

# Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении

© С. В. Пузач✉, О. Б. Болдрушкиев

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России  
(Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

## РЕЗЮМЕ

**Введение.** Современные математические модели распространения токсичных газов используют значения удельных коэффициентов образования лишь трех газов, не рассматривая весь спектр токсичных газов, образующихся при горении синтетических материалов, поэтому экспериментальное исследование процесса образования циановодорода представляет собой актуальную задачу.

**Цель и задачи.** Целью статьи является разработка методики получения исходных данных по выделению циановодорода, необходимых для расчета времени блокирования путей эвакуации. Для ее достижения была обоснована величина критической концентрации циановодорода, модернизирована экспериментальная установка и проведены экспериментальные исследования парциальных плотностей циановодорода и монооксида углерода, а также удельных коэффициентов их выделения при горении современной кабельной продукции.

**Методы.** Используется экспериментальный метод исследования процесса образования циановодорода и монооксида углерода при горении образцов кабельной продукции в модернизированной малогабаритной экспериментальной установке. Проведен анализ полученных результатов.

**Результаты.** Обоснована критическая величина парциальной плотности циановодорода, представленная в нормативных документах, на основе анализа данных, приведенных в литературных источниках. Получены экспериментальные зависимости парциальных плотностей циановодорода и монооксида углерода, а также удельных коэффициентов их выделения от времени проведения испытаний. Показано, что в экспериментах парциальная плотность циановодорода достигает своего критического значения, что обосновывает необходимость расчета времени блокирования путей эвакуации с учетом циановодорода.

**Заключение.** Модернизация экспериментальной установки дает возможность получить экспериментальные зависимости парциальных плотностей циановодорода и монооксида углерода, а также удельных коэффициентов их выделения от времени. Это позволяет актуализировать (по HCN и CO) существующую базу данных типовой пожарной нагрузки и проводить расчет времени блокирования путей эвакуации при совместном воздействии вышеуказанных газов. При расчете пожарных рисков в случае горения современной кабельной продукции необходимо определять время блокирования путей эвакуации циановодородом.

**Ключевые слова:** токсичность; продукты горения; математическое моделирование; экспериментальная установка; критическая концентрация; терморазложение; изоляция кабеля.

**Для цитирования:** Пузач С. В., Болдрушкиев О. Б. Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 5. — С. 19–26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26.

✉ Пузач Сергей Викторович, e-mail: puzachsv@mail.ru

## Defining the specific formation coefficient and the critical partial density of hydrogen cyanide and carbon monoxide at the fire indoors

© Sergey V. Puzach✉, Ochir B. Boldrushkiev

State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4,  
Moscow, 129366, Russian Federation)

## ABSTRACT

**Introduction.** Modern mathematical models of the distribution of toxic gases use the values of specific coefficients of formation of only three gases. It is not considered the whole spectrum of toxic gases produced during the combustion of synthetic materials. Therefore, the experimental study of the process of hydrogen cyanide formation is an important task.

**Aims and purposes.** The purpose of this article is to develop a methodology for obtaining initial data on the release of hydrogen cyanide. These data are necessary to calculate the time of blocking evacuation ways. To achieve it, the value of the critical concentration of hydrogen cyanide was justified. The experimental unit was modernized and experimental studies of partial densities of hydrogen cyanide and carbon monoxide, as well as specific coefficients of their release, were carried out during combustion of modern cable products.

**Methods.** An experimental method is used to study the process of formation of hydrogen cyanide and carbon monoxide during the combustion of samples of cable products in a modernized small-size experimental unit. The results were analyzed.

**Results.** The critical value of the partial density of hydrogen cyanide, presented in normative documents, on the basis of analysis of data given in the literature sources, is substantiated. Experimental dependences between the time of testing and partial densities of hydrogen cyanide and carbon monoxide, as well as their specific coefficients of release, were obtained. This study reveals that the experimental value of the partial density of hydrogen cyanide reaches a critical value. That fact justifies the need to calculate the time of blocking the escape routes with considering influence of hydrogen cyanide.

**Conclusion.** The modernization of the experimental unit makes it possible to obtain experimental dependencies on the time of partial densities of hydrogen cyanide and carbon monoxide, as well as specific coefficients of their separation. This makes it possible to update (by HCN and CO) the existing database of typical fire load and to calculate the time of blocking the escape routes in case of combined effects of the above mentioned gases. When calculating fire risks in case of the burning of modern cable products, it is necessary to determine the time of blocking evacuation routes by hydrogen cyanide.

