text{НbCO}}$ — масса карбоксигемоглобина, г;

$M_{\text{Нb}}$ — масса гемоглобина, г.

Масса гемоглобина в крови человека определяется по выражению [12]:

$$M_{\text{Нb}} = M_{\text{Нb.o}} V_{\text{к}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{Нb.o}}$ — удельная масса гемоглобина в организме человека, г/л;

$V_{\text{к}}$ — объем крови в организме человека, л.

Массовая доля карбоксигемоглобина в крови при изменяемой по времени плотности СО

$$\bar{M}_{\text{НbCO}} = \frac{k_W W}{M_{\text{Нb}}} \left(\frac{\mu_{\text{Нb}}}{n \mu_{\text{СО}}} + 1 \right) \int_0^{\tau} \rho_{\text{СО}} d\tau, \quad (3)$$

где k_W — коэффициент, равный отношению объемного расхода воздуха, поступающего в альвеолы легких, к объемной скорости вентиляции легких;

$\rho_{\text{СО}}$ — плотность СО в воздухе, кг/м³;

W — объемная скорость вентиляции легких, л/мин;

$\mu_{\text{Нb}}$ — молярная масса гемоглобина, кг/кмоль;

n — число молекул СО в одной молекуле карбоксигемоглобина;

$\mu_{\text{СО}}$ — молярная масса СО, кг/кмоль;

τ — время с момента начала пожара, с.

В уравнении (3) $W \leq W_{\text{max}}$ (где W_{max} — объемная скорость вентиляции легких, соответствующая диффузионной способности легких по СО, л/мин; $W_{\text{max}} = k_{\text{п}} D_{\text{л.СО}} / k_W$; $k_{\text{п}}$ — размерный коэффициент перевода размерностей физических параметров, мм рт. ст./Па).

При оценке степени интоксикации по формуле (3) в условиях пожара используем аналитическое решение интегральной модели расчета термогазодинамики пожара [7, 8]:

$$\rho_{\text{СО}} = \rho_{\text{п}} \left[1 - \exp \left(- \frac{A}{B} \tau^n \right) \right], \quad (4)$$

где $\rho_{\text{п}}$ — пороговая плотность, кг/м³;

$\rho_{\text{п}} = \{c_p T_{\text{в}} L_{\text{СО}} / [(1 - \varphi) Q_{\text{н}}^{\text{р}}]\} \rho_{\text{в}}$;

c_p — удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);

$T_{\text{в}}$ — температура воздуха в помещении перед пожаром, К;

$L_{\text{СО}}$ — удельный коэффициент выделения СО;

φ — коэффициент теплопотерь;

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — низшая рабочая теплота сгорания, Дж/кг;

$\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха в помещении перед пожаром, кг/м³;

A — размерный параметр, кг/сⁿ;

B — размерный комплекс, кг; $B = \frac{353 c_p V}{(1 - \varphi) \eta Q_{\text{н}}^{\text{р}}}$;

V — свободный объем помещения, м³;

η — коэффициент полноты горения.

Размерный параметр A определяется по формулам:

- в случае кругового распространения пожара по твердому горючему материалу

$$A = \frac{\pi}{3} \psi_{уд} w, \quad n = 3;$$

- в случае неустановившегося горения жидкости

$$A = \frac{2}{3} F_r \psi_{уд} \frac{1}{\sqrt{\tau_{ст}}}, \quad n = 2/3,$$

где $\psi_{уд}$ — удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с);

w — линейная скорость распространения пламени, м/с;

F_r — площадь открытой поверхности горючей жидкости, м²;

$\tau_{ст}$ — время стабилизации горения, с.

Критерии для определения критического времени воздействия монооксида углерода на человека

В соответствии с [15] критические концентрации токсичных продуктов горения принимаются по литературным данным при условии одноразового воздействия на эвакуирующихся в течение нескольких минут при средних физических нагрузках и по критерию сохранения ими способности реально оценивать окружающую обстановку, уверенно принимать и выполнять соответствующие решения.

