

УДК 614.838.44:614.838.15

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ПЫЛЕВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Ю. С. ИВАНОВ, кандидат технических наук<sup>1</sup>

А. С. ДМИТРИЧЕНКО, кандидат технических наук<sup>2</sup>

С. Н. БОБРЫШЕВА, кандидат технических наук, доцент<sup>3</sup>

Л. И. БУЯКЕВИЧ, кандидат физико-математических наук<sup>3</sup>

А. Л. БУЯКЕВИЧ, начальник кафедры<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь, г. Минск

<sup>2</sup> Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

<sup>3</sup> Государственное учреждение образования «Гомельский инженерный институт» МЧС Республики Беларусь

Приведена методика расчета скорости распространения пламени по пылевоздушной смеси, находящейся в сферической оболочке, что соответствует требованиям нормативной документации. Это позволяет более точно определить показатели, необходимые для классификации производств по степени пожаровзрывоопасности.

**Ключевые слова:** пожаровзрывоопасность, пылевоздушные смеси, скорость распространения пламени, показатели взрыва, классификация производств по степени пожаровзрывоопасности.

### Введение

Определение показателей взрыва пылевоздушных смесей производится с целью получения исходных данных для классификации производств по степени пожаровзрывоопасности в соответствии с действующими нормами и правилами, а также для разработки эффективных мероприятий по предупреждению и тушению пожаров и предотвращению взрывов. Правильность оценки пожаровзрывоопасности во многом зависит от того, насколько совершенны применяемые методы определения показателей взрыва указанных смесей [1].

### Основная часть

В настоящей статье приведена методика определения скорости распространения пламени по пылевоздушной смеси, находящейся в сферической оболочке. Такая постановка задачи обусловлена тем, что в нормативных документах в качестве реакционных камер экспериментальных установок используются, как правило, сферические или цилиндрические емкости.

Будем считать, что частицы пыли равномерно распределены по объему сферической реакционной камеры. Процесс горения начинается с момента поджига одной частицы, находящейся в центре камеры, после чего сферический фронт пламени начинает распространяться в радиальном направлении к стенкам камеры.

Рассмотрим систему концентрических сферических поверхностей  $n = 1, 2 \dots N$  ( $n = 1$  соответствует частице, расположенной в центре камеры,  $n = 2$  соответствует сфере с диаметром  $L$ ). Расстояние между двумя соседними сферическими поверхностями также равно  $L$ , т. е.  $L$  – это характерное расстояние между двумя соседними частицами пыли. Поскольку частица пыли, расположенная в центре, находится в объеме с диаметром, равным  $L$ , то концентрация пыли в воздухе  $C_d$  может быть определена из соотношения

$$C_d = \frac{m}{V_1} = \frac{\rho_s \frac{\pi D_p^3}{6}}{\frac{\pi L^3}{6}} = \frac{\rho_s D_p^3}{L^3}, \quad (1)$$

где  $m$ ,  $D_p$  – масса и начальный диаметр частиц пыли;  $\rho_s$  – плотность частицы.

Отсюда характерное расстояние между концентрическими сферическими поверхностями может быть определено по формуле

$$L = \left( \frac{\rho_s}{C_d} \right)^{\frac{1}{3}} D_p. \quad (2)$$

Определим число частиц, располагающихся на каждой сферической поверхности. Объем слоя  $V_n$ , лежащего между поверхностями с радиусами  $[(n-1)L - L/2]$  и  $[(n-1)L + L/2]$ :

$$V_n = \frac{4}{3} \pi L^3 \left[ \left( n - \frac{1}{2} \right)^3 - \left( n - \frac{3}{2} \right)^3 \right] = \frac{4}{3} \pi L^3 \left( 3n^2 - 6n + \frac{13}{4} \right). \quad (3)$$

Концентрация пыли в объеме  $V_n$  может быть вычислена по формуле

$$C_d = \frac{m(n)}{V_n} = \frac{\rho_s \frac{\pi D_p^3}{6} N(n)}{V_n}, \quad (4)$$

где  $N(n)$  – число частиц на  $n$ -сферическом слое.