**Keywords:** toxicity; combustion products; mathematical modeling; experimental unit; critical concentration; thermal decomposition; cable insulation.

**For citation:** S. V. Puzach, O. B. Boldrushkiev. Defining the specific formation coefficient and the critical partial density of hydrogen cyanide and carbon monoxide at the fire indoors. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 5, pp. 19–26 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26.

✉ Sergey Viktorovich Puzach, e-mail: puzachsv@mail.ru

## Введение

Основной причиной гибели людей при пожаре является отравление токсичными продуктами горения [1, 2]. Для разработки профилактических противопожарных мероприятий по предотвращению негативного воздействия токсичных газов необходимо проводить математическое моделирование распространения этих газов в объеме рассматриваемых помещений и их воздействия на организм человека. Однако исходных данных для проведения расчетов в случае горения современных веществ и материалов недостаточно [3–5].

База данных типовой пожарной нагрузки [6] не учитывает большую часть токсикантов, образующихся при горении веществ и материалов, а рассматривает только три газа — монооксид и диоксид углерода, хлороводород ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{HCl}$ ). В то же время гибель людей от циановодорода ( $\text{HCN}$ ), акролеина и ряда других газов происходит, по крайней мере, не реже, чем от монооксида углерода [7–10].

Расчет удельного коэффициента образования циановодорода и его концентраций в результате термического разложения горючего материала является трудноразрешимой проблемой, поскольку состав и концентрации продуктов горения зависят как от физико-химических свойств материала, так и от режима горения (концентрация кислорода и т. д.) [3, 11].

Данные по образованию циановодорода есть в ограниченном количестве литературных источников. В работе [7] на основании их анализа приведены значения удельного коэффициента образования циановодорода только для небольшого количества

веществ и материалов (линолеум, изоляция проводов, шерсть, акрилонитрил, полиакрилонитрил, нейлон, древесина с огнезащитными добавками и т. п.). Таким образом, экспериментальное исследование характеристик процесса образования циановодорода представляет собой актуальную научную и практическую задачу.

Целью статьи является разработка методики получения исходных данных по выделению циановодорода, необходимых для расчета времени блокирования путей эвакуации при расчете пожарных рисков.

Для ее достижения была обоснована величина критической концентрации циановодорода, модернизирована экспериментальная установка [3] и проведены экспериментальные исследования парциальных плотностей циановодорода и монооксида углерода, а также удельных коэффициентов их выделения на примере горения современной кабельной продукции (кабель коммуникационный “Low Smoke”, изготовленный в соответствии с ТУ 16.К71-310–2001).

## Критическая концентрация циановодорода

Даже слабое токсичное отравление парализует и дезориентирует человека, препятствуя его своевременной эвакуации [12–15].

Время блокирования путей эвакуации рассматриваемым токсичным газом определяется из условия достижения концентрацией токсичного газа критического для человека значения.

Согласно СП 11.13130.2009 (далее — СП 11) и Методикой определения расчетных величин пожар-

ного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (М.: МЧС России, 2009) “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”.

Циановодород (синильная кислота) считается чрезвычайно токсичным газом [16–18]. Даже при малых концентрациях существует реальная угроза для жизни человека, заключающаяся практически в мгновенной блокировке центральной нервной системы после одного-двух вдохов. Согласно исследованиям [17, 19] раздражение слизистой оболочки глаз и носа происходит при концентрации  $1,11 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup>, а летальный исход наступает при концентрации  $1,11 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup> при 30-минутном воздействии.

Согласно СП 11 критическая парциальная плотность циановодорода  $\rho_{\text{HCN кр}} = 2 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>. Однако эта величина почти в 2 раза превышает указанную выше смертельную концентрацию и примерно в 20 раз — концентрацию, при которой начинаются изменения в состоянии человека, затрудняющие его эвакуацию.

В связи с этим более обоснованно принимать критическое значение парциальной плотности циановодорода  $\rho_{\text{HCN кр}} = 1,1 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup>.

### Постановка задачи экспериментальных исследований

Рассмотрим процесс горения в условно-герметичном мелкомасштабном объеме экспозиционной камеры.

