

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

КРИТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МОНОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ

Рассмотрены особенности поражения организма человека монооксидом углерода СО. Разработана математическая модель расчета содержания карбоксигемоглобина в крови человека при воздействии на него СО. Проведено сопоставление расчетного содержания карбоксигемоглобина с экспериментальными данными, полученными при воздействии на человека постоянной концентрации СО при спокойном дыхании. Представлены результаты численного эксперимента по определению концентрации карбоксигемоглобина при повышенной скорости легочной вентиляции, характерной для условий пожара в помещении. Показано, что критическая концентрация монооксида углерода, принятая в нормативной и научной литературе по пожарной безопасности, при определенных условиях может сделать невозможной безопасную эвакуацию людей.

Ключевые слова: пожар; монооксид углерода; критическое значение; карбоксигемоглобин; интоксикация человека.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.5-11

Введение

По статистике более чем в 80 % случаев причиной смерти людей на пожарах является отравление продуктами горения [1], поэтому математическое моделирование распространения токсичных продуктов горения при пожаре представляет собой актуальную задачу [2, 3].

В настоящее время математические модели расчета динамики опасных факторов пожара (ОФП) (в том числе концентраций токсичных продуктов горения) в помещении получили достаточное развитие для использования их при решении практических задач пожарной безопасности, в частности при расчете пожарных рисков (например, [3, 4]).

Большое количество работ посвящено исследованию токсикологической опасности воздействия СО на человека на пожарах [5–10].

Время блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара определяется из условия достижения критического значения рассматриваемого фактора (например, концентрации токсичного газа). Для монооксида углерода критическая концентрация $\rho_{\text{СО кр}}$ принята равной $1,16 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ [4, 11].

В работе [12] на основании анализа экспериментальных данных по воздействию СО на человека сделан вывод о том, что непрерывное воздействие монооксида углерода вышеуказанной концентрации безопасно для человека в течение 25 мин. Этот вы-

вод, на первый взгляд, подтверждает обоснованность принятой величины $\rho_{\text{СО кр}}$.

Однако экспериментальные исследования влияния СО на человека, как правило, проводились в условиях отсутствия воздействия других ОФП [13–15], поэтому дыхание человека было спокойным, с объемной скоростью легочной вентиляции порядка 5–9 л/мин [13]. В то же время при наличии хотя бы еще 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 поглощения СО организмом человека.

В настоящей работе выполнена оценка влияния концентрации и времени экспозиции (продолжительности действия на организм человека) СО при повышенной скорости легочной вентиляции на степень интоксикации организма человека.

Некоторые особенности поражения организма человека монооксидом углерода

Токсическое действие СО на организм человека основано на взаимодействии его с гемоглобином кро-

Таблица 1. Зависимость состояния человека от процентного содержания карбоксигемоглобина в крови [16]

HbCO, %	Симптоматика
0–2	Нормальный уровень среди некурящих
5–6	Нормальный уровень для курильщиков. Возможно нарушение навыков вождения автомобиля и снижение толерантности к физической нагрузке у некурящих
10–20	Головная боль, слабость
20–30	Сильная головная боль, тошнота, рвота, головокружение, нарушение зрения
30–40	Тошнота, рвота, обморок, тахикардия и тахипноэ, неврологическая симптоматика
40–50	Кома, судороги, нарушения дыхания и сердечно-сосудистой деятельности
50–60	Кома, судороги, глубокое угнетение дыхания и сердечной деятельности
60–70	Кома, судороги, артериальная гипотензия, брадикардия, угнетение дыхания
>70	Дыхательная недостаточность, смерть

ви и образовании вследствие этого карбоксигемоглобина (HbCO), который не способен переносить кислород [16].

Одна молекула гемоглобина способна присоединить четыре молекулы O_2 или CO [15]. Образующаяся молекула карбоксигемоглобина даже при одной присоединенной молекуле CO увеличивает сродство к кислороду остальных трех участков его связывания, в результате чего кислород с большим трудом отдается тканям [17].