Подставляя в (4) выражение для объема  $V_n$  из (3), получим:

$$N(n) = \frac{C_d L^3}{\rho_s D_p^3} (24n^2 - 48n + 26). \quad (5)$$

Затем, подставляя в (5) значение  $L$  из (2), получим окончательно:

$$N(n) = (24n^2 - 48n + 26). \quad (6)$$

Механизм распространения пламени по пылевоздушной смеси, находящейся в сферической камере можно описать следующим образом [2]: на фронте пламени частицы пыли сгорают и нагревают окружающий их воздух, тепло передается конвекцией и излучением к еще незажженным частицам пыли, и когда их температура достигает температуры зажигания, загорятся и они.

Предположим, что фронт пламени достиг  $n-1$  сферической поверхности, радиус которой равен  $(n-1)L$ . Учитывая, что каждая горящая частица окружена своим фронтом пламени с радиусом  $R_p$ , получим выражение для радиуса фронта пламени, соответствующего  $n-1$  сферической поверхности

$$b = (n-1)L - R_p. \quad (7)$$

Местоположение фронта пламени сгорающей одиночной частицы пыли может быть определено из соотношения [3]:

$$R_p = \frac{D_p}{4} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{2k_*}{D_p}} \right], \quad (8)$$

где  $k_*$  – константа горения, значение которой для твердых частиц пыли лежит в диапазоне 1–10 см.

Запишем уравнение теплового баланса для частицы пыли, находящейся на  $n$ -й сферической поверхности:

$$mC_{ps} \left( \frac{dT_s}{dt} \right) = \pi D_p^2 \left[ h(T_g - T_s) + \frac{1}{2} F a_p \varepsilon_f \sigma T_f^4 \right]; \quad (9)$$

$$T_s = T_0 \text{ при } t = 0, \quad (10)$$

где  $T_g$  – температура воздуха на расстоянии  $nL$  от центра бомбы в момент времени  $t$  ( $T_g = T_g(nL, t)$ );  $\varepsilon_f$  – излучательная способность пламени;  $T_f$  – температура фронта пламени;  $T_s$  – температура поверхности частицы пыли;  $C_{ps}$  – теплоемкость пыли;  $a_p$  – поглощательная способность;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $F$  – угловой коэффициент лучистого теплообмена.

Первое слагаемое в правой части уравнения (9) определяет тепловые потери за счет конвективного теплообмена частицы и газа, причем коэффициент теплопередачи может быть определен по формуле

$$h = \frac{\text{Nu} \lambda_g}{D_p}. \quad (11)$$

Для частицы сферической формы  $\text{Nu} = 2$  и

$$h = \frac{2\lambda_g}{D_p}, \quad (12)$$

где  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности воздуха.

Второе слагаемое в правой части уравнения (9) определяет потери тепла с поверхности частицы за счет радиационного теплообмена между поверхностью частицы и окружающим ее воздухом и между поверхностью частицы и поверхностью стенок экспериментальной камеры. Для лучистого теплообмена между диском с диаметром  $D_p$  и сферическим фронтом пламени с радиусом  $b$  угловой коэффициент может быть

вычислен по следующей формуле [4]:

$$F = 8 \left( \frac{b}{D_p} \right)^2 \left\{ 1 - \frac{1}{[1 + (D_p/2H)^2]^{0.5}} \right\}, \quad (13)$$

где  $H = nL$ .

Проинтегрировав дифференциальное уравнение (9) с начальными условиями (10), получим следующее решение:

$$T_s = \exp(-At) \left[ A \int_0^t \exp(Az) T_g(nL, z) dz + \frac{B}{A} (\exp(At) - 1) + T_{s0} \right], \quad (14)$$

где  $A = \frac{6h}{\rho_s C_p D_p}$ ,  $B = \frac{3Fa_p \varepsilon_f \sigma T_f^4}{\rho_s C_{ps} D_p}$ .