В качестве исследуемых токсичных газов будем рассматривать совместное образование циановодорода и монооксида углерода.

Горючим материалом является кабель коммуникационный “Low Smoke”. Этот тип кабелей с оболочкой LSZH (малодымный безгалогенный компаунд) находит свое применение в помещениях, где обильное образование дыма может нанести ущерб людям и оборудованию. Отсутствие галогенов в данных кабелях способствует снижению скорости и интенсивности дымообразования, что позволяет применять их в закрытых кабельных сооружениях в условиях отсутствия систем дымоудаления. Однако данные по выделению токсичных газов (в том числе HCN) при его горении в литературных источниках отсутствуют.

Таким образом, на базе мелкомасштабной экспериментальной установки необходимо получить экспериментальные зависимости среднеобъемной пар-

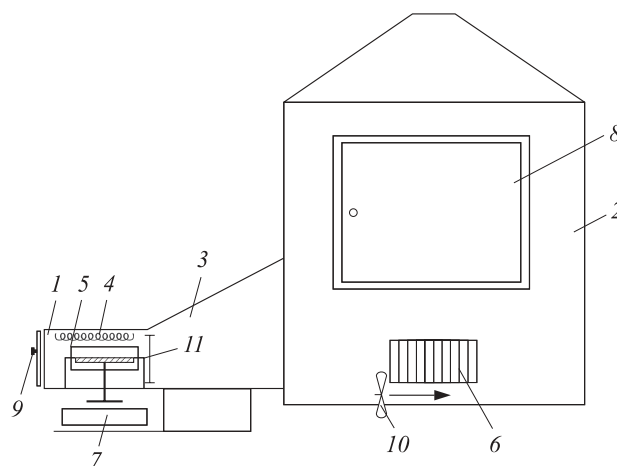
циальной плотности циановодорода и монооксида углерода и удельных массовых коэффициентов их образования от времени с начала опытов, а также проверить, достигнет ли парциальная плотность HCN критического значения.

### Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Схема экспериментальной установки, представленная в работах [20–23], показана на рис. 1, общий вид установки — на рис. 2.

Теплоизолированная камера сгорания 1 с рабочей температурой от 20 до 1200 °С соединена с экспозиционной камерой 2 теплоизолированным переходным рукавом 3, оснащенным устройством теплового блокирования. В камере сгорания установлен экранированный электронагревательный излучатель 4 с датчиком непрерывного контроля температуры и держатель образца 5 на подвижной основе. Камера выполнена из листовой нержавеющей стали толщиной  $(2,0 \pm 0,1)$  мм и объемом  $3 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>. Боковая стенка камеры сгорания оснащена окном из кварцевого стекла, позволяющим наблюдать за образцом при проведении испытаний, а также шиберными отверстиями 6, используемыми для изменения режимов испытаний [20–23].

Экспозиционная камера представляет собой кубический объем  $(0,5887 \text{ м}^3)$  с конусообразной верх-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — камера сгорания; 2 — экспозиционная камера; 3 — переходной рукав; 4 — электронагревательный излучатель; 5 — держатель образца; 6 — шиберные отверстия; 7 — стол для весов; 8 — дверца экспозиционной камеры; 9 — дверца камеры сгорания; 10 — вентилятор; 11 — заслонка (перегородка) переходного рукава [24]

**Fig. 1.** The scheme of the experimental unit: 1 — combustion chamber; 2 — exposure camera; 3 — transition sleeve; 4 — electric heating radiator; 5 — sample holder; 6 — gate holes; 7 — table for scales; 8 — door of the exposure chamber; 9 — door of the combustion chamber; 10 — the fan; 11 — damper (partition) of the transition sleeve [24]



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Fig. 2. General view of the experimental unit

ней частью. На двух боковых стенках установлены шибберные отверстия. По всему экспозиционному объему расположены 32 низкоинерционных бронированных термопары для непрерывного контроля температуры в рассматриваемом объеме. Данные термопары имеют диапазон измерений от минус 40 до +1100 °C с погрешностью не более  $\pm 1,5t$  (°C).

Держатель образцов размещается на электронных весах 7, которые расположены на подвижном столе и имеют погрешность не более  $\pm 1$  мг.