Степень поражения организма человека монооксидом углерода определяется содержанием карбоксигемоглобина в крови. В соответствии с [10] отравление считается легкой степени тяжести, если содержание карбоксигемоглобина в крови составляет не выше 20 %, средней степени — до 50 %, тяжелой степени — до 60–70 %. При содержании карбоксигемоглобина более 70 % наступает быстрая смерть.

Согласно работе [10] при концентрации карбоксигемоглобина от 10 до 20 % человек испытывает головную боль и слабость, а в диапазоне концентраций от 20 до 30 % подвержен сильной головной боли, тошноте, рвоте, головокружению и нарушению зрения.

Принимаем, что критическое значение массовой доли карбоксигемоглобина в крови, при которой еще возможна безопасная эвакуация людей, $(\bar{M}_{HbCO})_{кр} = 0,2$ (отравление легкой степени тяжести).

В соответствии с работой [10] такие симптомы, как кома, судороги, нарушения дыхания и сердечно-сосудистой деятельности, появляются, когда концентрация карбоксигемоглобина находится в диапазоне от 40 до 50 %.

Принимаем, что критическое значение массовой доли карбоксигемоглобина в крови, при которой

еще возможно спасти людей, с большой степенью вероятности неспособных самостоятельно покинуть помещение, составляет $(\bar{M}_{HbCO})_{кр} = 0,5$ (отравление средней степени тяжести).

Предлагаем критические значения времени воздействия СО, при которых человек получает отравление разной степени тяжести [10]:

- легкой ($\bar{M}_{HbCO} = 0,2$) — $\tau_{кр1}$;
- средней ($\bar{M}_{HbCO} = 0,5$) — $\tau_{кр2}$.

Критическое время $\tau_{кр1}$ будет определять время безопасной эвакуации людей по воздействию СО. Критическое время $\tau_{кр2}$ характеризует промежуток времени с момента начала пожара, после которого люди, находящиеся в помещении без средств защиты от СО (самоспасателей и т. п.), с большой степенью вероятности не способны самостоятельно покинуть помещение, но их еще можно спасти при транспортировке в безопасную зону.

Критическое время $\tau_{кр3}$ по существующей методике [7, 8] равно промежутку времени от начала пожара до момента достижения критического значения плотности СО $\rho_{СОкр}$ на высоте рабочей зоны помещения.

Исходные данные

При спокойном дыхании, когда нет дополнительных воздействий на дыхательный центр, принимаем для взрослого человека весом 75 кг [12]: $V_d = 0,5$ л; $V_m = 0,15$ л (где V_d — дыхательный объем, л; V_m — объем мертвого пространства, л).

Принимаем по формуле (3) $k_W = (V_d - V_m)/V_d = 0,7$.

Диффузионная способность легких по СО составляет [7]:

- при спокойном дыхании $D_{л,СО} = 20$ мл/(мм рт. ст.·мин);
- при физической нагрузке $D_{л,СО} = 60$ мл/(мм рт. ст.·мин).

Удельная масса гемоглобина в крови изменяется от 120 до 160 г/л у мужчин и от 110 до 140 г/л — у женщин [12].

Принимаем $(M_{Hb.o})_{ср} = 135$ г/л, $(M_{Hb.o})_{мин} = 110$ г/л (где $(M_{Hb.o})_{ср}$, $(M_{Hb.o})_{мин}$ — соответственно средняя и минимальная удельная масса гемоглобина в организме взрослого человека, г/л).

Объем крови взрослого человека V_k изменяется от 4,5 до 6,0 л [12]. Выбираем среднее значение $V_k = 5,25$ л. Тогда средняя масса гемоглобина в крови человека по формуле (2) составит $(M_{Hb})_{ср} = 708,75$ г.

При минимальном объеме крови $V_k = 4,5$ л и $(M_{Hb.o})_{мин} = 110$ г/л минимальная масса гемоглобина в крови человека в соответствии с формулой (2) $(M_{Hb})_{мин} = 495$ г.

Молярные массы гемоглобина и СО: $\mu_{Hb} = 68800$ кг/кмоль [12]; $\mu_{СО} = 28$ кг/кмоль.

Модельные помещения принимаем в виде параллелепипеда с размерами (длина × ширина × высота) 4×5×3; 4×5×6 и 24×12×3 м.

