

М.Н. Горячева, С.В. Пузач, С.А. Горячев
(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: zqstas@gmail.com)

К РАСЧЁТУ КОНЦЕНТРАЦИЙ ОКИСИ УГЛЕРОДА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ

Проведён анализ горения углерода в воздухе, не содержащем паров воды. Расчетным путем найдены содержания компонентов в продуктах сгорания и установлены закономерности их изменений в зависимости от коэффициента недостатка (избытка) воздуха.

Ключевые слова: пожар, концентрация, равновесие.

M.N. Gorjacheva, S.V. Puzach, S.A. Gorjachev **TO CALCULATION OF CONCENTRATION OF THE OXIDE OF CARBON AT A FIRE IN INDOORS WITH REGULATED VENTILATION**

Analyzed of carbon burning in air which is not containing steams of water. The settlement way finds maintenances of components in products of combustion and laws of their change depending on factor of a lack (surplus) of air are established.

Key words: fire, concentration, balance.

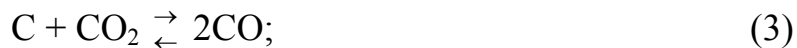
Одним из основных опасных факторов пожара, приводящем к гибели людей, является содержание в газовой среде помещения повышенной концентрации окиси углерода (СО), которая в ряде случаев, например, при эвакуации людей по протяженным коридорам, определяет критическую продолжительность пожара [1]. Для расчета динамики развития поля концентрации окиси углерода требуется, в первую очередь, достоверно определить массовую скорость образования СО, которая в общем случае зависит от констант равновесия протекающих химических реакций, температуры, давления и концентрации реагирующих компонентов. В соответствии с действующими нормами [2] выход СО определяется для стехиометрических условий горения. Однако для условий пожара, характеризующихся недостатком притока кислорода в помещение, отсутствуют сведения, позволяющие учитывать влияние концентрации кислорода и температуры на скорость образования СО.

В статье анализируется процесс горения сухого твёрдого топлива (углерода) в несодержащей влаги окислительной среде (воздухе) при различных степенях избытка (недостатка) окислителя.

Получены количественные соотношения компонентов продуктов сгорания и установлены закономерности изменения этих соотношений в зависимости от условий горения, в частности, от значений коэффициента α (*отношения действительного количества окислителя к теоретически необходимому для окисления углерода* в гетерогенной реакции $C + O_2 \rightarrow CO_2$). Заметим, что значение коэффициента $\alpha = 0,5$ соответствует горению углерода в гетерогенной

реакции $2C + O_2 \rightarrow 2CO$; значение коэффициента $\alpha = 1$ соответствует полному сгоранию углерода в гетерогенной реакции $C + O_2 \rightarrow CO_2$.

Горение углерода в рассматриваемых условиях достаточно полно описывается следующими реакциями гетерогенного и гомогенного горения:



Расчеты равновесного состава газов проводились в интервале температур 350-1500 °С (когда можно пренебречь диссоциацией) при атмосферном давлении, что характерно для процесса горения в помещении. Продукты горения считались смесью идеальных газов, находящихся в термодинамическом равновесии.

В случае, когда коэффициент $\alpha > 0,5$, продукты сгорания содержат CO, CO₂, а также азот и неиспользованный кислород. Причем количества азота и неиспользованного кислорода находятся в соотношении $0,79\alpha : 0,21(\alpha - 0,5)$.

В случае, когда коэффициент $\alpha \leq 0,5$, продуктами сгорания являются CO, CO₂ и N₂.

