

О ПОДОБИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ

С. В. Пузач

Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия

Показатели токсичности продуктов горения веществ и материалов при пожаре в помещении определяют в мелкомасштабных экспериментальных установках [1]. Из-за невозможности выполнения положений теории подобия при переходе от мелкомасштабной модели к натурному помещению [2] необходимо установить связь плотностей образующихся токсичных газов с удельными коэффициентами их образования, а также с плотностью кислорода и температурой при сгорании одного и того же горючего материала в разных термогазодинамических условиях в помещениях с существенно отличающимися размерами.

В работе рассмотрено пять характерных схем термогазодинамической картины пожара (таблица 1), для которых существуют аналитические решения систем дифференциальных уравнений. Схема №2 соответствует условиям стандартных испытаний на токсичность [1].

Таблица 1

Характеристики схем пожара и формулы для определения коэффициента K_i

Номер схемы, i	Характеристика термогазодинамической картины пожара	K_i , Дж/м ³
1	«Квазистационарные» условия пожара; мелкомасштабное помещение; механическое дымоудаление	$K_1 = \frac{3.5 \cdot 10^5 (T_{cp} - T_B)}{(1 - \varphi) T_{cp}}$
2	Нестационарные условия пожара; мелкомасштабный герметичный объем	$K_2 = \frac{2.5 \cdot 10^5 (T_{cp} - T_B)}{(1 - \varphi) T_B}$
3	Конвективная колонка; «квазистационарные» условия пожара; крупномасштабное помещение	$K_3 = \frac{1.37 \cdot 10^5}{(1 - \chi)}$
4	Малая проемность (открытые проемы работают только на выброс смеси газов наружу); нестационарные условия пожара; крупномасштабное помещение	$K_4 = \frac{3.5 \cdot 10^5 (T_{cp} - T_B)}{(1 - \varphi) T_{cp}}$
5	Большая проемность; «квазистационарные» условия пожара; крупномасштабное помещение; механическое дымоудаление из припотолочного слоя	$K_5 = \frac{3.5 \cdot 10^5 T_2 - T_B}{(1 - \varphi) T_2}$

Для каждой из схем составлены замкнутые системы дифференциальных уравнений законов сохранения массы и энергии при $\varphi = \text{const}$ и $\chi = \text{const}$.

В случае нестационарных условий получены аналитические зависимости характерных температур, плотностей токсичных газов и кислорода от времени. Для «квазистационарных» процессов тепломассообмена представлены формулы,

связывающие между собой характерные температуры, плотности токсичных газов и кислорода.

Показано, что для всех схем тепломассообмена характерная плотность токсичного газа может быть описана зависимостью:

$$\rho_i^* = K_i \frac{L}{Q_H^p} . \quad (1)$$

Полученные формулы для расчета коэффициента пропорциональности K_i приведены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что (за исключением схемы №3):

$$K_i = f(\varphi, T^*, T_B) . \quad (2)$$

Необходимо отметить, что коэффициент теплотеря φ в общем случае изменяется по времени [2, 4], а не является постоянным. Поэтому для подтверждения корректности зависимости (2) в случае произвольных термогазодинамических условий пожара проведены численные эксперименты.

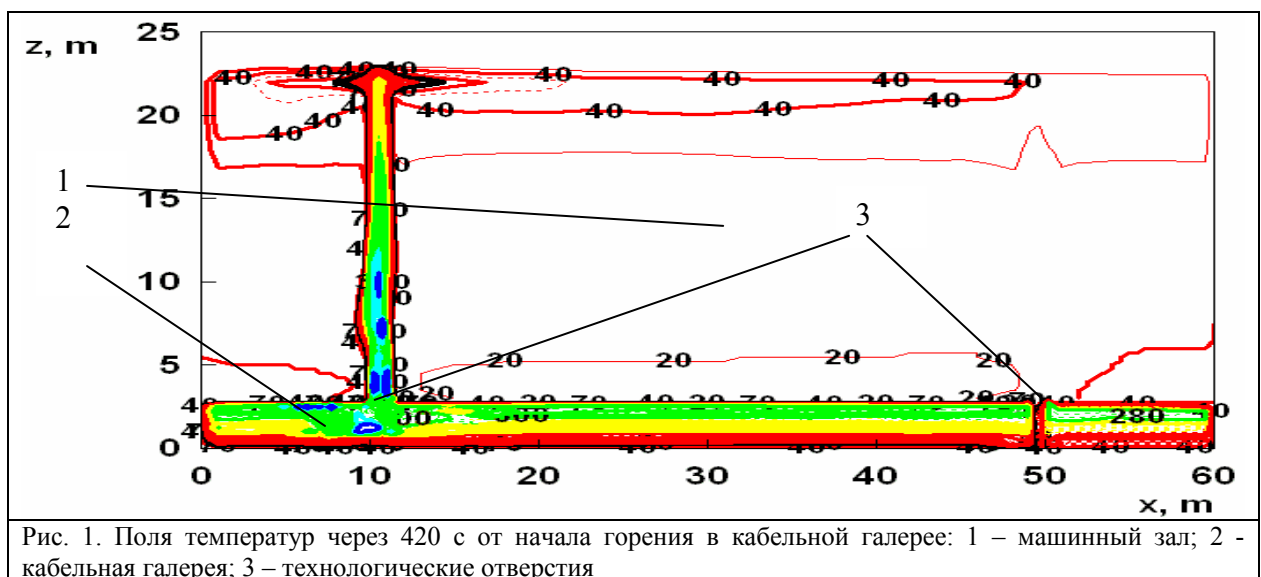
Кроме полученных аналитических решений используются также интегральная и трехмерная нестационарная полевая модели расчета термогазодинамики пожара [2], в которых коэффициент φ изменяется и определяется в процессе расчетов.