Степень поражения организма человека монооксидом углерода определяется содержанием карбоксигемоглобина в крови (табл. 1) [16]. В соответствии с работой [16] отравление считается легкой степени тяжести, если содержание карбоксигемоглобина в крови не превышает 20 %, средней степени — до 50 %, тяжелой степени — до 60–70 %. При содержании карбоксигемоглобина более 70 % наступает быстрая смерть.

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

Математическая модель расчета содержания карбоксигемоглобина в крови

Рассмотрим внешнее дыхание человека, состоящее в обмене воздуха между внешней средой и альвеолами легких и в диффузии газов в легких (обмен газов между альвеолярным воздухом и кровью через альвеолярно-капиллярную мембрану) [17].

Воздух, находящийся в воздухоносных путях (полость рта, носа, глотка, трахея, бронхи и бронхиолы), не участвует в газообмене [17], 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 CO, меньшем диффузионной способности легких [13];
- диффузионная способность легких по CO $D_{л.CO}$ (мл/(мм рт. ст. · мин)) (т. е. 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 CO, проходящего через альвеолярно-капиллярную мембрану и попадающего в кровь, участвует в образовании карбоксигемоглобина, так как из-за высокой аффинности гемоглобина к CO даже очень низкие парциальные давления CO приводят к связыванию значительного количества гемоглобина с CO с образованием HbCO [13];
- парциальное давление CO в крови после перехода его через альвеолярно-капиллярную мембрану пренебрежимо мало по сравнению с парциальным давлением CO в альвеолах перед альвеолярно-капиллярной мембраной [13].

Содержание карбоксигемоглобина в крови определяется как

$$\bar{M}_{HbCO} = M_{HbCO} / M_{Hb}, \quad (1)$$

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

M_{HbCO} — масса карбоксигемоглобина, г;

M_{Hb} — масса гемоглобина, г.

Масса гемоглобина в крови человека составляет [17]:

$$M_{Hb} = M_{Hb.o} V_k, \quad (2)$$

где $M_{Hb.o}$ — удельная масса гемоглобина, г/л;

V_k — объем крови в организме человека, л.

Принимаем концентрацию CO в окружающем воздухе постоянной по времени. Тогда масса монооксида углерода, участвующего в образовании карбоксигемоглобина за время экспозиции, M_{CO} (г) составит:

- при $W < W_{max}$:

$$M_{CO} = k_W \rho_{CO} W \tau, \quad (3)$$

- при $W \geq W_{\max}$:

$$M_{\text{CO}} = k_W \rho_{\text{CO}} W_{\max} \tau_{\text{э}}, \quad (4)$$

где W — объемная скорость вентиляции легких, л/мин;

$W_{\max}$ — объемная скорость вентиляции легких, соответствующая диффузионной способности легких по СО, л/мин; $W_{\max} = k_{\text{п}} D_{\text{л.СО}} / k_W$;

$k_{\text{п}}$ — размерный коэффициент перевода размерностей физических параметров, мм рт. ст./Па;

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

ρ_{CO} — плотность СО в воздухе, кг/м³;

$\tau_{\text{э}}$ — время экспозиции, мин.

Масса карбоксигемоглобина, образующегося в крови за время экспозиции, составляет:

$$M_{\text{HbCO}} = M_{\text{CO}} \left(\frac{\mu_{\text{Hb}}}{n \mu_{\text{CO}}} + 1 \right), \quad (5)$$

где μ_{Hb} — молярная масса гемоглобина, кг/кмоль;
 n — число молекул СО в одной молекуле карбоксигемоглобина;

μ_{CO} — молярная масса СО, кг/кмоль.

Окончательно выражение для массовой доли карбоксигемоглобина в крови после объединения формул (1)–(5) примет вид:

$$\bar{M}_{\text{HbCO}} = \frac{k_W \rho_{\text{CO}} W \tau_{\text{э}}}{M_{\text{Hb}}} \left(\frac{\mu_{\text{Hb}}}{n \mu_{\text{CO}}} + 1 \right). \quad (6)$$

В уравнении (6) при $W \geq W_{\max}$ примем $W = W_{\max}$.

