

UDC 614.841

## **НОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОЧЕРЕДНОСТИ НАСТУПЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИЯХ**

**С. В. Пузач<sup>1</sup>, А. В. Смагин<sup>1</sup>, О. С. Лебедченко<sup>1</sup>, В. Г. Пузач<sup>2</sup>, Ю. А. Поляков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

Знание очередности наступления критических значений опасных факторов пожара (ОФП) (потеря видимости, температура, излучение, токсичные газы, мелкодисперсные твердые и жидкие частицы дыма, пониженное содержание кислорода) позволяет уменьшить риск гибели людей, спрогнозировать их самочувствие во время эвакуации и последствия для их здоровья в результате воздействия ОФП, а также сформулировать требования к портативным фильтрующим самоспасателям (маскам, капюшонам и т. д.), используемым во время эвакуации.

Очередность наступления критических значений ОФП в помещении зависит от большого числа факторов (объемно-планировочные решения здания, теплофизические и химические свойства горючих веществ и т. д.) [1, 2] и комплексно до настоящего времени не изучалась.

### **1. Выбор и анализ исходных данных для проведения численных экспериментов**

Определение критической продолжительности пожара по отдельным ОФП, в первую очередь, требует знания свойств горючих материалов, находящихся в помещении.

Выполнен сравнительный анализ существующей базы данных [2] горючей нагрузки и литературных источников [3, 4] по образованию токсичных компонентов, потреблению кислорода и дымовыделению в случае горения индивидуальных веществ и комбинированных пожарных нагрузок.

Проведенный анализ показывает, что при пожаре в помещении выделяется более десятка токсичных газов, опасность которых по токсичности в несколько раз превосходит предельно-допустимые концентрации.

Кроме того, существуют значительные отличия в экспериментальных значениях контрольных параметров по токсичности при сгорании одинаковых материалов в различных литературных источниках. Это объясняется тем, что условия проведения экспериментов различаются объемно-планировочными решениями (геометрия помещения, количество и расположение проемов и т. д.), массой сгорающего материала, а также условиями его термического разложения и горения.

Следовательно, обоснованный выбор теплофизических и химических свойств горючих материалов играет существенную роль при расчете динамики ОФП, соответствующей реальной термогазодинамической картине пожара.

На реальных пожарах [4] изучался вред, наносимый пожарным от воздействия токсичных газов, в частности, мониторингу подвергли акролеин, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HCl, NO<sub>2</sub>, HCN и микрочастицы (твердая и жидкая фаза), которые, по результатам ранее проведенных исследований, оказывают наиболее вредное воздействие на организм пожарного.

Результаты исследований [4] показали, что:

- акролеин является одним из самых опасных веществ на пожаре, вызывающий раздражающий эффект; в 52 % случаев его концентрация превышала краткосрочную предельно-допустимую величину и в 10 % концентрация была больше действующей опасной концентрации для жизни и здоровья человека;

- оксид углерода присутствует при всех замерах на пожарах; уровень превышения краткосрочной предельно-допустимой величины составил 18 % случаев, действующей опасной концентрации для жизни и здоровья человека – 4,5 %;
- микрочастицы достигают концентраций, которые оказывают раздражающее действие, при всех замерах;
- двуокись углерода присутствует во всех замерах, но ее концентрация не достигает даже среднесуточных предельно-допустимых концентраций.

Наиболее опасными, согласно анализу литературных источников, являются акролеин, окись углерода и циановодород. Акролеин достаточно часто достигает предельных концентраций в начальной стадии пожара в интервале температур 25-30 °С, когда другие ОФП ещё долго не проявляют себя, кроме того, вероятность наступления критической концентрации акролеина, как первого ОФП, очень высока, так как для многих пожарных нагрузок сведения о выделении акролеина при горении отсутствуют. Поэтому, используемая при проведении научных исследований и практических расчетов по определению необходимого времени эвакуации людей база данных [2], учитывающая образование только окиси и двуокиси углерода и соляной кислоты, недооценивает риск гибели и нанесения вреда здоровью людей во время эвакуации.

База данных [2] расширена по удельным коэффициентам выделения акролеина, синильной кислоты и ряда других токсичных газов [3]. Например, удельное выделение акролеина в случае горения древесины составляет  $L_{акр} = 4 \cdot 10^{-3} - 4,86 \cdot 10^{-3}$  кг/кг [3]. В случае горения линолеума и изоляции проводов удельное выделение синильной кислоты равно  $L_{HCN} = 3,2 \cdot 10^{-4} - 3,96 \cdot 10^{-4}$  кг/кг [3].

## 2. Математические модели расчета тепломассообмена при пожаре

Математические модели расчета тепломассообмена при пожаре по уровню детализации термогазодинамической картины пожара разделяются на следующие виды: интегральная, зонная и полевая [1, 2].

Частный случай интегральной модели - ее аналитическое решение, которое получено при следующих упрощениях термогазодинамической картины пожара: проемы работают только на выброс смеси газов наружу, коэффициент теплопотерь принимается постоянным, выделение токсичных газов при сгорании 1 кг материала постоянно и не зависит от концентрации кислорода и т. д.