В интегральной модели решаются нестационарные дифференциальные уравнения законов сохранения массы и энергии газовой среды помещения и сохранения массы токсичных газов и кислорода.

Обобщенное дифференциальное уравнение полевой модели имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \Phi) + \text{div} (\rho w \Phi) = \text{div} (\Gamma \text{grad} \Phi) + S .$$

Рассматриваются сопряженные помещения: машинный зал ГЭС размерами 60×20×20 м и кабельная галерея размерами 60×20×2,5 м, расположенная под ним и соединенная с ним двумя технологическими отверстиями размерами 1×1 м (рис. 1).



В качестве горючего материала принимаем «кабельный подвал/лоток» [4].

Представлены результаты численных экспериментов по расчету плотности оксида углерода. Для иллюстрации результатов расчета на рис. 1 представлены поля температур (в °C) через 420 с от начала горения в кабельной галерее.

Зависимости коэффициентов пропорциональности K_i (формула (1)) внутри кабельной галереи, полученные для всех рассмотренных схем, а также с использованием интегральной и полевой моделей, от характерной температуры газовой среды приведены на рис. 2.

Экспериментальные данные, приведенные в работе [3], получены при горении медных кабелей в оплетке внутри смежных помещений с максимальными габаритными размерами 7×4×4 м.

