

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В АДИАБАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Разработана математическая модель распространения пламени при горении смесей сложного состава.

Ключевые слова: концентрационные пределы распространения пламени, тепловой баланс, модель распространения пламени.

A.N. Lopanov, E.A. Fanina

MODELLING OF PROCESSES OF DISTRIBUTION OF THE FLAME IN ADIABATIC CONDITIONS

Mathematical model of distribution of a flame in combustion of mixtures of complex composition was developed.

Key words: concentration limits of distribution of a flame, thermal balance, model of distribution of a flame.

Концентрационные пределы распространения пламени (КПРП) – важнейшие характеристики пожарной и взрывной опасности веществ, поэтому расчёт указанных параметров является актуальной задачей технологии пожаро-взрывозащиты. Следует отметить, что методологические аспекты расчёта КПРП проработаны не полностью и представлены, в основном, полуэмпирическими зависимостями [1-3].

Авторами разработана феноменологическая модель для расчёта КПРП в адиабатических условиях. Алгоритм моделирования позволит осуществлять прогноз пожарной и взрывной опасности сложных по составу горючих смесей с учётом тепловых потерь процессов горения.

Рассмотрена модель распространения пламени в адиабатических условиях. Предположим, в объёме сосуда возникает локальный участок с температурой, при которой происходит устойчивое распространение пламени по объёму сосуда. Как правило, эта температура не должна быть ниже температуры прекращения горения вещества, равной для большинства углеводородов 1200-1500 °K. Следовательно, в условиях устойчивого распространения пламени по объёму на фронте пламени должна поддерживаться указанная температура (рис. 1).

Процедура расчёта заключается в том, что на основе формальной схемы процесса горения определяют все компоненты – состав продуктов реакции и исходных веществ. Рассчитывая адиабатическую температуру [4], количество выделяющейся теплоты, теплоёмкости продуктов реакции, составляют тепловой баланс процесса и проводят расчёт КПРП. Алгоритм позволяет проводить расчёт и при наличии флегматизаторов различной природы (рис. 2).

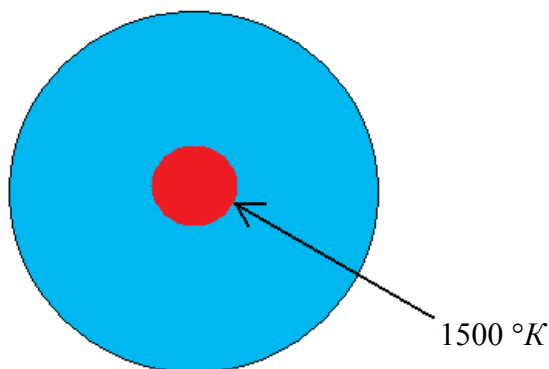
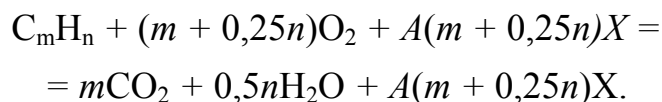


Рис. 1. Схема распространения пламени по объёму газа

1. Запишем формальную схему процесса горения углеводорода C_mH_n в присутствии инертного разбавителя X , не участвующего в процессе горения в условиях избытка окислителя:



Здесь m , n – количество атомов углерода, водорода в молекуле горючего вещества, X – инертный разбавитель (в частном случае это может быть азот); A – число молей инертного разбавителя, приходящегося на 1 моль кислорода (для воздуха $A = 3,76$).

2. Составим уравнение теплового баланса. При определении нижнего концентрационного предела распространения пламени уравнение теплового баланса (горючее в недостатке) имеет следующий вид:

$$\frac{a \cdot \Delta H}{\Delta T} = \left[amC_p^{CO_2} + 0,5anC_p^{H_2O} + C_p^{O_2} \frac{1}{1+A} - a \left(m + 0,25n + \frac{1}{1+A} \right) C_p^{O_2} + C_p^X \frac{A}{1+A} - C_p^X \frac{aA}{1+A} \right].$$

Здесь ΔH – низшая теплота сгорания углеводорода в соответствии с формальной схемой; ΔT – разница между температурой прекращения горения и начальной температурой газовой смеси (~ 1200 °K).