Контроль над плотностью теплового потока, падающего на образец, подвергшийся испытаниям, осуществляется с помощью водоохлаждаемого датчика типа Гордона и регистрирующего прибора с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ. Погрешность измерения плотности теплового потока не превышает  $\pm 8$  %.

Постоянный контроль состава газовой среды в экспозиционной камере осуществляется с помощью многоканального газоанализатора, измеряющего концентрацию оксида углерода с диапазоном измерений от 0 до 1 % об. и допустимой погрешностью  $\pm 10$  %; концентрацию диоксида углерода — с диапазоном измерений от 0 до 5 % об. и допустимой погрешностью  $\pm 10$  %; концентрацию кислорода — с диапазоном измерений от 0 до 21 % об. и допустимой погрешностью  $\pm 10$  % об.

Модернизация установки заключается в том, что система измерений концентраций газов внутри экспозиционной камеры дополнена газоанализатором для измерения концентраций HCN с диапазоном измерений от 0 до 0,01 % об. и допустимой погрешностью  $\pm 1$  %.

Непосредственно перед проведением испытаний изготавливаются образцы исследуемого материала размерами 100×100 мм. Затем они подвергаются кон-

денсации в течение 12 ч при комнатной температуре 20 °C.

Испытание начинается с запуска контура нагревательного элемента, включения ПК и запуска регистрирующих программ с последующей проверкой отклика датчиков. После этого ступенчато задается рабочая температура (766 °C) и плотность падающего теплового потока (60 кВт/м<sup>2</sup>). При выходе температуры и плотности на установленные значения открывают заслонку переходного рукава и дверцу камеры сгорания, после чего предварительно взвешенный образец материала помещают в камеру сгорания и закрывают дверцу [23].

В ходе проведения испытания фиксируются следующие показатели:

- масса образца в ходе испытания (каждые 3–10 с);
- температура в объеме экспозиционной камеры;
- концентрация газов, входящих в состав продуктов горения, а именно CO<sub>2</sub>, CO, HCN, O<sub>2</sub>;
- оптическая плотность дыма.

Удельные коэффициенты образования CO ( $L_{CO}$ ) и HCN ( $L_{HCN}$ ) в каждый момент времени определяются по формулам:

$$L_{CO} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{CO}}{d\tau}; \quad (1)$$

$$L_{HCN} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{HCN}}{d\tau}, \quad (2)$$

где  $V$  — объем экспозиционной камеры, м<sup>3</sup>;

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

$\rho_{HCN}$  — среднееобъемная плотность HCN в экспозиционной камере, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  — время от начала испытаний, с;

$\rho_{CO}$  — среднееобъемная плотность CO в экспозиционной камере, кг/м<sup>3</sup>.

### Исходные данные

Исследовались три образца изоляции кабеля “Low Smoke” с первоначальной массой 0,073 кг и размерами 100×100 мм.

Критическое значение парциальной плотности монооксида углерода  $\rho_{CO\text{ кр}} = 1,16 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>.

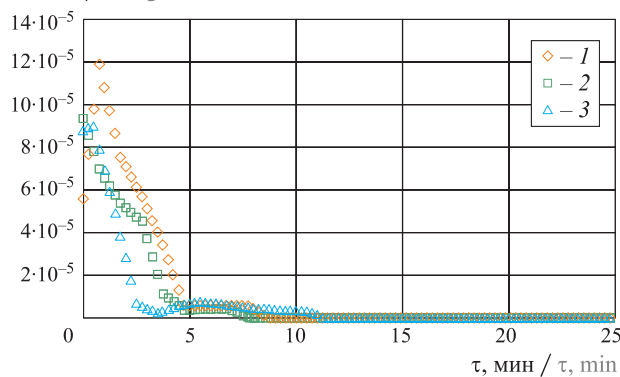
Критическое значение парциальной плотности HCN принимаем  $\rho_{HCN\text{ кр}} = 1,1 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup>.

Температура в помещении при проведении экспериментов 23 °C, давление 753 мм рт. ст., влажность воздуха 38 %.

### Результаты экспериментов и их анализ

Зависимости массовой скорости выгорания изоляции кабеля “Low Smoke” от времени представлены на рис. 3.



