

УДК 614.841.4

Богомаз А.М., аспирант

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного
дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор»

Г. Донецк

ПРОЦЕССЫ ДЫМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ

Дым является не менее опасным фактором пожара, чем высокая температура и токсичные продукты горения. Задымление путей эвакуации в горящем здании приводит не только к потере ориентации и увеличению времени пребывания человека в зоне воздействия пожара. Плотный дым оказывает также сильное психологическое воздействие на людей. Сильная задымленность и токсичные газы представляют реальную угрозу тем, кто находится в здании во время пожара. Они приносят огромный материальный ущерб, исчисляемый десятками миллиардов долларов в год, в них гибнут десятки тысяч людей.

Считается, что дым это совокупность газообразных продуктов, в которых рассеяны небольшие твёрдые и жидкие частицы. Здесь же подчёркивается, что эти частицы не должны рассматриваться отдельно. Исходя из этого, можно сделать вывод, что дымы ведут себя как аэрозоли, но с намного меньшими размерами частиц.

Само дымообразование – это сложный физико-химический процесс, состоящий из нескольких этапов, процесс протекания которых зависит от условий термического разложения или пиролиза при повышенной температуре.

Объём продуктов дымообразования различных материалов на начальной фазе вследствие недостатка кислорода должен соответствовать объёму продуктов пиролиза. С увеличением температуры горючих материалов процесс дымообразования сопровождается сложными химическими процессами и выбросом в газовую фазу ряда различных веществ. Вторая фаза дымообразования, характерной температурой которой является 700...1000 °С, сопровождается теми же процессами, что и в первой стадии, а также процессами вторичного дымообразования продуктов термодеструкции материала, уже находящихся в газовой фазе.

Обычно оптическая плотность дыма D , Дб/м, сравнивается с дымовым потенциалом D_0 по формуле [1]

$$D = \chi q D_0, \quad (1)$$

где χ – доля горючего материала, превратившегося в летучие продукты термического разложения;

q – пожарная нагрузка, кг/м²;

D_0 – дымовой потенциал, (Дб·м)/кг.

Имеются данные о величине дымового потенциала при пламенном горении и при непламенном разложении продуктов горения [1]. Так, дымовой потенциал при пламенном горении для целлюлозы равен $D_0 = 0,12$ (Дб·м)/кг.

При доле целлюлозы, превратившейся в летучие продукты термического разложения $\chi = 0,9$ и пожарной нагрузке $q = 50$ кг/м², максимальная оптическая плотность дыма согласно (1) и будет равна $D = 0,9 \cdot 50 \cdot 0,12 = 5,4$ Дб/м. В работе [1] показано, что оптическая плотность дыма удовлетворительно коррелирует с видимостью. Обработка экспериментальных данных [1] показала, что для определения длины видимости может быть предложена формула

$$l_v = \frac{20}{1 + D}, \quad (2)$$

где l_v – видимость, м.

На рис. 1 приведены результаты сравнения расчётных данных по формуле (2) с экспериментальными данными [1].

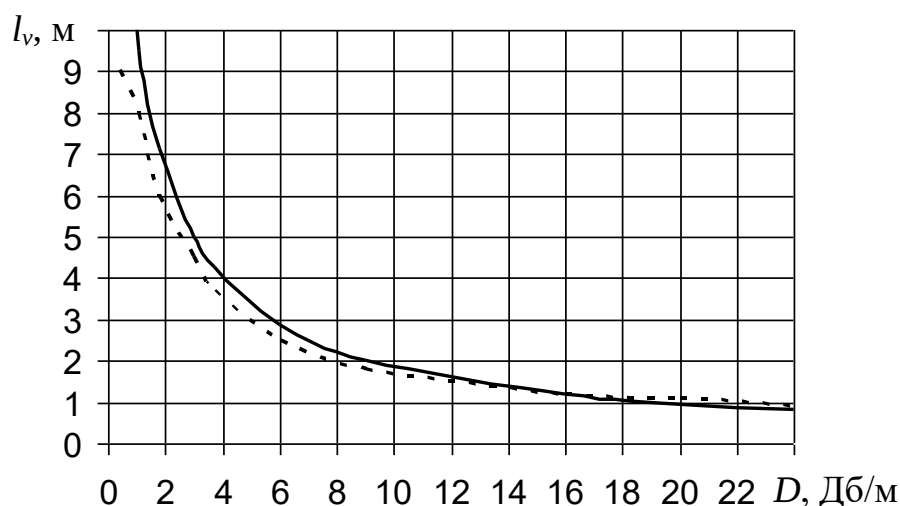


Рис. 1. Зависимость длины видимости от оптической плотности дыма: сплошная линия – эмпирическая зависимость (2); прерывистая линия – экспериментальные данные