Берем следующие горючие материалы [7]:

- хвойные древесные стройматериалы:

$$Q_n^p = 13,8 \text{ МДж/кг}, \psi_{уд} = 0,0063 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

$$L_{CO} = 0,024, w = 0,0585 \text{ м/с};$$

- оболочка кабелей ПВХ:

$$Q_n^p = 25 \text{ МДж/кг}, \psi_{уд} = 0,0244 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

$$L_{CO} = 0,109, w = 0,0071 \text{ м/с};$$

- масло трансформаторное:

$$Q_n^p = 41,9 \text{ МДж/кг}, \psi_{уд} = 0,03 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

$$L_{CO} = 0,122, \tau_{ст} = 5 \text{ мин}.$$

Принимаем согласно [7] $c_p = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\varphi = 0,6$.

Атмосферное давление $p_a = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температура воздуха составляет $T_b = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты численных и натуральных экспериментов и их анализ

Объемная скорость вентиляции легких, соответствующая диффузионной способности легких по СО, при заданных исходных данных составляет:

- при спокойном дыхании $W_{\max} = 21,6 \text{ л/мин}$;
- при физической нагрузке $W_{\max} = 64,9 \text{ л/мин}$.

Принимаем $W_{\max} = 64,9 \text{ л/мин}$.

Исследуем влияние повышенной скорости легочной вентиляции на степень интоксикации организма человека при зависимости плотности СО от времени, соответствующей начальной стадии пожара в помещении (формула (4)).

Зависимости плотности СО от времени с момента начала пожара при горении хвойных древесных стройматериалов представлены на рис. 1,а, оболоч-

ки кабелей ПВХ — на рис. 1,б, масла трансформаторного — на рис. 1,в.

Зависимости массовой доли карбоксигемоглобина в случае средней массы гемоглобина в организме взрослого человека от времени с момента начала пожара, рассчитанные с использованием формулы (3), показаны на рис. 2,а при горении хвойных древесных стройматериалов, на рис. 2,б — оболочки кабелей ПВХ и на рис. 2,в — масла трансформаторного.

В табл. 1 представлены результаты расчетов критической продолжительности пожара по СО, полученные с использованием традиционного подхода (уравнение (4) [7, 8], критерий $\rho_{CO} = \rho_{COкр}$) и по предложенному в настоящей статье подходу (уравнение (3), критерии $\bar{M}_{HbCO} = 0,2$ и $\bar{M}_{HbCO} = 0,5$).

Из анализа табл. 1 можно сделать следующие выводы:

- при использовании общепринятого подхода [7, 8] в помещении размерами 4×5×6 м при горении хвойных древесных стройматериалов и масла трансформаторного плотность СО не достигает критического значения за рассматриваемое время пожара, в то время как расчеты по предложенной математической модели показали, что человек может погибнуть от отравления монооксидом углерода;
- критическая продолжительность пожара по СО, полученная с использованием уравнения (4) [7, 8], существенно больше, чем соответствующая величина, определенная по предложенной формуле (3), для случая горения масла трансформаторного в помещении 4×5×3 м.

Таким образом, расчеты с использованием существующего подхода могут привести к недооценке опасности отравления монооксидом углерода.

Таблица 1. Критические значения времени воздействия СО в условиях пожара при максимальной объемной скорости вентиляции легких, соответствующей диффузионной способности легких по СО

Горючее вещество	Размеры помещения, м	Критическое время воздействия СО, мин, на взрослого человека с массой гемоглобина					
		средней			минимальной		
		$\tau_{кр1}$	$\tau_{кр2}$	$\tau_{кр3}$	$\tau_{кр1}$	$\tau_{кр2}$	$\tau_{кр3}$
Хвойные древесные стройматериалы	4 × 5 × 3	1,42	2,41	0,83	1,22	1,92	0,83
	4 × 5 × 6	2,92	5,85	—	2,33	4,38	—
	24 × 12 × 3	2,44	3,50	2,03	2,18	3,00	2,03
Оболочка кабелей ПВХ	4 × 5 × 3	1,67	2,24	1,19	1,51	1,98	1,19
	4 × 5 × 6	2,76	4,00	2,48	2,45	3,40	2,48
	24 × 12 × 3	3,18	4,10	2,89	2,88	3,70	2,89
Масло трансформаторное	4 × 5 × 3	3,32	5,88	10,05	2,66	4,69	10,05
	4 × 5 × 6	>10	>10	—	7,76	>10	—
	24 × 12 × 3	>10	>10	—	>10	>10	—

Примечание. “—” означает, что плотность СО не достигла критического значения за время пожара.