$\Psi$ , кг/с /  $\Psi$ , kg/sec

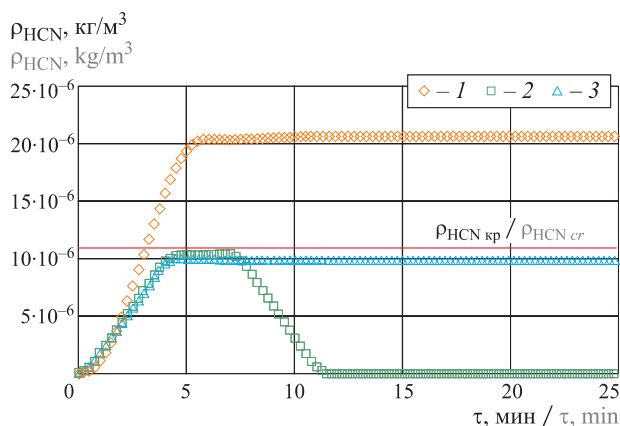
**Рис. 3.** Зависимость массовой скорости выгорания от времени горения изоляции кабеля “Low Smoke”: 1–3 — номера экспериментов

**Fig. 3.** The dependence of mass burning rate on burning time of cable insulation “Low Smoke”: 1–3 — numbers of experiments

Зависимости среднеобъемной парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода, а также удельных массовых коэффициентов их образования от времени с начала опытов представлены на рис. 4–7.

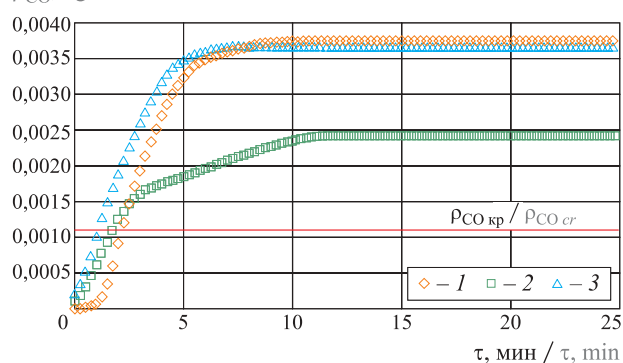
Из рис. 4 видно, что парциальная плотность HCN достигает своего критического значения через 2,9 мин. Таким образом, при расчете пожарного риска в помещениях, где находится кабель “Low Smoke”, для обеспечения выполнения условия безопасной эвакуации людей необходимо проводить расчет времени блокирования путей эвакуации циановодородом.

Из рис. 5 видно, что парциальная плотность CO становится равной критическому значению  $\rho_{CO\text{ кр}} = 1,16 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> [6] через 1,2–2,2 мин. Однако, как показано в работе [20], более точным критерием безопасности для человека является достижение удельной массы карбоксигемоглобина в его крови, образующегося при поступлении CO в организм, значения 0,2.



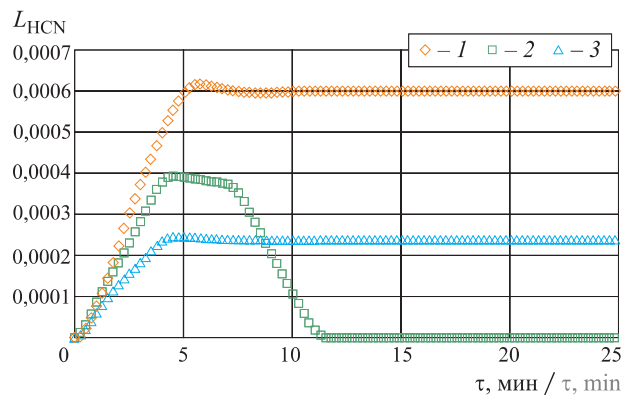
**Рис. 4.** Зависимость парциальной плотности HCN от времени при горении кабеля “Low Smoke”: 1–3 — номера экспериментов

**Fig. 4.** The dependence of the partial density of HCN on the burning time of the cable “Low Smoke”: 1–3 — numbers of experiments

 $\rho_{CO}$ , кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho_{CO}$ , kg/m<sup>3</sup>