Критические продолжительности пожара по повышенной температуре и по каждому из газообразных токсичных продуктов горения имеют соответственно вид [2]:

$$\tau_{кр}^T = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[ 1 + \frac{70 - t_0}{(273 + t_0)Z} \right] \right\}^{1/n}, \quad (1)$$

$$\tau_{кр}^{T,г} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[ 1 - \frac{VX}{BLZ} \right]^{-1} \right\}^{1/n}, \quad (2)$$

где  $B = \frac{353c_p V}{(1 - \varphi)\eta Q_n^p}$  – размерный комплекс;  $t_0$  – начальная температура воздуха в помеще-

щении;  $n$  – показатель степени, учитывающий изменение массы выгорающего материала по времени;  $A$  – размерный параметр;  $Z$  – безразмерный параметр, учитывающий неравномерность распределения ОФП по высоте помещения;  $Q_n^p$  – низшая рабочая теплота сгорания материала;  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость газа;  $\varphi$  – коэффициент

теплопотерь;  $\eta$  – коэффициент полноты сгорания;  $V$  – свободный объем помещения;  $L$  – удельный выход токсичного газа при сгорании 1 кг материала;  $X$  – предельно допустимое содержание токсичного газа в помещении.

В интегральных моделях искомыми параметрами являются среднеобъемные величины давления, температуры, плотности, массовых концентраций кислорода, токсичных продуктов горения, огнетушащего вещества и оптической концентрации дыма. Рассматриваем интегральную модель, подробно приведенную в [1].

Используемая зонная модель [9] является модификацией метода расчета [2]. Отличие заключается в формуле для определения массового расхода по сечению конвективной колонки, учитывающей реальное расположение протяженного источника тепловыделения выше поверхности горючего материала, охваченной горением (в [2] – точечный источник, расположенный ниже вышеуказанной поверхности):

$$\frac{dG}{dz} = \frac{B_c z (r + z \operatorname{tg} \gamma)^4}{T_0 A_c G (GT_0 + B_c z)} + \frac{2G \operatorname{tg} \gamma}{r + z \operatorname{tg} \gamma} - \frac{B_c}{T_0} \left( 1 - \frac{2z \operatorname{tg} \gamma}{r + z \operatorname{tg} \gamma} \right), \quad (3)$$

где  $G$  – массовый расход по сечению конвективной колонки;  $z$  – высота от уровня пола;  $A_c, B_c$  – размерные параметры;  $r$  – эквивалентный радиус поверхности горючего материала;  $\gamma$  – угол полуоткрытия конвективной колонки.

Наиболее современным и перспективным методом расчета динамики ОФП является полевая модель, которая состоит из нестационарных трехмерных дифференциальных уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии для газовой среды помещения, а также для компонентов газовой среды и оптической плотности дыма. Все дифференциальные уравнения приведены виду, удобному для численного решения:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \Phi) + \operatorname{div} (\rho w \Phi) = \operatorname{div} (\Gamma \operatorname{grad} \Phi) + S, \quad (4)$$

где  $\Phi$  – зависимая переменная (энтальпия смеси, проекции скорости на координатные оси, концентрации компонентов газовой смеси ( $O_2, CO, HCl, \text{акролеин, циановодород, } CO_2, N_2, H_2O$ ), оптическая плотность дыма, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации);  $\Gamma$  – коэффициент диффузии для  $\Phi$ ;  $S$  – источниковый член;  $\rho$  – плотность;  $w$  – скорость;  $\tau$  – время. Все величины являются осредненными по времени. Параметры и коэффициенты уравнения (4) приведены в [1].

Разработана программа [10] для численного решения на ЭВМ всех типов математических моделей.

### 3. Моделирование образования окиси углерода при горении

Монооксид углерода выделяется при сгорании практически всех материалов (около 95 %) [2, 3, 5, 6]. При этом его концентрации, при определённых условиях, достигают смертельных значений спустя небольшой промежуток времени.

Методики прогнозирования ОФП [2] предполагают, что химическая реакция образования CO является прямой, и не учитывают её обратимость, что в значительной степени может повлиять на необходимое время эвакуации людей при пожаре.

Процесс образования CO при сгорании горючего материала протекает по следующим основным химическим реакциям [7]:



Помимо рассмотренных продуктов реакции могут образовываться  $H_2, H_2O, NO_x, CH_4$ .

Проблема исследования рассматриваемого химического процесса заключается в том, что одновременно могут протекать все четыре основные и второстепенные реакции и определить количественный выход конечного продукта реакции бывает очень сложно, так как образование CO и CO<sub>2</sub> зависит от термогазодинамических условий протекания пожара: характеристики турбулентности, температура в помещении, концентрация кислорода в зоне реакции, количество сгорающего материала и т. д.

Математическая модель расчета значений удельного коэффициента выделения оксида углерода получена из аналитического решения [2] интегральной модели.