Как видно, расчётные данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Тогда для рассматриваемого примера получим, что при оптической плотности $D = 5,4$ Дб/м видимость согласно (2) будет равна $l_v = 3$ м. Как указывается [1], минимально допустимая видимость должна быть не менее 10 м.

Интенсивность источника выделения дыма G_d , Дб/(м²·с), при горении может быть представлена в виде

$$G_d = D_0 \chi \frac{mb l}{V} (1 - C/C_0), \quad (3)$$

где m – массовая скорость выгорания на единицу площади горения, кг/(м²·с);
 χ – коэффициент неполноты сгорания горючего вещества;
 b – ширина зоны горения, м;
 l – длина зоны горения, м;
 V – объём дымовой камеры (помещения), м³;
 C – концентрация кислорода в пожарных газах, %;
 C_0 – концентрация кислорода в поступающем на очаг потоке воздуха, %.

В настоящее время для оценки дымообразующей способности материалов применяются различные методы. В частности, оптический метод, который разделяется на статический и динамический методы. При этом коэффициент дымообразования или дымовой потенциал исследуемого материала определяется по формуле [1]

$$D_m = \frac{V}{m_0 L} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right), \quad (4)$$

где D_m – коэффициент дымообразования, м²/кг;
 L – длина пути оптического луча, м;
 I_0 – начальное светопропускание, %;
 I – конечное светопропускание, %;
 m_0 – масса материала, превратившегося в дым, кг, равная

$$m_0 = \chi q S, \quad (5)$$

где S – площадь горения, м².

Кроме коэффициента дымообразования рассматривается также оптическая плотность дыма D , Дб/м, в виде зависимости

$$D = m_0 D_m / V, \quad (6)$$

откуда $D_m = \frac{DV}{m_0}$, м²/кг.

В качестве примера связи коэффициента дымообразования с оптической плотностью дыма рассмотрим, что произойдёт, если в помещении площадью $S = 100$ м² загорится древесина. При доле горючего материала, превратившегося в летучие продукты термического разложения $\chi = 0,9$, и пожарной нагрузке $q = 50$ кг/м² на площади горения 2 м² масса материала, превратившегося в дым, будет равна $m_0 = 0,9 \cdot 50 \cdot 2 = 90$ кг. Будем считать, что дым заполнит не всё помещение высотой 5 м, а только часть его толщиной $y = 4$ м. Тогда объём дыма в помещении будет равен $V = Sy = 100 \cdot 4 = 400$ м³. Согласно [1], коэффициент дымообразования при горении древесины равен $D_m = 57$ м²/кг. Подставляя эти данные в формулу (6), найдём

$$D = 90 \cdot 57 / 400 = 12,8 \text{ Дб/м.}$$

Применяя полученную оптическую плотность дыма по формуле (2) найдём, что видимость в этом случае будет составлять на более 1,5 м.

Оптический метод изучения динамики дымообразования анализирует поглощение и рассеивание света. Из анализа измерений следует, что такие характеристики частиц дыма, как их размер и объём, оптическая плотность дыма, распределение частиц в пространстве и во времени являются основными.

В работе [2] исследована динамика дымообразования для широко распространённых материалов, таких как дерево, поливинилхлорид (ПХВ) и полиуретановые пены. Условия экспериментов в лабораторной установке были выбраны таковыми, которые позволили сравнивать полученные результаты с результатами, полученными другими авторами иными методами, в частности, методом отбора дыма из установки.