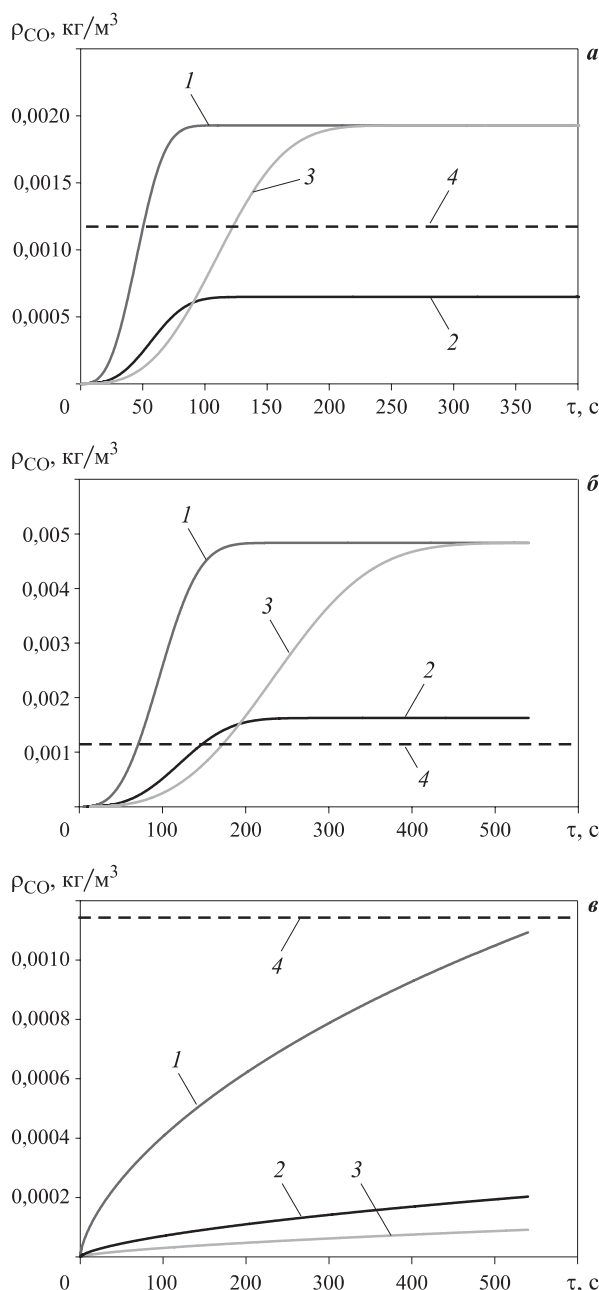


Рис. 1. Зависимости плотности СО от времени с начала пожара при горении хвойных древесных стройматериалов (а), оболочки кабелей ПВХ (б) и масла трансформаторного (в) в помещениях: 1 — 4×5×3 м; 2 — 4×5×6 м; 3 — 24×12×3 м; 4 — критическое значение $\rho_{\text{СОкр}}$

Закключение

Принятая в научной и нормативной литературе по пожарной безопасности методика расчета критической продолжительности пожара по монооксиду углерода, основанная на понятии критической плотности СО, при повышенной объемной скорости легочной вентиляции, характерной для условий пожара, может привести к получению качественно и количественно неправильных результатов.