Система уравнений для определения выделения окиси углерода при пожаре имеет вид:

$$\rho_{CO} = \frac{c_p T_o L_{CO}}{(1 - \varphi) Q_H^p} \rho_o, \quad (6)$$

$$p_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_a, \quad (7)$$

$$p_{CO} = \left[ \frac{K_{p_2} \cdot K_{p_3} \cdot K_{p_4}}{K_{p_1}} \cdot p_{O_2} \right]^{0,5}, \quad (8)$$

$$\rho_{CO} = \frac{p_{CO}}{R_{CO} \cdot T}, \quad (9)$$

где  $L_{CO}$  – удельный коэффициент выделения оксида углерода;  $\rho_{CO}$  – парциальная плотность CO;  $p_{CO}$ ,  $p_{O_2}$  – парциальные давления окиси углерода и кислорода;  $p_a$  – атмосферное давление;  $T$  – температура в помещении;  $\rho_o$  – начальная плотность воздуха в помещении;  $T_o$  – начальная температура воздуха в помещении;  $r_{O_2}$  – объемная доля кислорода;  $R_{CO}$  – газовая постоянная CO;  $K_{p_1}$ ,  $K_{p_2}$ ,  $K_{p_3}$ ,  $K_{p_4}$  – константы равновесия химических реакций (5).

Проведены расчеты, определяющие зависимость удельного коэффициента выделения оксида углерода в зависимости от температуры, объемной концентрации кислорода и коэффициента теплопотерь для всех пожарных нагрузок [2].

На рис. 1 представлены зависимости удельного коэффициента выделения оксида углерода от температуры при  $r_{O_2} = 0,19$  и  $\varphi = 0,8$  в случае горения: хвойных древесных стройматериалов; радиоматериалов (полиэтилен, полистирол, полипропил), гетинакса; ацетона.

Определим, при каких условиях пожара зафиксированы значения в базе данных [2]:

- стройматериалы:  $L_{CO} = 0,024$  [2] соответствует расчету при  $T = 1100$  К,  $r_{O_2} = 0,14$ ,  $\varphi = 0,5$ ;

- радиоматериалы (полиэтилен, полистирол, полипропил), гетинакс:  $L_{CO} = 0,1$  [2] при  $T = 1100$  К,  $r_{O_2} = 0,14$ ,  $\varphi = 0,2$ ;

- ацетон:  $L_{CO} = 0,269$  [2] при  $T = 1300$  К,  $r_{O_2} = 0,14$ ,  $\varphi = 0,2$ .

Сопоставление с экспериментальными данными [8] показало, что отличие теоретического значения отношения концентраций окиси и двуокиси углерода к его экспериментальной величине не превышает 11,5 %, например:

- горение древесины ( $r_{O_2} = 0,013$ ):  $(X_{CO}/X_{CO_2})_{теор} = 0,398$ ;  $(X_{CO}/X_{CO_2})_{эксп} = 0,36$ ;

- горение резины ( $r_{O_2} = 0,0737$ ):  $(X_{CO}/X_{CO_2})_{теор} = 0,29$ ;  $(X_{CO}/X_{CO_2})_{эксп} = 0,26$ .

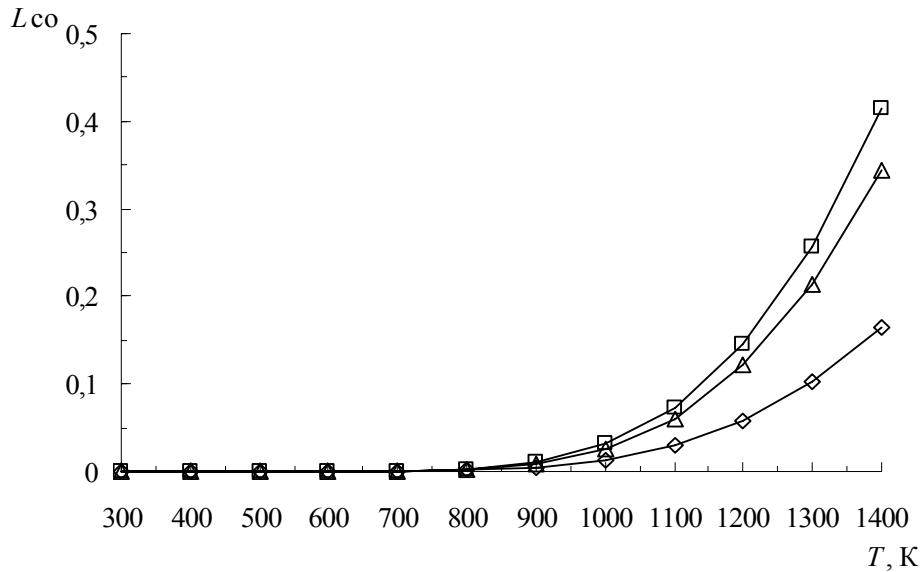


Рис. 1. Зависимости удельного коэффициента выделения монооксида углерода от температуры при  $r_{O_2} = 0,19$  и  $\varphi = 0,8$ :  $\Delta$  – радиоматериалы (полиэтилен, полистирол, полипропил), гетинакс;  $\diamond$  – хвойные древесные стройматериалы;  $\square$  – ацетон

#### 4. Результаты численного эксперимента и их анализ

Выполнены численные эксперименты по исследованию очередности наступления критических значений различных ОФП в помещениях для всех приведенных в [2, 3] индивидуальных веществ и комбинированных пожарных нагрузок с использованием всех типов математических моделей расчета тепломассообмена при пожаре (аналитическое решение интегральной модели, интегральная, зонная и полевая модели) [1, 2].