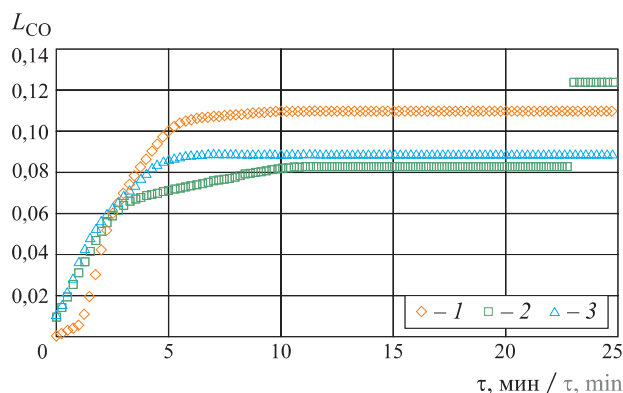
**Рис. 5.** Зависимость парциальной плотности CO от времени при горении кабеля “Low Smoke”: 1–3 — номера экспериментов

**Fig. 5.** The dependence of the partial density of CO on the burning time of the cable “Low Smoke”: 1–3 — numbers of experiments



**Рис. 6.** Зависимость удельного массового коэффициента образования HCN от времени при горении кабеля “Low Smoke”: 1–3 — номера экспериментов

**Fig. 6.** The dependence of the specific mass formation coefficient of HCN from the burning time of the cable “Low Smoke”: 1–3 — numbers of experiments



**Рис. 7.** Зависимость удельного массового коэффициента образования CO от времени при горении кабеля “Low Smoke”: 1–3 — номера экспериментов

**Fig. 7.** The dependence of the specific mass formation coefficient of CO from the burning time of the cable “Low Smoke”: 1–3 — numbers of experiments

Средние значения удельного массового коэффициента образования HCN в данных экспериментах  $L_{\text{HCN}} = 0,00021 \div 0,00056$ , что близко к значениям для изоляции кабелей других типов, представленным в литературных источниках:  $L_{\text{HCN}} = 0,00032 \div 0,000396$  [7].

### Заключение

Представленное в СП 11.13130.2009 значение критической плотности HCN, необходимое для расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом, является существенно завышенным, что может привести к недооценке пожарной опасности и гибели людей.

Модернизация экспериментальной установки [20–23] дает возможность получить экспериментальные зависимости парциальных плотностей циано-

водорода и монооксида углерода, а также удельных коэффициентов их выделения от времени. Это позволяет расширить (по HCN) и уточнить (по CO) существующую базу данных типовой пожарной нагрузки и проводить расчет времени блокирования путей эвакуации при совместном воздействии вышеуказанных газов.

Эксперименты показали, что при использовании в помещении кабелей коммуникационных “Low Smoke” парциальная плотность циановодорода достигает критического значения. В связи с этим при расчете пожарных рисков для обоснования выполнения условия безопасной эвакуации людей при горении современной кабельной продукции необходимо определять времена блокирования путей эвакуации токсичными газами с учетом циановодорода.

### 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. — 11 с.
2. Stec A. A., Hull T. R. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials // *Energy and Buildings*. — 2011. — Vol. 43, Issue 2-3. — P. 498–506. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.015.
3. Пузач С. В., Доан В. М., Нгуен Т. Д., Сулейкин Е. В., Акперов Р. Г. Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении : монография / Под ред. С. В. Пузача. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2017. — 130 с.
4. 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.
5. Kim N.-K., Cho N.-W., Rie D.-H. A study on the risk of particulate materials included in the combustion products of building materials // *Fire Science and Engineering*. — 2016. — Vol. 30, Issue 1. — P. 43–48. DOI: 10.7731/KIFSE.2016.30.1.043.
6. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. — М. : Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
7. 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.
8. Anderson R. A., Harland W. A. Fire Deaths in the Glasgow Area: III the Role of Hydrogen Cyanide // *Medicine, Science and the Law*. — 1982. — Vol. 22, Issue 1. — P. 35–40. DOI: 10.1177/002580248202200106.
9. Sweeney L. M., Sommerville D. R., Goodwin M. R., James R. A., Channel S. R. Acute toxicity when concentration varies with time: A case study with carbon monoxide inhalation by rats // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. — 2016. — Vol. 80. — P. 102–115. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.014.
10. Pauluhn J. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: Comparison of models to disentangle the concentration  $\times$  time conundrum of lethality and incapacitation // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. — 2016. — Vol. 80. — P. 173–182. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.017.
11. Эркенов Р. Х., Эгизов С. К., Мещеряков А. В., Плаксицкий А. Б. Технические исследования процессов механодеструкции строительных полимерных материалов // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. — 2018. — Т. 1, № 9. — С. 1018–1019.
12. Treitman R. D., Burgess W. A., Gold A. Air contaminants encountered by firefighters // *American Industrial Hygiene Association Journal*. — 1980. — Vol. 41, Issue 11. — P. 796–802. DOI: 10.1080/15298668091425662.
13. Холщевников В. В., Самошин Д. А., Парфененко А. П., Кудрин И. С., Истратов Р. Н., Белосохов И. Р. Эвакуация и поведение людей при пожарах. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. — 262 с.
14. Самошин Д. А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. — 210 с.