Равновесный состав смеси газов в обоих случаях рассчитывался по общему методу: составлялась система уравнений, удовлетворяющая следующим требованиям:

- неизвестные – равновесные парциальные давления компонентов продуктов горения;
- число неизвестных равно количеству компонент продуктов горения;
- в уравнениях содержатся (имеются) члены и параметры, определяющие зависимость равновесных парциальных давлений от температуры и условий подачи воздуха; такими параметрами являются константы равновесия K_p химических реакций и коэффициент недостатка воздуха α ;
- парциальные давления компонентов продуктов горения подчиняются закону Дальтона;
- отношения количеств азота к кислороду N:O в продуктах сгорания и в поступающем воздухе равны

$$\frac{P_{N_2}}{P_{CO_2} + \frac{P_{CO}}{2} + P_{O_2}^{ни}} = \frac{P'_{N_2}}{P'_{O_2}} = 3,76,$$

где P_{N_2} , P_{CO} и P_{CO_2} – парциальные давления N₂, CO и CO₂ в продуктах сгорания;

$P_{O_2}^{ни}$ – парциальное давление неиспользованного O₂ в продуктах сгорания;

P'_{N_2} , P'_{O_2} – парциальные давления N₂ и O₂ в поступающем воздухе.

Константы равновесия химических реакций K_p приняты из таблиц, приведенных в справочнике [3]. Значения коэффициента α принимались в интервале от 0,5 до 1,2.

Всем указанным требованиям полностью удовлетворяет система уравнений:

$$\begin{aligned} P_{\text{CO}}^2 &= K_p P_{\text{CO}_2}; \\ \frac{P_{\text{N}_2}}{P_{\text{CO}_2} + \frac{P_{\text{CO}}}{2} + P_{\text{O}_2}^{\text{ни}}} &= 3,76; \\ P_{\text{CO}} + P_{\text{CO}_2} + P_{\text{N}_2} + P_{\text{O}_2}^{\text{ни}} &= 1. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{В случае } \alpha > 0,5 \quad P_{\text{O}_2}^{\text{ни}} = (2\alpha - 1) \left(P_{\text{CO}_2} + \frac{P_{\text{CO}}}{2} \right), \text{ в случае } \alpha \leq 0,5 \quad P_{\text{O}_2}^{\text{ни}} = 0. \quad (6)$$

При проведении расчётов приняты константы равновесия реакции (3). При расчёте по другим реакциям результаты расчётов совпадают или близки, так как одни и те же компоненты вычисляемых составов газа находятся в равновесии друг с другом и твердой фазой – углеродом.

Из уравнений баланса компонентов в топливе и продуктах сгорания получаются зависимости, дополняющие указанную систему уравнений (5-6) и позволяющие определить количество углерода и количество кислорода, вступивших в реакцию:

$$[\text{C}] = \frac{12n(P_{\text{CO}_2} + \frac{P_{\text{CO}}}{2})}{P}, \quad [\text{O}_2] = \frac{32n(P_{\text{CO}_2} + \frac{P_{\text{CO}}}{2} + P_{\text{O}_2}^{\text{ни}})}{P},$$

где P – общее давление продуктов сгорания, принятое равным 100 кПа (при давлении в системе $P = 100$ кПа парциальные давления продуктов сгорания равны их объёмным концентрациям);

n – количество продуктов сгорания, кмоль;

$$n = \frac{P}{\sum_{i=1}^{i=4} \mu_i P_i};$$

μ_i – молярные массы CO, CO₂, N₂, O₂^{ни}, кг/кмоль;

P_i – парциальные давления CO, CO₂, N₂, O₂^{ни}, кПа.

Определение значений [C] и [O₂] позволило найти количество образующегося CO в пересчете соответственно на единицу массы углерода (CO/C) и кислорода (CO/O₂). Все вычисления выполнялись в пакете *MathCAD* с использованием языка программирования *MathCAD*.

Результаты расчёта объёмных концентраций окиси углерода в диапазоне температур 350-1500 °С и при изменении коэффициента α в интервале от 0,5 до 1,2 с использованием модели, описываемой системой уравнений (5-6), пред-

ставлены в табл. 1. Из этих данных видно, что объёмная концентрация окиси углерода при температурах больших 500 °С существенно зависит от величины коэффициента α , уменьшаясь в несколько раз при его увеличении в указанном диапазоне.