Объемная скорость вентиляции легких при спокойном дыхании [17]:

$$W = f(V_{\text{д}} - V_{\text{м}}), \quad (7)$$

где f — частота дыхания, мин⁻¹;

$V_{\text{д}}$ — дыхательный объем, л;

$V_{\text{м}}$ — объем “мертвого” пространства, л.

Исходные данные

При спокойном дыхании, когда нет дополнительных воздействий на дыхательный центр, принимаем для взрослого человека весом 75 кг [17]: $f = 15 \text{ мин}^{-1}$; $V_{\text{д}} = 0,5 \text{ л}$; $V_{\text{м}} = 0,15 \text{ л}$.

Тогда из формулы (7) при спокойном дыхании получаем $W = 5,25 \text{ л/мин}$.

Принимаем в формуле (3) $k_W = (V_{\text{д}} - V_{\text{м}}) / V_{\text{д}} = 0,7$.

Диффузионная способность легких по СО составляет [13]:

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

Удельная масса гемоглобина в крови изменяется от 120 до 160 г/л у мужчин и от 110 до 140 г/л у женщин [17].

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

Объем крови взрослого человека изменяется от 4,5 до 6 л [17]. Выбираем среднее значение: $V_{\text{к}} = 5,25 \text{ л}$. Тогда средняя масса гемоглобина в крови человека по формуле (2) составит $(M_{\text{Hb}})_{\text{ср}} = 708,75 \text{ г}$.

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

Молярные массы: $\mu_{\text{Hb}} = 68800 \text{ кг/кмоль}$ [17]; $\mu_{\text{CO}} = 28 \text{ кг/кмоль}$.

По формуле (6) определяем массовую долю карбоксигемоглобина в крови в зависимости от степени тяжести отравления [1]: легкой — $\bar{M}_{\text{HbCO}} = 0,2$; средней — $\bar{M}_{\text{HbCO}} = 0,5$.

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

Атмосферное давление $p_{\text{а}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температура воздуха $T_{\text{в}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты численных и натурных экспериментов и их анализ

Сопоставление расчетного количества карбоксигемоглобина в крови с экспериментальными данными является оценочным, так как в публикациях, содержащих результаты экспериментов по воздействию СО на людей, нет точных данных по возрасту, весу, полу и другим характеристикам участников экспериментов.

Результаты сопоставления расчетного процентного содержания карбоксигемоглобина с экспериментальными значениями [12], полученными при воздействии СО на людей при спокойном дыхании, при $\tau_{\text{э}} = 5 \text{ мин}$ и $\tau_{\text{э}} = 10 \text{ мин}$ представлены на рис. 1. В расчетах принималась средняя масса гемоглобина в организме взрослого человека и $n = 1$.

Анализ рис. 1 показывает, что расчетные значения $\bar{M}_{\text{HbCO}}$ совпадают с экспериментальными с погрешностью, не превышающей 27 %.

Исследуем влияние повышенной скорости легочной вентиляции на степень интоксикации организма человека.

Рассмотрим две величины концентрации СО, при воздействии которых есть экспериментальные значения по накоплению карбоксигемоглобина в крови [12] в случае свободного дыхания и которые близки