15. Orloff K. G., Kaplan B., Kowalski P. Hydrogen cyanide in ambient air near a gold heap leach field: Measured vs. modeled concentrations // *Atmospheric Environment*. — 2006. — Vol. 40, Issue 17. — P. 3022–3029. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.09.089.
16. Anseeuw K., Delvaux N., Burillo-Putze G., De Iaco F., Geldner G., Holmström P., Lambert Y., Sabbe M. Cyanide poisoning by fire smoke inhalation: a European expert consensus // *European Journal of Emergency Medicine*. — 2013. — Vol. 20, Issue 1. — P. 2–9. DOI: 10.1097/MEJ.0b013e328357170b.
17. Иличкин В. С., Фукалова А. А. Токсичность продуктов горения полимерных материалов : обзорная информация. — М. : ГИЦ, 1987. — 68 с.
18. 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, Issue 2. — P. 115–128. DOI: 10.1177/073490418500300204.
19. Kaplan H. L., Hartzell G. E. Modeling of toxicological effects of fire gases: I. Incapacitation effects of narcotic fire gases // *Journal of Fire Sciences*. — 1984. — Vol. 2, Issue 4. — P. 286–305. DOI: 10.1177/073490418400200404.
20. Пузач С. В., Нгуен Там Дат. Критическая концентрация монооксида углерода при пожаре в помещении // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. — 2016. — Т. 1, № 1. — С. 181–183.
21. Пузач С. В., Акперов Р. Г. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования монооксида углерода при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 5. — С. 18–25. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25.
22. Пузач С. В., Сулейкин Е. В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 2. — С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
23. Пузач С. В., Сулейкин Е. В., Акперов Р. Г., Пузач В. Г. Об экспериментальной оценке токсичности продуктов горения при пожаре в помещении // *Технологии техносферной безопасности*. — 2013. — Вып. 4(50). — 11 с.

## REFERENCES

1. I. L. Beleshnikov. *Forensic medical assessment of the content of cyanide in the organs and tissues of people who died in a fire*. Abstr. Cand. Sci. (Med.) Diss. Saint Petersburg, 1996. 11 p. (in Russian).
2. A. A. Stec, T. R. Hull. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43, issue 2-3, pp. 498–506. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.015.
3. S. V. Puzach, V. M. Doan, T. D. Nguen, E. V. Suleykin, R. G. Akperov. *Obrazovaniye, rasprostraneniye i vozdeystviye na cheloveka toksichnykh produktov goreniya pri pozhare v pomeshchenii* [The formation, distribution and effects on humans of toxic products of combustion at the fire indoors]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2017. 130 p. (in Russian).
4. S. V. Puzach. *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. (in Russian).
5. N.-K. Kim, N.-W. Cho, D.-H. Rie. A study on the risk of particulate materials included in the combustion products of building materials. *Fire Science and Engineering*, 2016, vol. 30, issue 1, pp. 43–48. DOI: 10.7731/KIFSE.2016.30.1.043.
6. Yu. A. Koshmarov. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [The prediction of dangerous fire factors in the room]. Moscow, State Fire Academy of Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2000. 118 p. (in Russian).
7. S. V. Puzach, A. V. Smagin, O. S. Lebedchenko, E. S. Abakumov. *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. (in Russian).
8. R. A. Anderson, W. A. Harland. Fire deaths in the Glasgow Area: III the role of hydrogen cyanide. *Medicine, Science and the Law*, 1982, vol. 22, issue 1, pp. 35–40. DOI: 10.1177/002580248202200106.
9. L. M. Sweeney, D. R. Sommerville, M. R. Goodwin, R. A. James, S. R. Channel. Acute toxicity when concentration varies with time: A case study with carbon monoxide inhalation by rats. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2016, vol. 80, pp. 102–115. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.014.
10. J. Pauluhn. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: Comparison of models to disentangle the concentration × time conundrum of lethality and incapacitation. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2016, vol. 80, pp. 173–182. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.017.