Схема лабораторной установки представляет собой камеру с исследуемым дымом от горящего образца. Свет, пройдя через камеру, поступал в расщепитель лучей по длинам волн. Измерения рассеянного света позволили определить размеры частиц дыма и его оптическую плотность.

Обнаружено, что размер частиц изменяется в ходе горения. Для дерева наблюдается резкое увеличение размеров частиц с увеличением времени горения от 0,5 мкм до 1,5 мкм. На рис. 2 представлены экспериментальные данные динамики оптической плотности во времени при горении древесины. Там же приведены и расчётные данные. Установлено, что древесина даёт наибольшую оптическую плотность и наиболее опасна с точки зрения затемнения дымом помещения и коридоров при пожаре.

Для сравнения расчётных данных с экспериментальными данными использовалась аналитическая зависимость

$$D/D_{\max} = (\tau/\tau_m)^3 \exp[3(1 - \tau/\tau_m)], \quad (7)$$

где $D_{\max}$ – максимальная оптическая плотность дыма, Дб/м;

D – текущая во времени оптическая плотность дыма, Дб/м;

τ – время с момента возникновения пожара, с (мин);

τ_m – время выхода оптической плотности дыма на максимум, с (мин).

В связи с тем, что образование дыма может запаздывать с началом горения, представим формулу (7) для расчёта динамики дымообразования в виде

$$D = D_{\max} \left(\frac{\tau - \tau_0}{\tau_m - \tau_0} \right)^3 \exp \left[3 \left(1 - \frac{\tau - \tau_0}{\tau_m - \tau_0} \right) \right], \quad (8)$$

где τ_0 – время с момента дымообразования при пожаре, с (мин).

Полученная формула (8) верна при $\tau > \tau_0$. При $\tau < \tau_0$ необходимо принимать $D = 0$. Для согласования расчётных и экспериментальных данных принималось $D_{\max} = 2,1$ Дб/м; $\tau_0 = 2$ мин; $\tau_m = 5,5$ мин. Как видно на рис. 2,

достигнуто удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных данных.

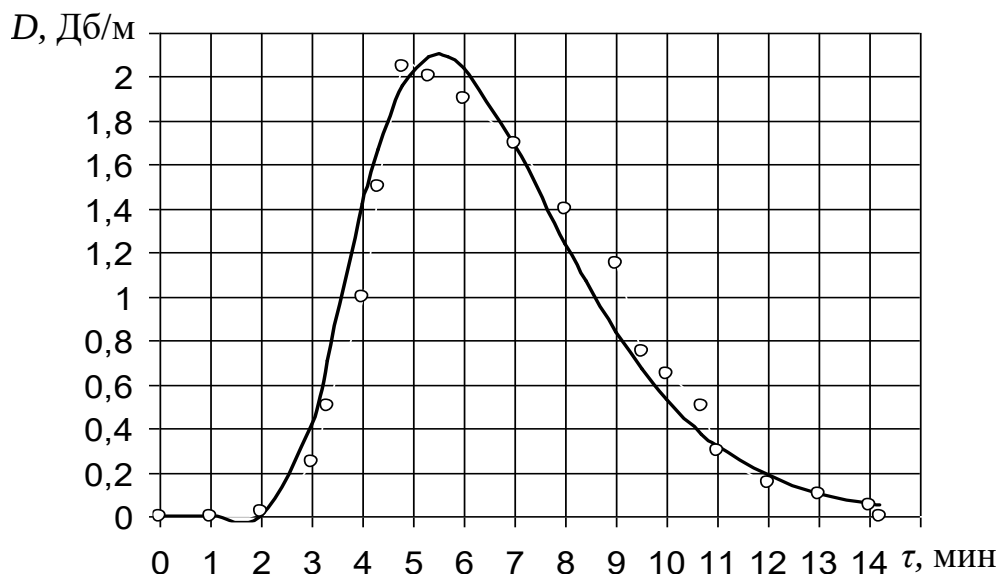


Рис. 2. Изменение оптической плотности дыма во времени при горении древесины:
 ○ – экспериментальные данные [2], кривая – аналитическая кривая (7)