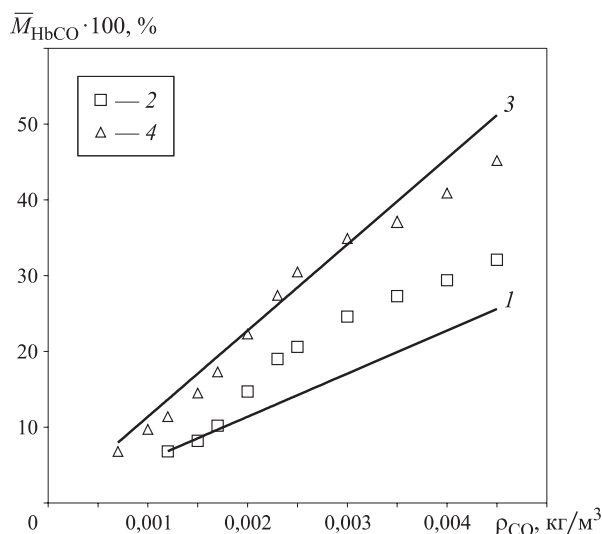


Рис. 1. Зависимости процентного содержания карбоксигемоглобина от плотности СО во вдыхаемом воздухе при спокойном дыхании при $\tau_3 = 5$ мин (1, 2) и $\tau_3 = 10$ мин (3, 4): 1, 3 — расчет; 2, 4 — эксперимент [12]

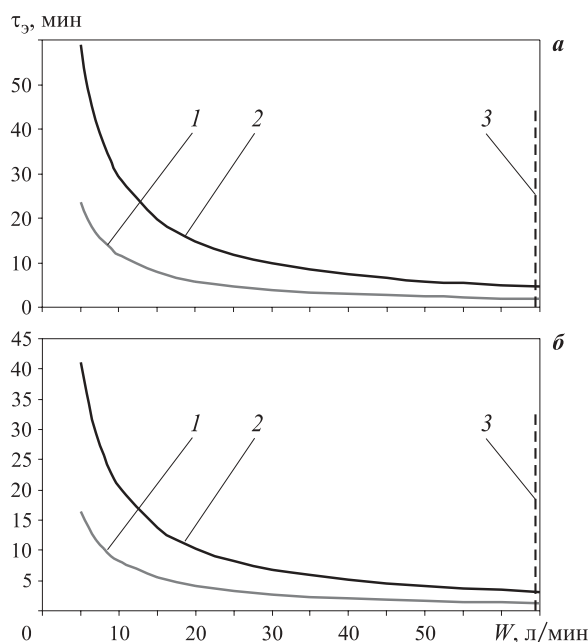


Рис. 2. Расчетные зависимости времени экспозиции от объемной скорости легочной вентиляции для случая $\rho_{CO} = 0,0007$ кг/м³ при $(M_{Hb})_{cp} = 708,75$ г (а) и $(M_{Hb})_{min} = 495$ г (б): 1 — $\overline{M}_{HbCO} = 0,2$; 2 — $\overline{M}_{HbCO} = 0,5$; 3 — $W = W_{max}$

к критическому значению $\rho_{CO\text{ кр}}$: $\rho_{CO} = 0,0007$ кг/м³ и $\rho_{CO} = 0,0012$ кг/м³.

Объемная скорость вентиляции легких, соответствующая диффузионной способности легких по СО, W_{max} при заданных исходных данных составляет: при спокойном дыхании — 21,6 л/мин; при физической нагрузке — 64,9 л/мин. Принимаем $W_{max} = 64,9$ л/мин.

Расчетные зависимости времени экспозиции, при котором происходит отравление организма легкой

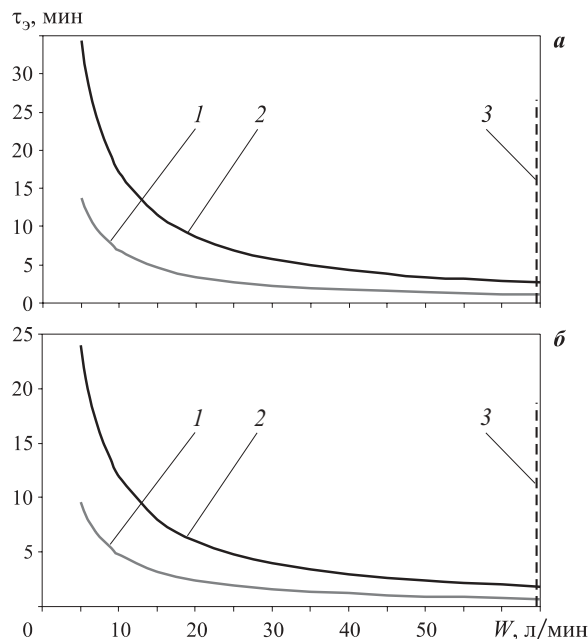


Рис. 3. Расчетные зависимости времени экспозиции от объемной скорости легочной вентиляции для случая $\rho_{CO} = 0,0012$ кг/м³ при $(M_{Hb})_{cp} = 708,75$ г (а) и $(M_{Hb})_{min} = 495$ г (б): 1 — $\overline{M}_{HbCO} = 0,2$; 2 — $\overline{M}_{HbCO} = 0,5$; 3 — $W = W_{max}$