11. R. H. Erkenov, S. K. Egizov, A. V. Meshcheryakov, A. B. Plaksitsky. Technical research of processes of mehanodestruction of building polymer materials. *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy / Fire Safety: Problems and Prospects*, 2018, vol. 1, no. 9, pp. 1018–1019 (in Russian).
12. R. D. Treitman, W. A. Burgess, A. Gold. Air contaminants encountered by firefighters. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1980, vol. 41, issue 11, pp. 796–802. DOI: 10.1080/15298668091425662.
13. V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin, A. P. Parfenenko, I. S. Kudrin, R. N. Istratov, I. R. Belosokhov. *Evakuatsiya i povedeniye lyudey pri pozharakh* [Evacuation and behavior of people during fires]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2015. 262 p. (in Russian).
14. D. A. Samoshin. *Sostav lyudskikh potokov i parametry ikh dvizheniya pri evakuatsii* [The composition of human flows and the parameters of their movement during evacuation]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2016. 210 p. (in Russian).
15. K. G. Orloff, B. Kaplan, P. Kowalski. Hydrogen cyanide in ambient air near a gold heap leach field: Measured vs. modeled concentrations. *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, issue 17, pp. 3022–3029. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.09.089.
16. K. Anseuw, N. Delvau, G. Burillo-Putze, F. De Iaco, G. Geldner, P. Holmström, Y. Lambert, M. Sabbe. Cyanide poisoning by fire smoke inhalation: a European expert consensus. *European Journal of Emergency Medicine*, 2013, vol. 20, issue 1, pp. 2–9. DOI: 10.1097/MEJ.0b013e328357170b.
17. V. S. Ilichkin, A. A. Fukalova. *Toksichnost produktov goreniya polimernykh materialov: obzornaya informatsiya* [Toxicity of combustion products of polymeric materials. Overview]. Moscow, GITs Publ., 1987. 68 p. (in Russian).
18. G. E. Hartzell, D. N. Priest, W. G. Switzer. 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, issue 2, pp. 115–128. DOI: 10.1177/073490418500300204.
19. H. L. Kaplan, G. E. Hartzell. Modeling of toxicological effects of fire gases: I. Incapacitation effects of narcotic fire gases. *Journal of Fire Sciences*, 1984, vol. 2, issue 4, pp. 286–305. DOI: 10.1177/073490418400200404.
20. S. V. Puzach, Tat Dat Nguen. Critical carbon monoxide concentration in an indoor fire. *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy / Fire Safety: Problems and Prospects*, 2016, vol. 1 no. 1, pp. 181–183 (in Russian).
21. S. V. Puzach, R. G. Akperov. Experimental determination of the specific coefficient of release of carbon monoxide during a fire in the room. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 5, pp. 18–25 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25.
22. S. V. Puzach, E. V. Suleykin. New united theoretical and experimental approach to the calculation of the distribution of toxic gases in case of fire in the room. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 2, pp. 13–20 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
23. S. V. Puzach, E. V. Suleikin, R. G. Akperov, V. G. Puzach. About experimental toxicity assessment of combustion products at fire in premise. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2013, issue 4(50). 11 p. (in Russian).

Поступила 01.07.2019, после доработки 26.08.2019;  
принята к публикации 16.09.2019

Received 1 July 2019; Received in revised form 26 August 2019;  
Accepted 16 September 2019

#### Информация об авторах

**ПУЗАЧ Сергей Викторович**, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 7003537835; Researcher ID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**БОЛДРУШКИЕВ Очир Баатрович**, адъюнкт кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы МЧС; г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7127-5608; e-mail: avadanonstop@mail.ru

#### Information about the authors

**Sergey V. PUZACH**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; Author ID: 7003537835; Researcher ID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**Ochir B. BOLDRUSHKIEV**, Postgraduated Student, Thermal Physics and Hydraulic Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7127-5608; e-mail: avadanonstop@mail.ru