Дальнейшие исследования были посвящены не только динамике дымообразования, но также изучению зависимости коэффициента дымообразования от свойств материалов для различных материалов, в частности древесины, пенопласта, ПВХ, поливинилхлорида и др. Исследования [2] проводились при небольшой плотности теплового потока, равной 35 кВт/м^2 и температуре на поверхности образцов 723 К . В результате исследований установлено, что коэффициент дымообразования для древесины находится в пределах $D_m = 727...833 \text{ м}^2/\text{кг}$. Для пенопласта этот диапазон равен $D_m = 156...191 \text{ м}^2/\text{кг}$. Установлено, что материал при различной толщине имеет различную дымообразующую способность из-за неравномерного нагрева в глубину образца. Этот эффект ещё более проявляется для материалов большой толщины.

Наблюдения за динамикой дымообразования показали, что время достижения максимальной оптической плотности, связанное с интенсивностью дымообразования, сильно зависит от геометрических размеров образцов. Так, на дымообразующую способность материала в условиях термического разложения под действием высоких температур влияют такие характеристики материала, как начальная его масса, плотность и толщина образца. Установлено, что время достижения максимальной оптической плотности дыма составляет для древесины $\tau_m = 131...158 \text{ с}$, а для пенопласта на основе смолы оно равно $\tau_m = 100...130 \text{ с}$.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные изменения коэффициента дымообразования во времени при горении древесины. Там же

приведены и расчётные данные, полученные по аналитическим зависимостям (6) и (8).

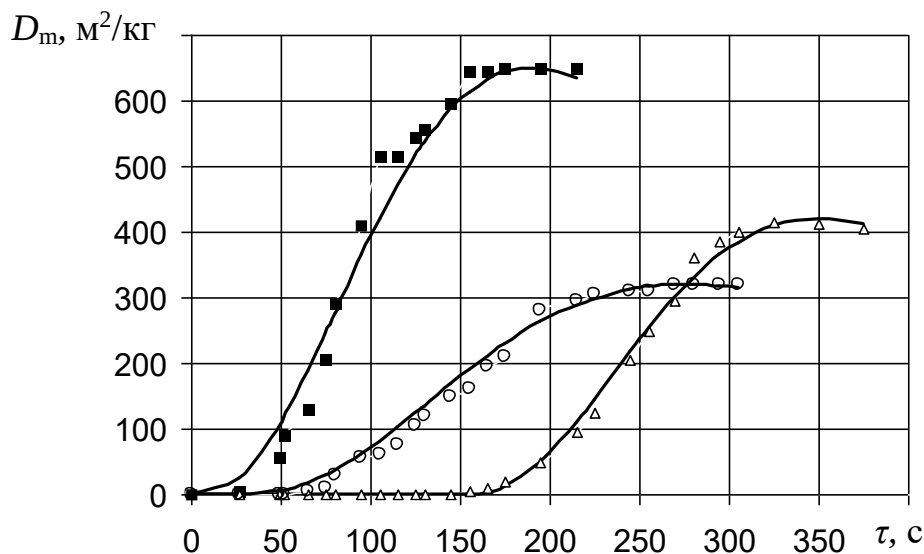


Рис. 3. Изменение коэффициента дымообразования во времени при горении различных материалов: ■ – древесина; ○ – поливинилхлорид; △ – винилискожа

Для согласования расчётных и экспериментальных данных было принято: $D_m = 650; 320; 420$ м²/кг – соответственно для древесины, поливинилхлорида и винилискожи; $\tau_m = 190; 275; 350$ с – соответственно для древесины, поливинилхлорида и винилискожи; $\tau_0 = 0; 25; 150$ с – соответственно для древесины, поливинилхлорида и винилискожи.

Как видно на рис. 3, расчётные и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются друг с другом.

Таким образом, сравнение и удовлетворительная сходимость расчётных данных с достаточно большим объёмом экспериментальных данных по динамике дымообразования при горении различных материалов позволяет делать научно обоснованный прогноз времени образования недопустимых концентраций дыма как в помещениях, так и в коридорах.

Список литературы

1. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
2. Зотов, Ю.С. Расчет полей оптической плотности дыма при пожарах / Ю.С. Зотов // Системы обеспечения пожарной безопасности объектов: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1992. – С. 128 – 135.