Таблица 2. Значения времени экспозиции, при которых при максимальной объемной скорости вентиляции легких, соответствующей диффузионной способности легких по СО, происходит отравление легкой и средней степени тяжести

$\rho_{CO}, \text{кг/м}^3$	Удельная масса гемоглобина в крови взрослого человека	τ_3 , мин, при степени тяжести отравления	
		легкой	средней
0,0007	Средняя	1,81	4,53
	Минимальная	1,26	3,16
0,0012	Средняя	1,06	2,64
	Минимальная	0,74	1,84

и средней степени тяжести, от объемной скорости легочной вентиляции представлены на рис. 2 для $\rho_{CO} = 0,0007$ кг/м³ и на рис. 3 — для $\rho_{CO} = 0,0012$ кг/м³. Расчет выполнен с использованием формулы (6).

Результаты расчетов при максимальной объемной скорости вентиляции легких, соответствующей диффузионной способности легких по СО, представлены в табл. 2.

В соответствии с [18] критические концентрации токсичных продуктов горения принимаются по литературным данным для условий 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. Полученные в настоящей статье временные пределы, при

которых наступают поражения организма человека легкой и средней степени тяжести, показывают необходимость более тщательно выбирать $\rho_{\text{CO кр}}$, так как при критической плотности монооксида углерода взрослый человек с минимальной массой гемоглобина в крови примерно через 0,74 мин почувствует головную боль и слабость, а через 1,84 мин могут наступить кома, судороги, нарушения дыхания и сердечно-сосудистой деятельности.

Заключение

Принятая в научной и нормативной литературе по пожарной безопасности критическая плотность

монооксида углерода $\rho_{\text{CO кр}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ при повышенной объемной скорости легочной вентиляции, характерной для условий пожара, при определенных условиях может сделать невозможной безопасную эвакуацию людей.

Для обоснования критической плотности СО необходимо продолжить исследования, в частности уточнить влияние на объемную скорость легочной вентиляции повышенной концентрации углекислого газа, пониженной концентрации кислорода и интенсивности движения людей, а также уточнить величину коэффициента $k_{\text{И}}$ при повышенной объемной легочной вентиляции W .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белешиников 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. 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.
3. Пузач С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. — 336 с.
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. — М. : МЧС России, 2009. — 45 с.
5. 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 hydrogencyanide // Journal of Fire Sciences. — 1985. — Vol. 3, No. 2. — P. 115–128. DOI: 10.1177/073490418500300204.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. — М. : Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
12. Матвиенко Н. Н., Потапишиков П. Ф., Федоров Н. П., Баюкин М. В., Матвиенко А. Н. Фильтрующие самоспасатели и защита от монооксида углерода // Пожаровзрывобезопасность. — 2006. — Т. 15, № 5. — С. 48–51.
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. Петерсдорфаидр. — 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. 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: 03.03.2016).
16. 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. — № 3(79). — С. 17–21.

17. Физиология человека : учебник / Под ред. В. М. Покровского, Г. Ф. Коротько. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Медицина, 2003. — 656 с.
18. 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 18 марта 2016 г.

Для цитирования: Пузач С. В., Нгуен Дат Тат. 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.

English

CRITICAL VALUE OF THE CONCENTRATION OF CARBON MONOXIDE AT A FIRE IN THE 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 address: puzachsv@mail.ru)

NGUYEN DAT TAT, Postgraduate Student of 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 features of the defeat of the human body by carbon monoxide are considered. It is shown that the percentage of carboxyhemoglobin in blood determines the degree of person in toxication. It is noted that the experimental study of the effect of CO on the person, as a rule, carried out in an environment where there were no other hazards of fire and the breath of man was calm at a flow rate of pulmonary ventilation of the order of 5–9 l/min.