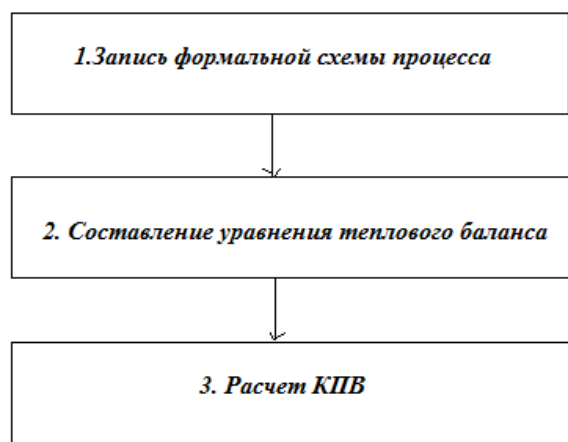


Рис. 2. Алгоритм расчёта концентрационных пределов распространения пламени

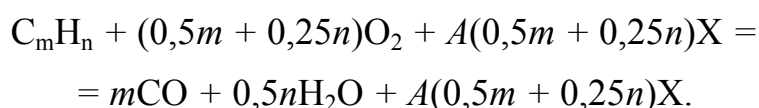
3. Из уравнения теплового баланса определим нижний концентрационный предел распространения пламени (об. %):

$$a = \frac{\left(C_p^X \frac{A}{1+A} + C_p^{O_2} \frac{1}{1+A} \right) 100}{\frac{|\Delta H^{CO_2}|}{\Delta T} - m C_p^{CO_2} - 0,5n C_p^{H_2O} + \left(m + 0,25n + \frac{1}{1+A} \right) C_p^{O_2} + C_p^X \frac{A}{1+A}}.$$

Анализируя уравнение, отметим, что в случае применения флегматизатора с теплоёмкостью, близкой к теплоёмкости окислителя, нижний концентрационный предел распространения пламени практически не зависит от концентрации флегматизатора:

$$C_p^X \approx C_p^{O_2}; \quad a \approx \frac{100 \cdot C_p^{O_2}}{\frac{|\Delta H|}{\Delta T} - m C_p^{CO_2} - 0,5n C_p^{H_2O} + (m + 0,25n + 1) C_p^{O_2}}.$$

Для расчёта верхнего концентрационного предела распространения пламени формальная схема процесса отображается следующим образом:



Предполагаем, что при недостатке окислителя процесс горения сопровождается образованием оксида углерода (CO). Запишем уравнение теплового баланса и проведем расчёт верхнего концентрационного предела распространения пламени по формуле:

$$a = \left[1 - \frac{C_p^{C_m H_n} (1+A)(0,5m + 0,25n)}{\frac{|\Delta H^{CO}|}{\Delta T} - m C_p^{CO} - 0,5n C_p^{H_2O} - A(0,5m + 0,25n) C_p^X + (1+A)(0,5m + 0,25n) C_p^{C_m H_n}} \right] \cdot 100.$$

Так как теплоёмкости кислорода и азота близки (34, 32 Дж/моль·град при $T = 1500$ °K), то значения НКПР отличаются незначительно как для кислорода, так и для смеси кислорода с азотом – воздуха (табл. 1).

Таблица 1

Расчёты КПП в адиабатических условиях

Вещество	Расчётные значения КПВ, % (об.). Кислород / воздух		Экспериментальные значения КПВ, % (об.). Кислород / воздух	
	Нижний	Верхний	Нижний	Верхний
Метан	5,3 / 5,3	66 / 20	5,1 / 5,28	61 / 14,1
Этан	2,3 / 2,4	69 / 19	3,0 / 2,9	66 / 15
Пропан	1,8 / 1,9	59 / 11	2,3 / 2,3	55 / 9,4
<i>n</i> -Бутан	1,4 / 1,5	53 / 10	1,8 / 1,8	49 / 9,1
<i>n</i> -Пентан	1,1 / 1,2	48 / 8,5	1,47 / 1,47	45 / 7,7

Расхождение результатов расчёта и эксперимента может быть вызвано несколькими причинами. Во-первых, расчёт проведён для адиабатических условий при отсутствии тепловых потерь в системе. Во-вторых, в формальной схеме процесса не учтены все продукты реакции. Вероятно, что при недостатке окислителя в системе происходит образование не только оксида углерода (CO), а также образуется оксид углерода (CO₂), что не учитывается в формальной схеме течения реакции.

Применяя различные методы моделирования, используя термодинамические свойства горючего вещества и окислителя, авторами создана достаточно точная модель для расчёта концентрационных пределов распространения пламени для смесей сложного состава.

Литература

1. **Физико-химические** основы развития и тушения пожаров. Учебное пособие для курсантов, студентов и слушателей образовательных учреждений МЧС России / Марков В.Ф., Маскаева Л.И., Миронов М.П., Пазникова С.Н. Екатеринбург: УрО РАН. 2009. 274 с.
2. **Противопожарная** защита и тушение пожаров. Промышленные здания и сооружения: учебное пособие. Кн. 2. / Теребнев В.В., Артемьев Н.С., Корольченко В.А. и др. М.: Пожнаука. 2006. 202 с.
3. **Лопанов А.Н.** Физико-химические основы теории горения и взрыва: учебное пособие. Белгород: изд-во БГТУ, 2012. 149 с.
4. **Лопанов А.Н., Фанина Е.А.** Методологические аспекты расчёта адиабатической температуры критических процессов // Вектор науки ТГУ. № 3 (17). 2011. С. 25-27.

Статья опубликована 25 февраля 2013 г.