Для определения температуры воздуха в экспериментальной камере запишем уравнение теплопроводности в сферических координатах

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = a_g \left( \frac{\partial^2 T_g}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) \quad (15)$$

со следующими граничными условиями

$$T_g = T_f \text{ при } r = b \quad (16)$$

и начальными условиями

$$T_g = T_i(r) \text{ при } t = 0, \quad (17)$$

где  $a_g$  – коэффициент теплопроводности воздуха.

Решение граничной задачи (15)–(17) имеет вид [5]:

$$T_g(r, t) = T_f \frac{b}{r} \operatorname{erfc} \left( \frac{r-b}{2\sqrt{a_g t}} \right) + \frac{1}{2r\sqrt{\pi a_g t}} \times \int_0^\infty r' T_i(r') \left[ \exp \left( -\frac{(r-r')^2}{4a_g t} \right) - \exp \left( -\frac{(r-2b-r')^2}{4a_g t} \right) \right] dr'. \quad (18)$$

Если распределение температуры воздуха в камере в начальный момент времени

$$T_i(r) = T_{i0}, \quad (19)$$

то решение (18) принимает вид:

$$T_g(r, t) = (T_f - T_{i0}) \frac{b}{r} \operatorname{erfc} \left( \frac{r-b}{2\sqrt{a_g t}} \right). \quad (20)$$

Будем считать, что фронт горения достигает  $n-1$  сферического слоя к моменту времени  $t' = 0$ , тогда подставляя (20) в (14), можно численно определить момент времени  $t' = \Delta t_n$ , когда температура еще не воспламенившихся частиц на  $n$ -слое достигнет температуры зажигания  $T_{ig}$ . Таким образом, время  $\Delta t_n$  – это время распространения фронта горения от  $n-1$  до  $n$ -сферического слоя. На рисунке 1 показана зависимость  $\Delta t_n$  от номера слоя  $n$  соответственно для пыли крахмала и ацетата целлюлозы для двух размеров частиц пыли (50 и 40 микрон). Физические константы для этих пылей приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Физические константы для пылей крахмала и ацетата целлюлозы**

Вещество	Плотность $\rho_s$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, $C_{ps}$ , Дж/кг · К	$a_p$	Температура зажигания $T_{ig}$ , К	Температура горения, $T_f$ , К
Крахмал	1400	717,7	0,5	700	1650
Ацетат целлюлозы	1200	837,3	0,8	850	1800

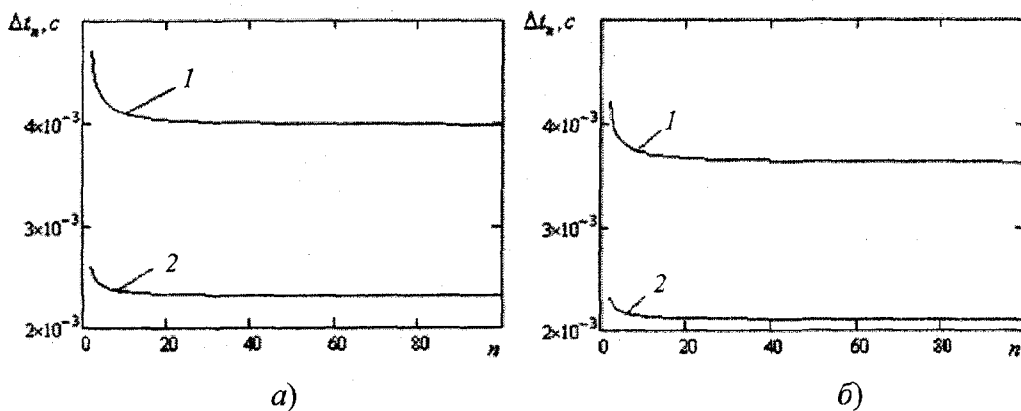


Рисунок 1 – Зависимость  $\Delta t_n$  от номера слоя  $n$  для пыли крахмала (а) и ацетата целлюлозы (б): 1 –  $D_p = 50 \mu$ ; 2 –  $D_p = 40 \mu$ ;  $C_d = 0,5$  г/л,  $k_* = 3,9$  см