Предложенные в настоящей статье критерии для определения критических времен воздействия СО

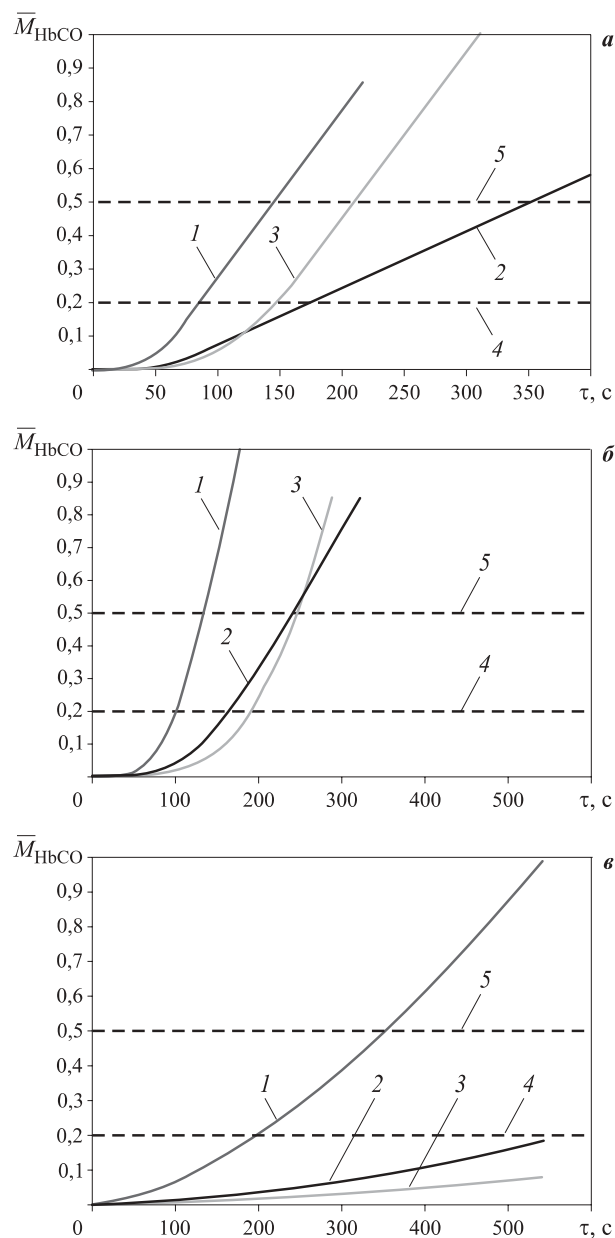


Рис. 2. Зависимости массовой доли карбоксигемоглобина от времени с начала пожара при средней массе гемоглобина в организме взрослого человека для случаев горения хвойных древесных стройматериалов (а), оболочки кабелей ПВХ (б) и масла трансформаторного (в) в помещениях: 1 — 4×5×3 м; 2 — 4×5×6 м; 3 — 24×12×3 м; 4 — легкое отравление; 5 — отравление средней степени тяжести

и методика расчета содержания карбоксигемоглобина позволяют:

- более обоснованно по сравнению с существующим подходом определить время безопасной эвакуации людей при пожаре;
- рассчитать критическое время спасения людей, находящихся в помещении без средств защиты от СО (самоспасателей и т. п.), которые с большой вероятностью не способны самостоятельно покинуть помещение, но их еще можно спасти при транспортировке в безопасную зону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hartzell G. E., Priest D. N., Switzer W. G.* Modeling of toxicological effects of fire gases: II. Mathematical modeling of intoxication of rats by carbon monoxide and hydrogen cyanide // *Journal of Fire Sciences*. — 1985. — Vol. 3, No. 2. — P. 115–128. DOI: 10.1177/073490418500300204.
2. *Hartzell G. E., Emmons H. W.* The fractional effective dose model for assessment of toxic hazards in fires // *Journal of Fire Sciences*. — 1988. — Vol. 6, No. 5. — P. 356–362. DOI: 10.1177/073490418800600504.
3. *Hirschler M. M.* Smoke toxicity measurements made so that the results can be used for improved fire safety // *Journal of Fire Sciences*. — 1991. — Vol. 9, No. 4. — P. 330–347. DOI: 10.1177/073490419100900407.
4. *Alexeeff G. V., Puckham S. C.* Evaluation of smoke toxicity using concentration-time products // *Journal of Fire Sciences*. — 1984. — Vol. 2, No. 5. — P. 362–379. DOI: 10.1177/073490418400200504.
5. *Christian S. D., Shields T. J.* Safe tolerability limits for carbon monoxide? A review of the clinical and fire engineering implications of a single, acute, sub-lethal exposure // *Journal of Fire Sciences*. — 2000. — Vol. 18, No. 4. — P. 308–323. DOI: 10.1177/073490410001800404.
6. *Hartzell G. E.* Prediction of the toxic effects of fire effluents // *Journal of Fire Sciences*. — 1989. — Vol. 7, No. 3. — P. 179–193. DOI: 10.1177/073490418900700303.
7. *Кошмаров Ю. А.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. — М.: Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
8. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. — М.: МЧС России, 2009. — 45 с.
9. *Пузач С. В., Нгуен Дат Там.* Критическое значение концентрации монооксида углерода при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2016. — Т. 25, № 6. — С. 5–11. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.5-11.
10. *Фаткуллин К. В., Гильманов А. Ж., Костюков Д. В.* Клиническое значение и современные методологические аспекты определения уровня карбокси- и метгемоглобина в крови // *Практическая медицина*. — 2014. — Т. 79, № 3. — С. 17–21.
11. *Wilbur S., Williams M., Williams R. et al.* Toxicological profile for carbon monoxide. — Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK153693> (дата обращения: 01.07.2016).
12. Физиология человека: учебник / Под ред. В. М. Покровского, Г. Ф. Коротько. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Медицина, 2003. — 656 с.
13. Внутренние болезни. — В 10 кн. Кн. 6. Болезни дыхательных путей. Болезни почек и мочевых путей / Пер. с англ.; под ред. Е. Браунвальда, К. Дж. Иссельбахера, Р. Г. Петерсдорфа и др. — М.: Медицина, 1995. — 416 с.
14. *Kuligowski E. D.* NIST Technical Note 1644. Compilation of data on the sublethal effects of fire effluent. — Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2009. — 47 p.
15. СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения. — Введ. 01.05.2009. — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. — 14 с.

Материал поступил в редакцию 8 июля 2016 г.

Для цитирования: *Пузач С. В., Нгуен Дат Там.* Критические времена воздействия монооксида углерода на человека при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2016. — Т. 25, № 11. — С. 27–34. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.27-34.

English

CRITICAL VALUES OF EXPOSURE TIME OF CARBON MONOXIDE EFFECTS ON HUMAN DURING THE FIRE IN PREMISES

PUZACH S. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Science Worker 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 address: puzachsv@mail.ru)

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

ABSTRACT

The aim of this work was to create the mathematical model for calculation of the carboxyhemoglobin concentration in the human blood in case of fire. Tests were conducted in conditions of variable CO density, typical for the initial stage of indoor fire, and increased pulmonary ventilation rate. It is offered the criteria for determination of the critical values of fire duration under the terms of safe evacuation and people rescue.

The methods of theoretical analysis of the content of carboxyhemoglobin in the human blood and calculation of the carbon monoxide (CO) concentration, in conditions of fire in premises, were used during the experiment.

The mathematical model was created taking into account the concentration of CO in the inhaled air, the mass of hemoglobin in the blood, the pulmonary ventilation rate, the volume of respiratory dead space and the CO exposure time.

Critical time of safe evacuation for people under the effects of CO is accepted when the content of carboxyhemoglobin in the blood reaches the 20 % by mass (minor poisoning).

Critical time from the initial stage of fire and until the moment when people, which stay in premises without protection means against CO (respirators, gas masks, self-rescuers, etc.), and, with high probability, are unable to leave the premises independently, is accepted when the concentration of carboxyhemoglobin in the blood reaches the 50 % by mass (moderate poisoning).

The model premises were in the form of parallelepiped with dimensions (m): $4 \times 5 \times 3$, $4 \times 5 \times 6$ and $24 \times 12 \times 3$. As combustible materials there were used the wood building materials, PVC sheath of cables and transformer oil.

The results of numerical experiments on determination of the carboxyhemoglobin concentration using the analytical solution of the integral calculation model for the thermal and gas dynamics of fire are presented.

The estimated values of CO exposure intervals prior to various degrees of human intoxication are obtained. The comparison of critical durations of fire (considering CO effects), obtained using proposed model and existing approach, is made.

The critical duration of fire, obtained using proposed model, was significantly greater than the corresponding value determined by existing methods (for example, in case of burning of the transformer oil in the room with dimensions of $4 \times 5 \times 3$ m).