Рассматривались портативные фильтрующие самоспасатели «Феникс» с защитой и без защиты от окиси углерода.

За время эффективного применения самоспасателя принималась разница по времени:

- между достижением плотности токсичного газа величины аварийного предела воздействия в подмасочном пространстве и достижением плотности токсичного газа в помещении без использования самоспасателя (при условии, что первыми ОФП в помещении не наступала ни повышенная температура, ни пониженная концентрация кислорода):

$$\tau_{\text{эф1}} = \tau_2 - \tau_1; \quad (10)$$

- между достижением концентрации токсичного газа в помещении величины аварийного предела воздействия и достижением температурой или пониженной концентрацией кислорода воздуха соответствующих критических параметров в помещении:

$$\tau_{\text{эф2}} = \tau_{\text{кр}}^T - \tau_1 \text{ или } \tau_{\text{эф2}} = \tau_{\text{кр}}^{O_2} - \tau_1; \quad (11)$$

где  $\tau_1$  – время, за которое плотность исследуемого токсичного газа достигнет концентрации аварийного предела воздействия в помещении без использования самоспасателя;  $\tau_2$  – время, за которое исследуемый токсичный газ достигнет концентрации аварийного предела воздействия в подмасочном пространстве самоспасателя.

При определении времени эффективного использования самоспасателя не учитывалась опасность от потери видимости в дыму. При этом полагаем, что эвакуация может продолжаться после достижения величиной видимости в помещении ее критического зна-

чения  $l_{пр} = 20$  м до наступления любого другого ОФП в подмасочном пространстве самоспасателя.

Математическое моделирование с использованием аналитического решения интегральной модели (формулы (1) и (2)) проводилось для помещений в виде параллелепипеда объемом 108, 500 и 1000 м<sup>3</sup> с высотой 3, 4 и 5 м соответственно.

В табл. 1 представлена часть результатов сравнительной оценки опасности отдельных продуктов горения при пожаре с использованием базы данных параметров горючей нагрузки [2] и анализа данных [3].

Таблица 1.

Оценка опасности продуктов горения при пожаре

| №  | Горючий материал   | Опасность продукта горения, [2]/[3] |           |                 |        |        |
|----|--|-------------------------------------|-----------|-----------------|--------|--------|
|    |  | HCN                                 | Акролеин  | CO <sub>2</sub> | CO     | HCl    |
| 1  | Мебель + бытовые изделия   | н.д./н.д.                           | н.д./ +   | -/-             | -/+    | +/н.д. |
| 2  | Мебель + ткани   | н.д./н.д.                           | н.д./ +   | -/-             | -/+    | +/н.д. |
| 3  | Кабинет: мебель + бумага (0,75+0,25)                                     | н.д./н.д.                           | н.д./ +   | -/-             | -/+    | 0/н.д. |
| 4  | Помещение, облицованное панелями ДВП                                     | н.д./н.д.                           | н.д./н.д. | -/н.д.          | -/н.д. | 0/н.д. |
| 5  | Лекарствен. препараты: этиловый спирт + глицерин (0,95+0,05)             | н.д./н.д.                           | н.д./н.д. | -/н.д.          | +/н.д. | 0/н.д. |
| 6  | Общественные здания: мебель + линолеум ПВХ (0,9+0,1)                     | н.д./н.д.                           | н.д./ +   | -/н.д.          | -/н.д. | +/+    |
| 7  | Библиотеки, архивы: книги, журналы на стеллажах                          | н.д./н.д.                           | н.д./ +   | -/н.д.          | -/н.д. | 0/-    |
| 8  | Сценическая часть зрительного зала: древесина                            | н.д./н.д.                           | н.д./ +   | -/-             | -/+    | 0/н.д. |
| 9  | Верхняя одежда: ворс, ткани (шерсть + нейлон)                            | н.д./+                              | н.д./н.д. | -/н.д.          | -/н.д. | 0/н.д. |
| 10 | Окрашенные полы, стены: дерево + краска РХО (0,9+0,1)                    | н.д./ +                             | н.д./ +   | -/-             | -/+    | -/н.д. |
| 11 | Бензин А-76  | н.д./н.д.                           | н.д./н.д. | -/н.д.          | -/н.д. | 0/н.д. |
| 12 | Телефонный кабель ТПВ: ПВХ + полиэтилен                                  | н.д./ -                             | н.д./н.д. | -/н.д.          | -/н.д. | +/+    |
| 13 | Штабель древесины; хвойный + лиственный лес                              | н.д./н.д.                           | н.д./ +   | -/-             | -/+    | 0/н.д. |
| 14 | Сырьё для легкой промышленности: шерсть                                  | н.д./ +                             | н.д./н.д. | -/н.д.          | -/н.д. | 0/0    |
| 15 | Пищевая промышленность: пшеница, гречиха и мука                          | н.д./н.д.                           | н.д./ +   | -/-             | +/+    | 0/н.д. |
| 16 | Автомобиль: 0,3 (резина, бензин) + 0,15 (ППУ, иск. кожа ПВХ) + 0,1 эмаль | н.д./н.д.                           | н.д./н.д. | -/н.д.          | -/н.д. | +/н.д. |
| 17 | Упаковка: бумага + картон + полиэтилен + полистирол) (0,4+0,3+0,15+0,15) | н.д./н.д.                           | н.д./+    | -/н.д.          | -/н.д. | -/-    |

