

Доклад-3: О ВЗРЫВООПАСНОСТИ СТАЦИОНАРНЫХ АЭРОВЗВЕСЕЙ

Полетаев Н.Л.

ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Московская область, г.Балашиха

nlpvniipo@mail.ru

Определение термина "взрывоопасная аэровзвесь" на протяжении последних десятилетий неоднократно менялось, что видно на примере стандарта NFPA 654 [1]. Первоначально такую аэровзвесь определяли как смесь мелких (прошедших через сито с ячейками размером $420 \cdot 10^{-6}$ м) частиц твердого горючего материала с воздухом, способную распространять горение в диапазоне концентраций горючего C_s между нижним (LEL) и верхним (UEL) значениями. В дальнейшем для учета частиц в виде тонких и длинных волокон, не выделяемых просеиванием, но способных образовать взрывоопасную аэровзвесь, из определения исключили упоминание о сите. Позднее уточненное ограничение ($< 500 \cdot 10^{-6}$ м) стали относить к минимальному из габаритных размеров частицы.

Известно, что $LEL > 0,02 \text{ кг/м}^3$, $UEL < 2 \text{ кг/м}^3$. Поэтому отложения мелких дисперсных горючих материалов, для которых, как правило, $C_s > 100 \text{ кг/м}^3$, являются взрывобезопасными. Для перехода во взрывоопасное состояние такие отложения требуется взвихривать, создавая нестационарную турбулентную взвесь, разбавленную воздухом в необходимой степени. Исключение составит отложение пухообразного материала с диаметром волокон d_s и C_s , удовлетворяющими требованиям к взрывоопасной аэровзвеси. Такое отложение назовем стационарной аэровзвесью (СА).

В настоящей работе впервые исследовали скорость распространения пламени (U_n) и избыточное давление взрыва (P_{ex}) двух видов СА - тополиного пуха ($d_s \approx 8 \cdot 10^{-6}$ м) и летучек одуванчика ($d_s \approx 15 \cdot 10^{-6}$ м).

Непрямые отложения обоих растительных материалов отвечали концентрации горючего, приблизительно равной стехиометрической ($C_{s,st} \approx 0,25 \text{ кг/м}^3$). Поэтому влияние плотности аэровзвеси на показатели ее горения могло исследоваться только в диапазоне богатых горючим смесей.

U_n определяли для различных вариантов формирования отложения и направления движения пламени. Результаты определения U_n для отложения тополиного пуха в горизонтальной стеклянной трубе с внутренним диаметром 62 мм приводятся в табл.1. Во всех опытах сглаженная форма пламени была плоской, что позволяет ассоциировать данный параметр с нормальной скоростью распространения пламени по СА.

P_{ex} определяли в 18,7-л сферической бомбе, заполненной СА, при зажигании в центре. Максимальные U_n и P_{ex} отвечали стехиометрической концентрации горючего и составили для тополиного пуха и летучек одуванчика (0,32 м/с, 550 кПа) и (0,19 м/с, 410 кПа) соответственно.

Таблица 1. Скорость распространения в отложениях тополиного пуха

Номер опыта	$C_s/C_{s,st}$	$U_n, 10^{-2} \text{ м/с}$
1	1	31
2	2	31
3	3	25
4	4	18
5	4,5	0

На рис.1 и 2 приводятся соответственно экспериментальная зависимость давления взрыва P отложения пуха от времени и расчетная зависимость скорости выгорания U_c отложения пуха от текущего абсолютного значения давления взрыва по известному соотношению [3]:

$$U_c = (dP/dt) / [3(R_f^2/R^3) (P/P_a)^{1/\gamma} (P_m - P_a)], \quad (1)$$

где $P, dP/dt$ — текущие значения соответственно абсолютного давления продуктов горения (кПа) и его производной по времени — скорости нарастания давления продуктов горения (кПа/с) во взрывной камере;

R_f — расчетное значение радиуса сферы, объем которой совпадает с текущим значением объема продуктов горения, м;

$$R_f = R \cdot [1 - (P_a/P)^{1/\gamma} (P_m - P)/(P_m - P_a)]^{1/3};$$

R — радиус взрывной камеры, м; $R = 0,17$ м;

P_a — начальное (атмосферное) абсолютное давление воздуха во взрывной камере, кПа; $P_a = 100$ кПа;

P_m — максимальное абсолютное давление продуктов горения, кПа;

γ — постоянная адиабаты для воздуха; $\gamma = 1,4$.