The main conclusion is that existing scientific and regulatory literature contains the calculation methods for critical duration of fire, considering CO effects, which may lead to qualitatively and quantitatively wrong results. The proposed criteria for determination of the critical values of CO exposure time and the calculation methods for the content of carboxyhemoglobin allow defining the time of safe evacuation and people rescue more reasonably than existing approach.

Keywords: fire; carbon monoxide; critical time; carboxyhemoglobin; human intoxication; CO exposure time.

REFERENCES

1. Hartzell G. E., Priest D. N., Switzer W. G. Modeling of toxicological effects of fire gases: II. Mathematical modeling of intoxication of rats by carbon monoxide and hydrogen cyanide. *Journal of Fire Sciences*, 1985, vol. 3, no. 2, pp. 115–128. DOI: 10.1177/073490418500300204.
2. Hartzell G. E., Emmons H. W. The fractional effective dose model for assessment of toxic hazards in fires. *Journal of Fire Sciences*, 1988, vol. 6, no. 5, pp. 356–362. DOI: 10.1177/073490418800600504.
3. Hirschler M. M. Smoke toxicity measurements made so that the results can be used for improved fire safety. *Journal of Fire Sciences*, 1991, vol. 9, no. 4, pp. 330–347. DOI: 10.1177/073490419100900407.
4. Alexeeff G. V., Puckham S. C. Evaluation of smoke toxicity using concentration-time products. *Journal of Fire Sciences*, 1984, vol. 2, no. 5, pp. 362–379. DOI: 10.1177/073490418400200504.
5. Christian S. D., Shields T. J. Safe tolerability limits for carbon monoxide? A review of the clinical and fire engineering implications of a single, acute, sub-lethal exposure. *Journal of Fire Sciences*, 2000, vol. 18, no. 4, pp. 308–323. DOI: 10.1177/073490410001800404.

6. Hartzell G. E. Prediction of the toxic effects of fire effluents. *Journal of Fire Sciences*, 1989, vol. 7, no. 3, pp. 179–193. DOI: 10.1177/073490418900700303.
7. Koshmarov Yu. A. *Forecasting of fire hazards in the case of indoor fire*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2000. 118 p. (in Russian).
8. *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).
9. Puzach S. V., Nguyen Dat Tat. Critical value of the concentration of carbon monoxide at a fire in the room. *Pozharovzryvobezопасnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 6, pp. 5–11 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.5-11.
10. Phatkullin K. V., Gilmanov A. Zh., Kostyukov D. V. Clinical importance and modern methodological aspects of determining the level of carboxy- and methahemoglobin in blood. *Prakticheskaya meditsina (Practical Medicine)*, 2014, no. 3(79), pp. 17–21 (in Russian).
11. Wilbur S., Williams M., Williams R. et al. *Toxicological profile for carbon monoxide*. Atlanta, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK153693> (Accessed 1 July 2016).
12. Pokrovskiy V. M., Korotko G. F. (eds.). *Human Physiology*. Textbook. 2nd ed. Moscow, Meditsina Publ., 2003. 656 p. (in Russian).
13. Braunwald E., Isselbacher K. J., Petersdorf R. G. et al. (eds.) *Harrison's principles of internal medicine*. 11th ed. New York, McGraw-Hill Book Company, 1987. (Russ. ed.: Braunvald E., Isselbakher K. Dzh., Petersdorf R. G. et al. (eds.). *Vnutrenniye bolezni. V 10 knigakh. Kniga 6: Bolezni dykhatelnykh putey. Bolezni pochk i mochevykh putey*. Moscow, Meditsina Publ., 1995. 416 p.).
14. Kuligowski E. D. *NIST Technical Note 1644. Compilation of data on the sublethal effects of fire effluent*. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2009. 47 p.
15. *Set of rules 11.13130.2009. Location of fire service divisions. Procedure and methods of determination*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009. 14 p. (in Russian).

For citation: Puzach S. V., Nguyen Dat Tat. Critical values of exposure time of carbon monoxide effects on human during the fire in premises. *Pozharovzryvobezопасnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 11, pp. 27–34. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.27-34.



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