Примечания:

-- данный ОФП наступает после достижения температурой ее критического значения (70 °С);

+ - данный ОФП наступает раньше достижения температурой ее критического значения;

н.д. - нет данных по выходу рассматриваемого продукта горения;

0 - не выделяется при горении

При этом критическая продолжительность пожара по отдельным продуктам горения (формула (2)) сравнивалась с критической продолжительностью пожара по повышенной температуре (выражение (1)).

В табл. 2 приведены примеры результатов расчета эффективности использования самоспасателей.

Таблица 2.  
Эффективность использования самоспасателей в помещении объемом 500 м<sup>3</sup>

| Токсичный газ   | В помещении  |            | Подмасочное пространство |            | В помещении       |                       |                       | Эффективность, с                   |
|---|--------------|------------|--------------------------|------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|
|   | $\tau_1$ , с | $T_1$ , °C | $\tau_2$ , с             | $T_2$ , °C | $\tau_{кр}^T$ , с | $\tau_{кр}^{O_2}$ , с | $\tau_{кр}^{П.В}$ , с |                                    |
| 1. Мебель + бытовые изделия                                 |              |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| СО  | 113          | 50,5       | 113                      | 50,5       | 142               | 168                   | 53                    | $\tau_{эф1}=74$<br>$\tau_{эф2}=74$ |
| HCl   | н.д.         |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| Акролеин  | 39           | 21,2       | 207                      | 268,9      |                   |                       |                       |                                    |
| HCN   | н.д.         |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| 2. Мебель + ткани   |              |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| СО  | 32           | 52,7       | 32                       | 52,7       | 39                | 49                    | 22                    | $\tau_{эф1}=21$<br>$\tau_{эф2}=21$ |
| HCl   | н.д.         |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| Акролеин  | 11           | 21,3       | 59                       | 300,7      |                   |                       |                       |                                    |
| HCN   | н.д.         |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| 3. Кабинет: мебель + бумага (0,75+0,25)                     |              |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| СО  | 52           | 62,8       | 52                       | 62,8       | 60                | 71                    | 39                    | $\tau_{эф1}=35$<br>$\tau_{эф2}=35$ |
| HCl   | –            | –          | –                        | –          |                   |                       |                       |                                    |
| Акролеин  | 17           | 21,2       | 87                       | 276,4      |                   |                       |                       |                                    |
| HCN   | н.д.         |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| 4. Каюта с синтетической отделкой: дерево + ткани + отделка |              |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| СО  | 80           | 55,4       | 80                       | 55,4       | 97                | 115                   | 48                    | $\tau_{эф1}=52$<br>$\tau_{эф2}=52$ |
| HCl   | н.д.         |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| Акролеин  | 28           | 21,4       | 150                      | 345        |                   |                       |                       |                                    |
| HCN   | 89           | 68,7       | –                        | –          |                   |                       |                       |                                    |
| 5. Верхняя одежда: ворс, ткани (шерсть + нейлон)            |              |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| СО  | н.д.         |            |                          |            | 32                | 45                    | 18                    | $\tau_{эф1}=8$<br>$\tau_{эф2}=8$   |
| HCl   | 6            | 20,4       | 14                       | 25,1       |                   |                       |                       |                                    |
| Акролеин  | н.д.         |            |                          |            |                   |                       |                       |                                    |
| HCN   | 9            | 21,5       | 30                       | 72,5       |                   |                       |                       |                                    |

Примечания:

н.д. – нет данных о выделении токсичного газа;

– – не представляет опасности: не выделяется при горении либо выделяется при горении, но не достигает аварийного предела воздействия;

температуры  $T_1$  и  $T_2$  являются среднеобъемными

В табл. 3–5 представлены данные по ОФП, достигающими критического значения первыми (после потери видимости), выделяющимися при горении, но не достигающими предельных концентраций, а также достигающими критического значения в подмасочном пространстве самоспасателя «Феникс» (без дополнительной защиты от монооксида углерода). Примечания к табл. 3–5: [3]/[2] – слева от наклонной черты – исходные данные из [3], справа – из [2]; н.д. – нет данных о выделении токсичного газа; ПН – пожарная нагрузка.