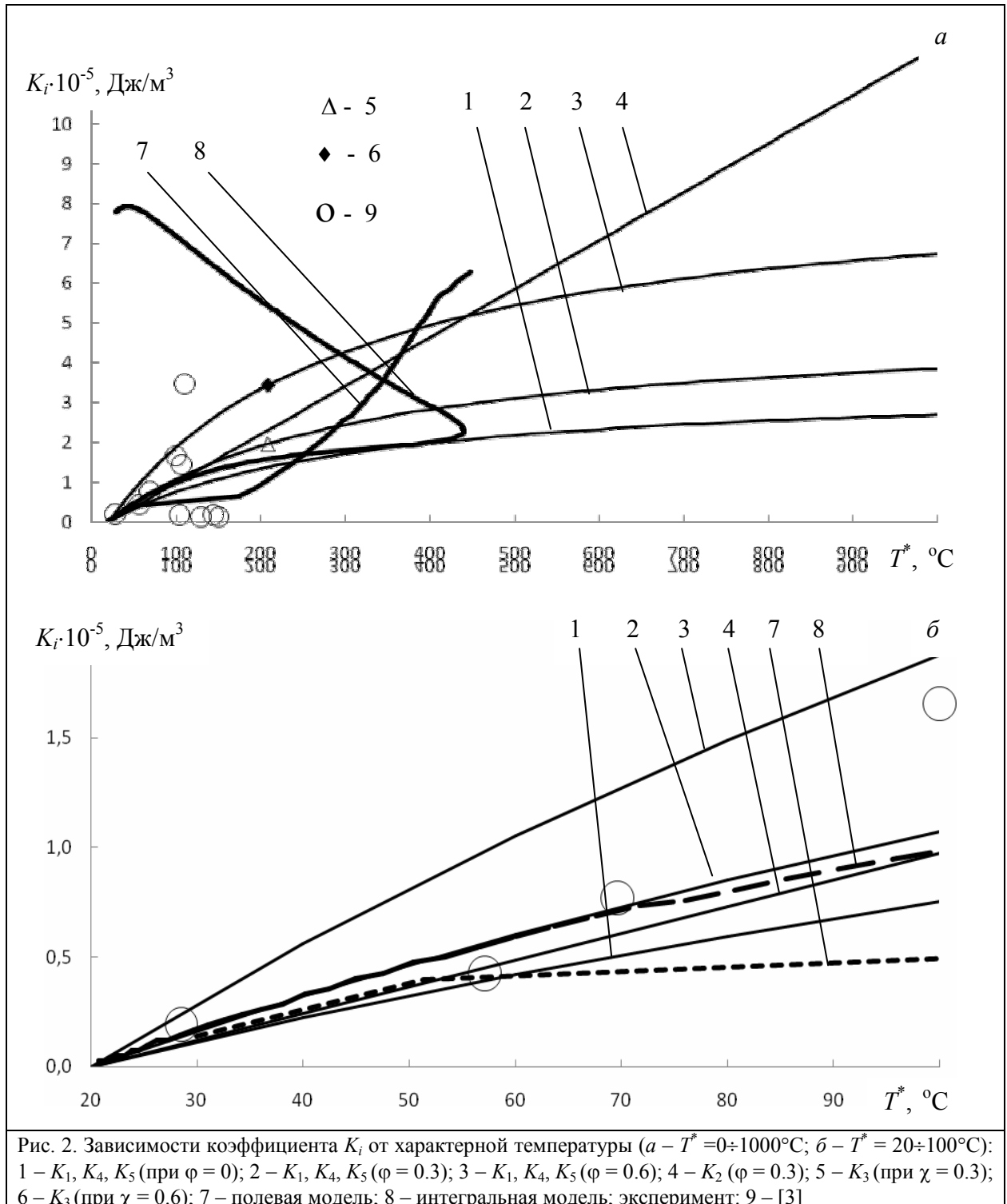


Рис. 2. Зависимости коэффициента K_i от характерной температуры ($a - T^* = 0 \div 1000^\circ\text{C}$; $b - T^* = 20 \div 100^\circ\text{C}$): 1 – K_1, K_4, K_5 (при $\varphi = 0$); 2 – K_1, K_4, K_5 ($\varphi = 0.3$); 3 – K_1, K_4, K_5 ($\varphi = 0.6$); 4 – K_2 ($\varphi = 0.3$); 5 – K_3 (при $\chi = 0.3$); 6 – K_3 (при $\chi = 0.6$); 7 – полевая модель; 8 – интегральная модель; эксперимент: 9 – [3]

Величина коэффициента K_i , полученная с использованием полевой модели (кривая 7, рис. 2), после 50 с от начала горения до 180 с слабо меняется от температуры. Далее происходит резкое увеличение K_i . После примерно 400 с, когда характер пожара в помещении кабельной галереи близок к горению в герметичном объеме (суммарный расход через технологические отверстия близок к нулевому значению), коэффициент $K_i \rightarrow K_2$. Таким образом, при рассмотренных исходных данных схема №2, используемая для определения показателя токсичности при стандартных испытаниях [1], не отслеживает термогазодинамическую картину пожара.

Результаты расчетов показали, что коэффициент теплопотерь ϕ является необходимым критерием равенства характерных концентраций токсичных газов в мелкомасштабной экспериментальной установке и реальном помещении.

Заключение

Коэффициент пропорциональности K_i между характерной плотностью токсичного газа и отношением L/Q_n^p существенно зависит от трех параметров (формула (2)): коэффициент теплопотерь из рассматриваемого газового объема в ограждающие конструкции, характерная температура пожара и начальная температура в помещении.

Коэффициент K_i не зависит от свойств и массовой скорости выгорания горючего материала, размеров помещения, нестационарности термогазодинамической картины пожара, величины проемности помещения и работы системы дымоудаления.

Показатель токсичности, полученный в мелкомасштабной установке, будет близок величине, соответствующей условиям протекания пожара в крупномасштабном помещении, в случае равенства коэффициентов теплопотерь в мелкомасштабной установке и крупномасштабном реальном помещении.

Обозначения

Γ – коэффициент диффузии для Φ ; Φ – зависимая переменная (энтальпия газовой смеси, проекции скорости на координатные оси, концентрации компонентов газовой смеси, оптическая плотность дыма, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации); K_i – коэффициент пропорциональности между характерной плотностью токсичного газа и отношением L/Q_n^p в i -й схеме пожара, Дж/м³; L – удельный коэффициент образования токсичного газа; Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; T_b – температура воздуха, К; T_{cp} – среднеобъемная температура газовой среды, К; T_2 – средняя температура припотолочного газового слоя, К; T^* – характерная температура газовой среды, К; w – скорость газовой смеси, м/с; χ – коэффициент теплопотерь из конвективной колонки; ϕ – коэффициент теплопотерь из газовой среды помещения; ρ – плотность газовой смеси, кг/м³; ρ_i^* – характерная плотность токсичного газа для i -й схемы, кг/м³; τ – время, с.

Литература

1. Иличкин В.С. Токсичность продуктов горения полимерных материалов. Принципы и методы определения. Москва: Химия, 1993.
2. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. Москва: Академия ГПС МЧС России, 2005.
3. Fei You, Jianjun Zhou, Yanghui Zou, et al. Preliminary Real-scale Experimental Studies on Cable Fires in Plenum, J. Fire Sciences, 2003, Vol. 21, November, pp. 465-484.

4. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. Москва: Академия ГПС МЧС России, 2000.