Таблица 1

Объёмная концентрация окиси углерода в зависимости от температуры и коэффициента недостатка (избытка) воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	Коэффициент α					
	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2
350	$9,949 \cdot 10^{-4}$	$8,398 \cdot 10^{-4}$	$7,405 \cdot 10^{-4}$	$7,025 \cdot 10^{-4}$	$6,697 \cdot 10^{-4}$	$6,412 \cdot 10^{-4}$
400	$3,532 \cdot 10^{-3}$	$2,983 \cdot 10^{-3}$	$2,630 \cdot 10^{-3}$	$2,494 \cdot 10^{-3}$	$2,377 \cdot 10^{-3}$	$2,276 \cdot 10^{-3}$
500	0,026	0,022	0,019	0,018	0,018	0,017
600	0,110	0,091	0,078	0,073	0,069	0,066
700	0,253	0,199	0,165	0,153	0,142	0,132
800	0,324	0,247	0,200	0,182	0,168	0,155
900	0,342	0,258	0,207	0,189	0,173	0,160
1000	0,346	0,260	0,209	0,190	0,174	0,161
1100-1500	0,347	0,261	0,209	0,190	0,174	0,161

Для сравнения полученных данных по приведенному выходу CO/C при значениях $\alpha \neq 1$ с соответствующими величинами при значении $\alpha = 1$ (стехиометрические условия) введена функция

$$R_1(\alpha, t) = \frac{\frac{\text{CO}}{\text{C}}(\alpha, t)}{\frac{\text{CO}}{\text{C}}(1, t)}$$

(относительный выход CO/C).

График зависимости этой функции от температуры при различных значения α приведен на рис. 1.

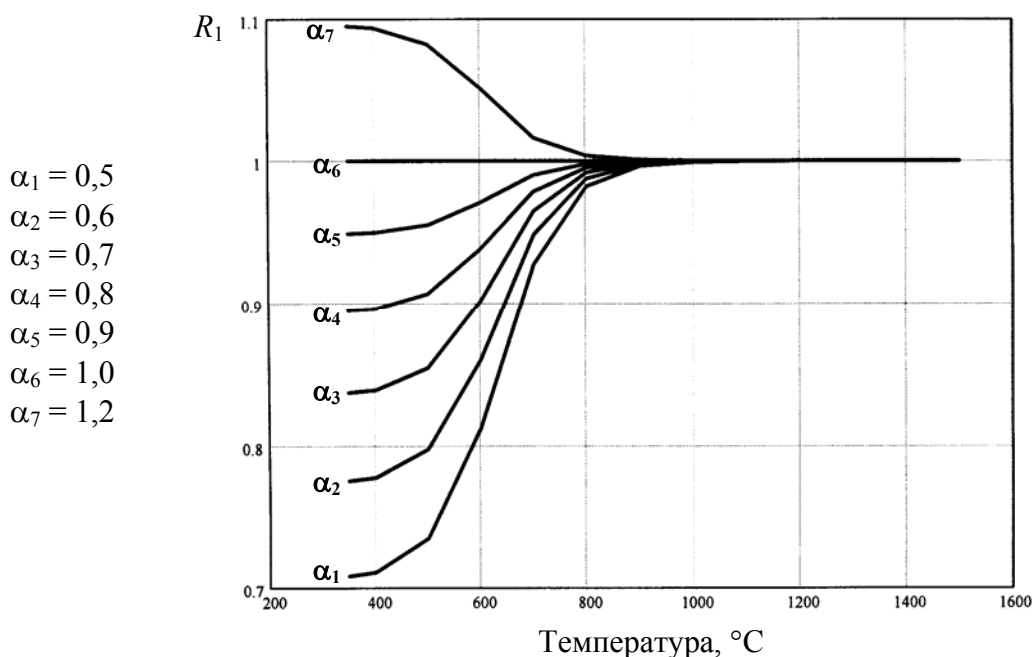


Рис. 1. Зависимость функции R_1 от температуры при различных значениях α

Аналогичным образом введена функция $R_2(\alpha, t) = \frac{\frac{CO}{O_2}(\alpha, t)}{\frac{CO}{O_2}(1, t)}$ (относи-

тельный выход CO/O_2), график зависимости которой от температуры при различных значения α представлен на рис. 2.