Таблица 3.

Сведения об ОФП, наступающих в первую очередь (после потери видимости), при сгорании ПН в помещениях различного объёма

| ОФП         | $V = 108 \text{ м}^3$<br>$H = 3 \text{ м}$<br>$Z = 1,252$ |             | $V = 500 \text{ м}^3$<br>$H = 4 \text{ м}$<br>$Z = 0,77$ |             | $V = 1000 \text{ м}^3$<br>$H = 5 \text{ м}$<br>$Z = 0,54$ |             |
|-------------|---|-------------|--|-------------|---|-------------|
|             | Количество ПН   | %           | Количество ПН  | %           | Количество ПН   | %           |
| СО          | 0/6   | 0/8,95      | 0/4  | 0/5,97      | 0/2   | 0/2,98      |
| НСІ         | 1/18  | 1,49/26,87  | 1/17   | 1,49/25,37  | 1/16  | 1,49/23,88  |
| Акролеин    | 30/ н.д.  | 44,78/ н.д. | 30/ н.д.   | 44,78/ н.д. | 30/ н.д.  | 44,78/ н.д. |
| НСN         | 1/ н.д.   | 1,49/ н.д.  | 1/ н.д.  | 1,49/ н.д.  | 1/ н.д.   | 1,49/ н.д.  |
| Температура | 35/43   | 52,2/64,18  | 35/46  | 52,2/68,65  | 35/49   | 52,2/73,13  |
| Кислород    | 0/0   | 0/0         | 0/0  | 0/0         | 0/0   | 0/0         |

Таблица 4.

Сведения о токсичных газах, выделяющихся, но не достигающих концентраций аварийного предела воздействия

| Токсичный газ | $V = 108 \text{ м}^3$<br>$H = 3 \text{ м}$<br>$Z = 1,252$ |            | $V = 500 \text{ м}^3$<br>$H = 4 \text{ м}$<br>$Z = 0,77$ |            | $V = 1000 \text{ м}^3$<br>$H = 5 \text{ м}$<br>$Z = 0,54$ |             |
|---------------|---|------------|--|------------|---|-------------|
|               | Количество ПН   | %          | Количество ПН  | %          | Количество ПН   | %           |
| СО            | 0/14  | 0/20,9     | 0/19   | 0/28,36    | 0/29  | 0/43,28     |
| НСІ           | 7/1   | 10,44/1,49 | 7/1  | 10,44/1,49 | 7/1   | 10,44/1,49  |
| Акролеин      | 0/ н.д.   | 0/ н.д.    | 0/ н.д.  | 0/ н.д.    | 0/ н.д.   | 0/ н.д.     |
| НСN           | 1/ н.д.   | 1,49/ н.д. | 6/ н.д.  | 8,95/ н.д. | 8/ н.д.   | 11,94/ н.д. |

Таблица 5.

Сведения о токсичных газах, достигших концентрации аварийного предела воздействия в подмасочном пространстве самоспасателя «Феникс» (без дополнительной защиты от монооксида углерода)

| Токсичный газ | $V = 108 \text{ м}^3$<br>$H = 3 \text{ м}$<br>$Z = 1,252$ |            | $V = 500 \text{ м}^3$<br>$H = 4 \text{ м}$<br>$Z = 0,77$ |             | $V = 1000 \text{ м}^3$<br>$H = 5 \text{ м}$<br>$Z = 0,54$ |             |
|---------------|---|------------|--|-------------|---|-------------|
|               | Количество ПН   | %          | Количество ПН  | %           | Количество ПН   | %           |
| СО            | 25/53   | 37,31/79,1 | 25/48  | 37,31/71,64 | 25/38   | 37,31/56,72 |
| НСІ           | 1/13  | 1,49/19,4  | 1/7  | 1,49/10,45  | 1/6   | 1,49/8,95   |
| Акролеин      | 26/ н.д.  | 38,8/ н.д. | 26/ н.д.   | 38,8/ н.д.  | 26/ н.д.  | 38,8/ н.д.  |
| НСN           | 2/ н.д.   | 2,98/ н.д. | 2/ н.д.  | 2,98/ н.д.  | 2/ н.д.   | 2,98/ н.д.  |

Для определения очередности наступления ОФП и требований к самоспасателям проведено математическое моделирование термогазодинамики пожара с учетом конкретных объемно-планировочных решений современных зданий (многофункциональные торговые центры, аэропорт, склады и т. д.) с использованием зонной и полевой моделей.

Представлены результаты численных экспериментов и их анализ по развитию термогазодинамической картины пожара в современных зданиях многофункционального назначения с массовым пребыванием людей.



Для иллюстрации результатов расчета на рис. 2 представлены поля массовых концентраций окиси и двуокси углерода, а также кислорода в продольном сечении атриума терминала Шереметьево-1 через 360 с от начала пожара. Координата  $x$  направлена вдоль длины помещения, координата  $z$  – вдоль высоты. Площадь пола атриума составляет  $2785 \text{ м}^2$ , высота равна  $14,2 \text{ м}$ . Рассматривается горение мебели и тканей.