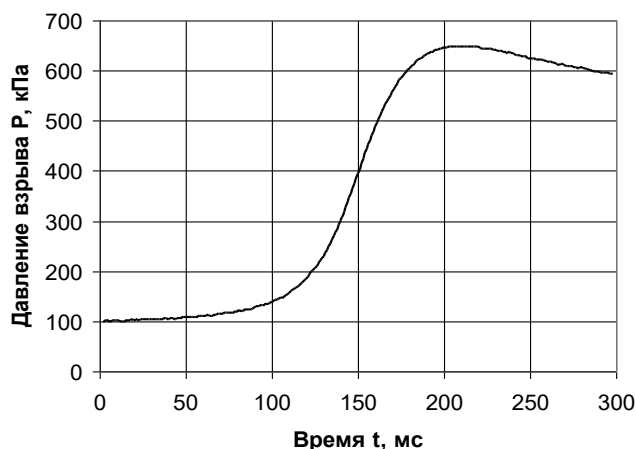


Рис. 1. Зависимость давления взрыва отложения пуха от времени: точке перегиба отвечает $P \approx 400$ кПа

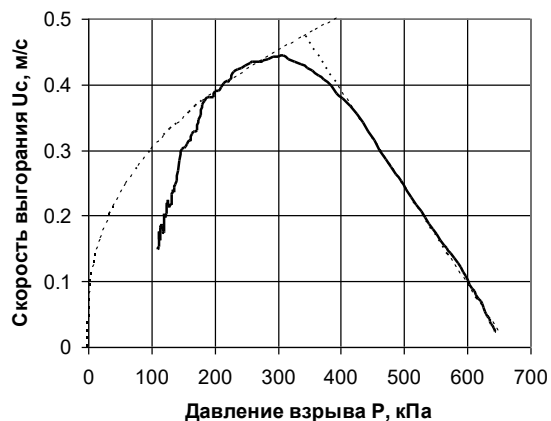


Рис. 2. Зависимость скорости выгорания отложения пуха от текущего абсолютного значения давления взрыва (сплошная линия)

В расчете принято $P_m = 700$ кПа. Вообще говоря, применение соотношения (1) предполагает однородность горючей среды в камере, что в силу гравитационного уплотнения пуха не имеет места: плотность пуха меняется от $C_{s,st}$ в верхней части камеры до $2C_{s,st}$ - в нижней. Тем не менее уверенность в целесообразности использования соотношения (1) для обработки данных по распространению пламени тополиному пуху подтверждается тем, что согласно данным табл. 1 скорость пламени в тополином пухе слабо зависит от плотности пуха в рассматриваемом диапазоне изменения этого параметра.

Подтверждение величины нормальной скорости горения непряматого тополиного пуха можно получить на основе анализа результатов исследования горения отложения пуха в герметичной камере (см. рис. 1 и 2). График $P(t)$ на рис. 3 имеет точку перегиба, отвечающую давлению $P \approx 400$ кПа и свидетельствующую о начале неадиабатической стадии горения. Этому же значению давления взрыва соответствует заметный, хотя и слабо выраженный, излом зависимости $U_c(P)$, поскольку при больших давлениях график $U_c(P)$ близок к прямой, показанной на рис. 4 пунктиром. До отмеченного излома зависимость $U_c(P)$ для отложения тополиного пуха имеет сложный вид и не может на всем протяжении адиабатической стадии развития горения аппроксимироваться степенной функцией, как для газозадушной смеси

$$U_c = U_n (P/P_a)^\varepsilon, \quad (2)$$

где U_n — нормальная скорость горения смеси при нормальных начальных условиях (комнатной температуре и атмосферном давлении в камере);

ε — термокинетический показатель.

Тем не менее, имеется участок зависимости $U_c(P)$, где такую аппроксимацию можно предложить. Для получения участка аппроксимации максимальной протяженности (пунктирная кривая на рис. 2) параметры аппроксимации (2) для тополиного пуха должны быть следующие: нормальная скорость при атмосферном давлении $U_n(P_o) = 0,3$ м/с, показатель степени $\varepsilon = 0,37$. Протяженность участка аппроксимации по давлению составила от 180 до 300 кПа. Совпадение (в пределах погрешности измерений) значений U_n , полученных для тополиного пуха в герметичной камере и стеклянной трубе, подтверждает как целесообразность данной характеристики горения СА, так и удовлетворительную точность ее количественной оценки.

Сопоставление полученных в работе скоростей распространения пламени по стационарным аэрозвесям волокнистых материалов и скоростей распространения пламени по одиночным растительным волокнам (стеблям трав с диаметром d_s от 60 мкм до 500 мкм) [4] демонстрирует возможность единой оценки $U_n \approx 3 \cdot 10^{-5} d_s^{-1}$. Данная оценка по характеру зависимости совпадает с выводами теории горения неподвижной аэрозвеси из монодисперсных частиц сферической формы [2].

Список литературы

1. NFPA 654 Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids - Quincy: NFPA.
2. Eckhoff R.K., 2003, Dust explosions in the process industries. 3rd edition, Gulf Professional Publishing/Elsevier, Boston, - 720 p.
3. Kumar R. K., Bowles E. M., Mintz K. J. Large-Scale Dust Explosions Experiments to Determine the Effects of Scaling on Explosion Parameters // Combustion and Flame, 1992, Vol.89, pp. 320–332.
4. Полетаев Н.Л. О методе экспериментальной оценки нормальной скорости горения аэровзвеси. – Пожаровзрывобезопасность, 2010, Т. 19, № 10, с. 2-8.