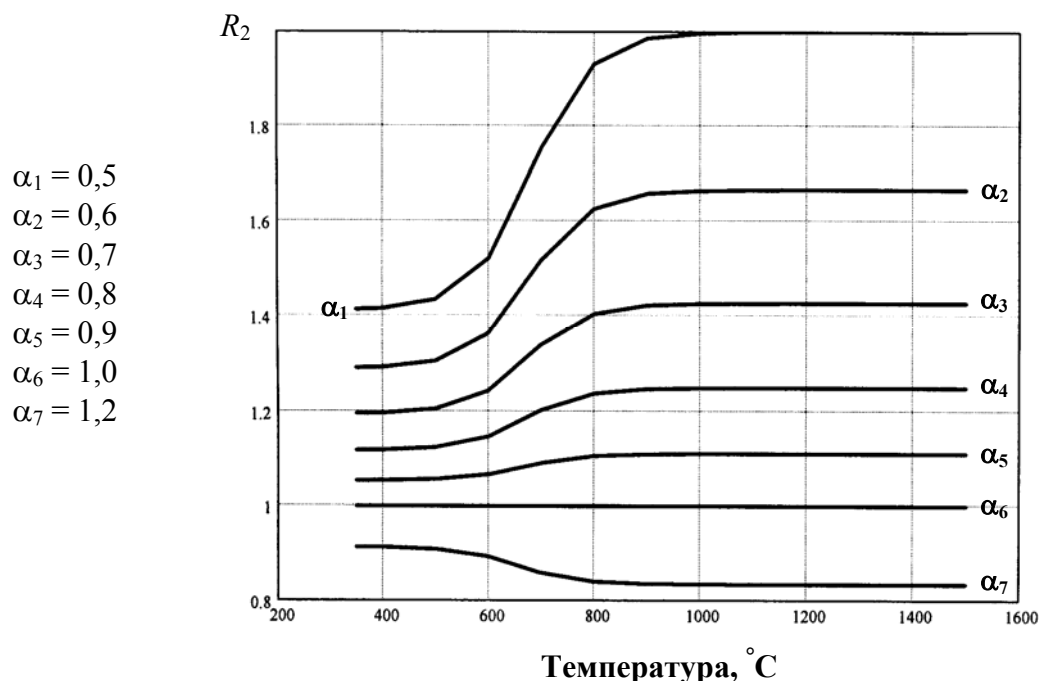


Рис. 2. Зависимость функции R_2 от температуры при различных значениях α

Результаты проведённого аналитического исследования указывают на необходимость учёта недостатка кислорода при оценке содержания окиси углерода в газовой среде при пожаре в помещении, поскольку незначительное изменение коэффициента недостатка воздуха α (на 10 %) при оценке выходов CO/C , CO/O_2 , особенно в интервале температур 500-900 °C, приводит к заметному изменению приведённого выхода CO/C (до 30 %) и к существенному изменению приведённого выхода CO/O_2 (до 250 %).

Литература

1. *Корольченко А.Я., Процкий В.Ю.* Оценка эффективности применения индивидуальных средств защиты и спасения при движении людей по горизонтальным путям эвакуации // *Пожаровзрывобезопасность*. 2004. Т. 13. № 1. С. 47.
2. *ГОСТ 12.1.004-91.* Пожарная безопасность. Общие требования.
3. *Справочник азотчика.* – М.: Изд. "Химия", 1967.

Статья опубликована 30 июня 2012 г.