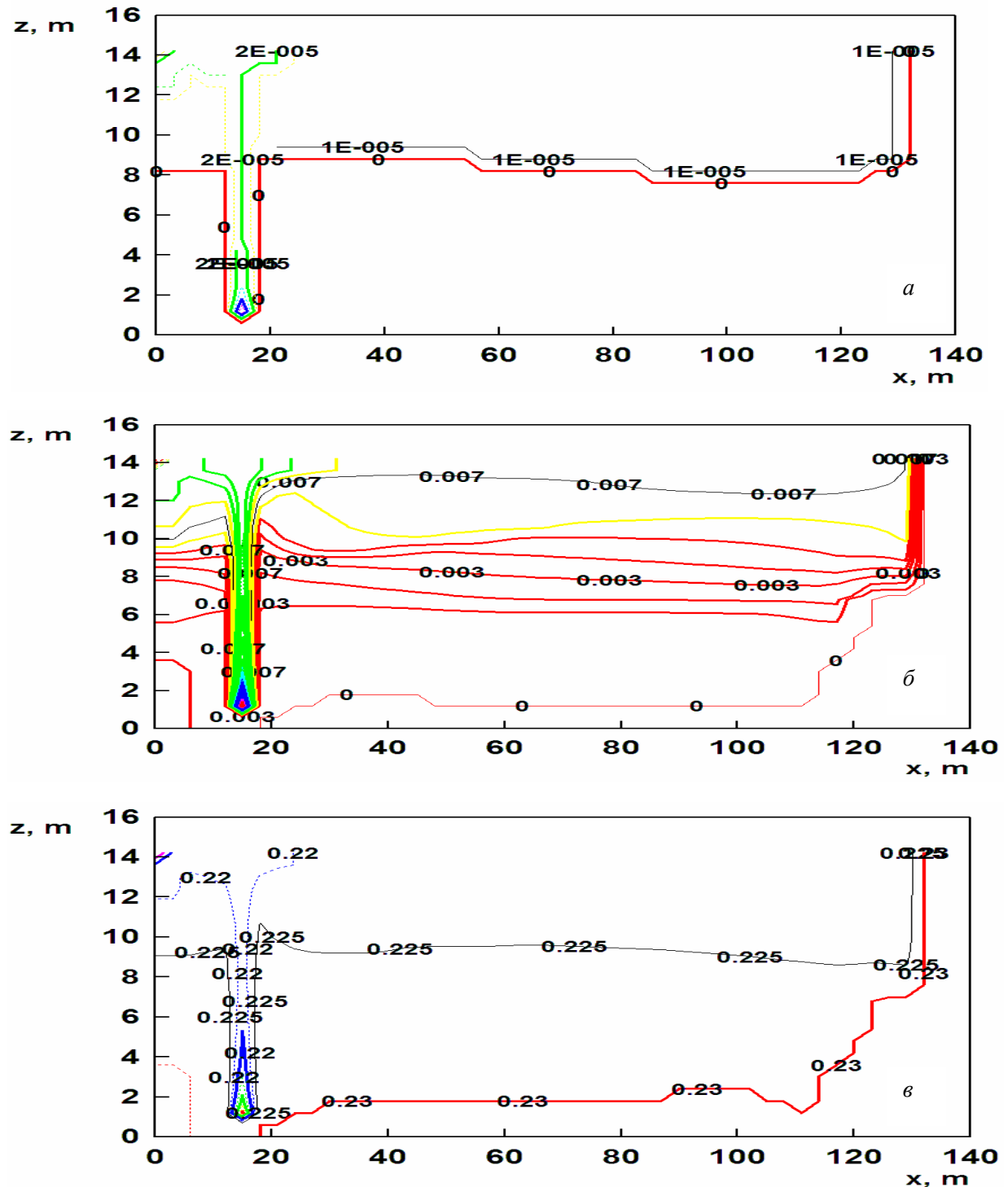


Рис. 2. Поля массовых концентраций окиси (а) и двуокси (б) углерода и кислорода (в) в продольном сечении атриума терминала Шереметьево-1 через 360 с от начала пожара

Анализ результатов численных экспериментов показывает, что в зданиях и сооружениях различного назначения критическая для человека без индивидуальных средств за-

щиты массовая концентрация монооксида углерода не наступила при следующих видах горючих материалов: мебель и ткани; бензин; сценическая часть зрительного зала (древесина); штабель древесины; дерево + лаковое покрытие; промышленные товары (при пожаре на первом этаже атриума трехэтажного торгового и культурно-развлекательного центра в г. Новосибирск).

В то же время критическая продолжительность пожара по монооксиду углерода достигла критического значения позже критической продолжительности по температуре при следующей пожарной нагрузке:

- автомобиль – на 190 с;
- упаковка: бумага + картон + полиэтилен + полистирол: на 39 с;
- промышленные товары (при пожаре на третьем этаже атриума трехэтажного торгового и культурно-развлекательного центра в г. Новосибирск): на втором этаже – на 28 с; на третьем этаже – на 145–168 с.