A mathematical model for calculating the percentage of carboxyhemoglobin in the blood when exposed to CO is proposed. The model takes into account the concentration of CO in the breathing air, the mass of hemoglobin in the blood, the volume rate of ventilation, the volume of the “dead” space of the respiratory, lung diffusion capacity for CO and CO exposure time.

A comparison of the estimated content of carboxyhemoglobin with the experimental data reported in the literature and obtained when exposed to human constant CO concentration during quiet breathing is made. It is shown that the calculated values match with the experimental values with an error not exceeding 27 %.

The results of numerical experiments to determine the concentration of carboxyhemoglobin at an elevated rate of lung ventilation that is typical for fire conditions in the room are presented.

It is shown that the critical value of the concentration of carbon monoxide (0.00116 kg/m^3), adopted in the regulatory and scientific literature on fire safety, may make it impossible for the safe evacuation of people under certain conditions. In the context of the maximum possible volume of pulmonary ventilation rate, the corresponding lung diffusion capacity for CO, for an average adult human at a constant concentration of carbon monoxide, which is close to its critical value, some mild poisoning occurs within 1.06 min, moderately severe — by 2.64 min. When blood hemoglobin minimum weight of an adult, mild poisoning occurs by 0.74 min, and moderately severe — after 1.84 min.

Keywords: fire; carbon monoxide; critical time; carboxyhemoglobin; human in toxication.

REFERENCES

1. Belesnikov I. L. *Sudebno-meditsinskaya otsenka soderzhaniya tsianidov v organakh i tkanyakh lyudey, pogibshikh v usloviyakh pozhara: avtoref. dis. kand. med. nauk* [Forensic medical assessment of the content of cyanide in the organs and tissues of people who died in a fire. Abstr. dr. med. sci. diss.]. Saint Petersburg, 1990. 24 p.

2. Puzach S. V., Smagin A. V., Lebedchenko O. S., Abakumov E. S. *Novyye predstavleniya o raschete neobkhodimogo vremeni evakuatsii lyudey i ob effektivnosti ispolzovaniya portativnykh filtruyushchikh samospasateley pri evakuatsii na pozharakh* [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.
3. Puzach S. V. *Metody rascheta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshchenii i ikh primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezopasnosti* [Methods for calculating the heat and mass transfer in a fire at the premises and their application in solving practical problems of fire safety]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2005. 336 p.
4. 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).
5. 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 hydrogencyanide. *Journal of Fire Sciences*, 1985, vol. 3, no. 2, pp. 115–128. DOI: 10.1177/073490418500300204.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Koshmarov Yu. A. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [Forecasting of fire hazards in the case of indoor fire]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2000. 118 p.
12. Matvienko N. N., Potashnikov P. F., Fedorov N. P., Bayukin M. V., Matvienko A. N. Filtruyushchiye samospasateli i zashchita ot monooksida ugleroda [The filter self-rescuers and protection against carbon monoxide]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2006, vol. 15, no. 5, pp. 48–51.
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 pochetk 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. 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 3 March 2016).
16. Phatkullin K. V., Gilmanov A. Zh., Kostyukov D. V. Klinicheskoye znachenie i sovremennyye metodologicheskiye aspekty opredeleniya urovnya karboksi- i metgemoglobina v krovi [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.
17. Pokrovskiy V. M., Korotko G. F. (eds.). *Fiziologiya cheloveka: uchebnik. 2-e izd.* [Human Physiology. Textbook. 2nd ed.]. Moscow, Meditsina Publ., 2003. 656 p.
18. *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. Kriticheskoye znachenie kontsentratsii monooksida ugleroda pri pozhare v pomeshchenii [Critical value of the concentration of carbon monoxide at a fire in the room]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 6, pp. 5–11. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.5-11.