Как видно из приведенных на рисунке 1 зависимостей, время распространения фронта горения между сферическими поверхностями уменьшается по мере удаления от центра и стремится к постоянному значению  $\Delta t_n = \Delta t$ . Таким образом, скорость распространения фронта горения по сферической бомбе может быть вычислена по соотношению

$$U = \frac{L}{\Delta t}. \tag{21}$$

На рисунке 2 показана зависимость скорости распространения фронта горения по сферической бомбе соответственно для пыли крахмала и ацетата целлюлозы от концентрации пыли в бомбе для двух размеров частиц пыли.

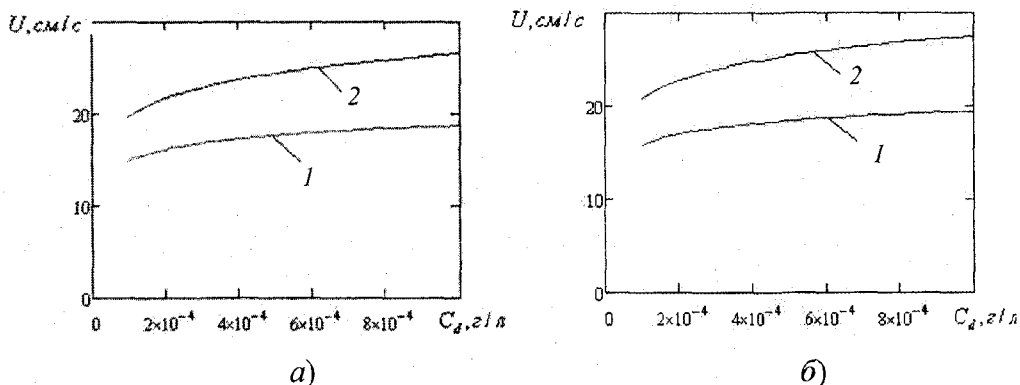


Рисунок 2 – Зависимость скорости распространения фронта горения по сферической бомбе для пыли крахмала (а) и ацетата целлюлозы (б) от концентрации пыли в бомбе:  
1 –  $D_p = 50 \mu$ ; 2 –  $D_p = 40 \mu$ ,  $k_* = 3,9$  см

### **Заключение**

Приведенные зависимости свидетельствуют, что скорость распространения фронта горения увеличивается с увеличением до определенного предела концентрации пыли и тем больше, чем меньше размер частиц пыли. Полученная зависимость времени распространения фронта горения между сферическими поверхностями в дальнейшем может быть использована для определения изменения давления при горении пылевоздушной смеси, находящейся в сферической экспериментальной камере.

### **Литература**

- 1 Корольченко, А. Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник / А. Я. Корольченко, Д. А. Корольченко. – М. : Ассоц. «Пожнаука», 2004. – 713 с.
- 2 Shin-ichiro Nomura, Prediction of Maximum Rate of Pressure Rise Due to Dust Explosion in Closed Spherical and Nonspherical Vessels, Ind.Eng.Chem.Process Des.Dev. – 1980, V. 19, N 3. – P. 451–459.
- 3 Сэйитиро, Кумагаи. Горение / Кумагаи Сейитиро. – М. : Химия, 1979. – 256 с.
- 4 Берд, Р. Явления переноса / Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут. – М. : Химия, 1974. – 688 с.
- 5 Карлслюу, У. Теплопроводность твердых тел / К. Карлслюу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.

*Поступила в редакцию 17.02.2012*

**Y. Ivanov, A. Dmitrichenko, S. Bobrysheva, L. Buyakevich, A. Buyakevich**  
**DETERMINATION OF FLAME PROPAGATION VELOCITY IN DUST**  
**AND AIR MIXTURE**

More precise assessment of fire and explosion emergency parameters (determination of flame propagation velocity in dust and air mixture), necessary for classification of enterprises is presented. The authors present design procedure of flame propagation velocity in dust and air mixture, executed in spherical shell, satisfying the requirements of normative documents.