Время эффективного применения портативных фильтрующих самоспасателей от начала пожара до достижения температурой ее критического значения на высоте рабочей зоны составляло:

- здание I-II степени огнестойкости (мебель + ткани):  $\tau_{эф1} = 209-743$  с;
- автомобиль:  $\tau_{эф1} = 251$  с;
- бензин:  $\tau_{эф1} = 114$  с;
- сценическая часть зрительного зала (древесина):  $\tau_{эф1} = 430$  с;
- штабель древесины:  $\tau_{эф1} = 269$  с;
- упаковка: бумага + картон + полиэтилен + полистирол:  $\tau_{эф1} = 155$  с;
- промышленные товары:  $\tau_{эф1} = 393-950$  с.

Показано, что для определения необходимого времени эвакуации людей и требований к самоспасателям необходимо проводить математическое моделирование термогазодинамики пожара с использованием современных полевых и зонных методов расчета, не вошедших в нормативные документы [11], так как применение нормативных методов может привести к завышению величины необходимого времени эвакуации в 2–3 раза.

Полученные новые представления об очередности наступления критических значений различных ОФП позволяют сформулировать основные требования по выбору средств индивидуальной защиты органов дыхания и кожных покровов людей во время эвакуации.

### Выводы

1. Результаты численных экспериментов показали, что повышенные концентрации акролеина и синильной кислоты (не учтенных в нормативных документах [11] и базе данных пожарной нагрузки [2]) достигают критического для человека значения раньше наступления критических величин других опасных факторов пожара (но после потери видимости) при горении большинства горючих нагрузок и оказывают определяющее влияние на риск гибели людей, их самочувствие во время эвакуации и последствия для их здоровья. Полученные данные существенно меняют современные представления об опасности токсичных газов во время эвакуации людей при пожаре.

2. Предложена математическая модель определения значений удельного коэффициента выделения оксида углерода, которая учитывает изменение таких термогазодинамических условий пожара как температура, концентрация кислорода и коэффициент теплопотерь в ограждающие конструкции.

Вышеуказанная модель позволяет экспериментально определять удельный коэффициент выделения СО в случае горения вещества неизвестного химического состава, когда

измеряются его низшая рабочая теплота сгорания, температура, концентрация кислорода и коэффициент теплопотерь.

Методика расчета может быть использована для определения значений удельных коэффициентов выделения других токсичных газов при знании констант равновесия соответствующих химических реакций.

3. Опасность, представляемая монооксидом углерода, преувеличена, так как в большинстве случаев предельных концентраций оксид углерода достигает спустя значительный промежуток времени, к которому другие ОФП уже достигли предельных значений, а температура в помещении значительно выше ее критического значения.

4. Использование портативных фильтрующих самоспасателей для спасения жизни и здоровья людей при эвакуации на пожарах в зданиях и сооружениях является эффективным. Защитное действие портативных фильтрующих самоспасателей по опасным факторам пожара (в том числе по неучтенному фактору в нормативных документах – наличие мелкодисперсных твердых частиц дыма) в рассмотренных современных типовых объектах при типовых пожарных нагрузках составляло от 1,9 мин до 15,83 мин.

5. Многолетний опыт использования авторами данной работы базы данных [2] и применения нормативных методов расчета [11] в случае пожарно-технических экспертиз объемно-планировочных решений зданий и сооружений показал, что это может привести к неправильному определению (завышению) критической продолжительности пожара по ОФП (в частности, по концентрациям токсичных газов) в 20–75 % пожарных нагрузок (в зависимости от геометрии и размеров помещений), что на практике повышает риск гибели людей.

## Литература

- [1] Пузач С.В., Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности, Академия ГПС МЧС России, Москва, 2005.
- [2] Кошмаров Ю.А., Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении, Академия ГПС МЧС России, Москва, 2000.
- [3] Исаева Л.К., Пожары и окружающая среда, Академия ГПС МЧС России, Москва, 2001.
- [4] Трейтмен Д.Р., Виллиам А.Б., Голд А., Примеси вредных веществ в воздухе, с которыми встречаются пожарные, Департамент научных исследований окружающей среды и здоровья, Бостон, 2005.
- [5] Иличкин В.С., Токсичность продуктов горения полимерных материалов. Принципы и методы определения, Москва, 1993.
- [6] Молчадский И.С., Пожар в помещении, ВНИИПО МЧС России, Москва, 2005.
- [7] Справочник азотчика. Физико-химические свойства газов и жидкостей, Химия, Москва, 1986.
- [8] Breulet H., Standard toxic potency indexes, InterFlam2007 Conference, London, 2007.
- [9] Пузач С.В., Абакумов Е.С. Модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в атриуме. Инженерно-физический журнал. 2007. Т. 80, № 2. С. 84–89.
- [10] Пузач С.В., Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара, Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 8.12.2006 г.
- [11] ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования, Госстандарт России, Москва, 1992.