

УДК 622 82: 614. 842

## ПРОЦЕССЫ ПИРОЛИЗА И ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Ковальчик В.М., Ковалышин В.В., д.т.н., профессор

Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности

e-mail: kovalyshyn.v@gmail.com

*Получено аналитическое решение задачи пиролиза и горения твердого топлива как переход связанного углерода в свободное газообразное состояние с последующей его диффузией из пор и трещин обуглившейся массы и с дальнейшим перемешиванием с воздухом и химическими реакциями.*

*The analytical solution of the problem of pyrolysis and solid fuel combustion as transition of carbide carbon in free gaseous state with subsequent diffusion of interstices and intrinsic fractures of char mass and with further agitating with air and chemical reactions is achieved.*

(Поступила в редакцию 18 июля 2014 г.)

**Введение.** Математическое моделирование очага горения при различных пожарах в помещениях или каналах выполняется с помощью двух основных подходов [1]:

- без учета химических реакций и термогазодинамических условий в области горения;
- с рассмотрения самой модели горения.

В моделях горения, как правило, предполагают, что химические реакции происходят мгновенно. Поэтому скорость горения определяется тепломассообменными процессами, т. е. скоростями доставки в зону горения горючего и окислителя.

Таким образом, не уделяется достаточного внимания самому процессу горения, когда происходит пиролиз при высокой температуре и переход в твердом теле углерода из связанного в свободное состояние с последующей его диффузией в порах и трещинах, после чего происходят химические реакции углерода с кислородом.

Так, при разогреве участка кабельной продукции до высоких температур горючий материал поддается пиролизу, и образующиеся горючие газы сгорают с выделением тепла, часть которого идет на разогрев и дальнейший пиролиз прилегающих слоев кабельной продукции.

Для описания процесса развития и затухания пожара в работе [2] приведена эмпирическая зависимость интенсивности источника тепловыделения в зоне горения, которая выражает относительную интенсивность выгорания твердого материала с момента возникновения и развития пожара при его регулировании вентиляцией (ПРВ) или при регулировании пожарной нагрузкой (ПРН), то есть во всех случаях. Однако предложенная зависимость не отражает процессов пиролиза и диффузии образующихся газов и может быть использована только в узком диапазоне эмпирических данных.

Поэтому рассмотрим последовательно процесс пиролиза и горения твердого топлива. Возникновение пламенного горения начинается от зажигания, представляющего собой такой процесс, при котором происходит быстрая экзотермическая реакция, вызывая изменения в горючем материале, приводящие к резкому повышению в нем температуры по сравнению с температурой окружающей среды. Различают два характерных вида возникновения процесса горения: 1) вынужденное зажигание с помощью некоторого источника, такого, как электрическая искра или постороннее пламя; 2) самовоспламенение, при котором изнутри происходит нагрев твердого вещества в результате химических реакций.

Большинство пожаров связано с горением твердых материалов, хотя во многих случаях горят и жидкие и газообразные вещества. Однако термин «горючее вещество» используется в широком смысле для обозначения всего того, что горит, независимо от его агрегатного состояния.

Многообразие горючих веществ очень велико и включает в себя как простейшие газообразные углеводороды, так и твердые вещества с большой относительной массой и сложной химической структурой. Все эти вещества, перейдя в газообразное состояние и реагируя с кислородом в воздухе, образуют продукты горения и выделяют тепло в процессе окисления.

Образование пламени связано с газообразным состоянием вещества, поэтому горению твердых веществ предшествует процесс химического разложения вещества или пиролиза. Так как для пиролиза требуется значительно больше энергии, чем для простого испарения, то температура горящих твердых материалов по данным [3] должна составлять не менее 400 °С.

Состав летучих веществ, вступающих в химическую реакцию с кислородом, очень сложен. При термическом разложении некоторая, а то и значительная часть вещества при нагреве образует обугленную массу и тем самым мешает поступлению в пламя образующегося горючего газа.

Различают два режима горения: горючее вещество образует однородную смесь с воздухом, и горючее первоначально разделено с воздухом [3]. Второй режим как раз и соответствует твердому материалу. В этом случае скорость горения равна скорости поступления летучих веществ, образующихся при пиролизе, и непосредственно связана с интенсивностью теплообмена между пламенем и горючим.

Будем считать, что массовый расход продуктов пиролиза, образующихся при термическом разложении, связан со скоростью его образования

$$\frac{dI}{d\tau} = -k_1 I, \quad (1)$$

где  $I$  – расход продуктов пиролиза, кг/с;  $k_1$  – константа скорости реакции при пиролизе, 1/с.

Решением уравнения (1) при начальном условии  $I(0) = I_0$  является экспоненциальная зависимость вида

$$I = I_0 \exp(-k_1 \tau), \quad (2)$$

где  $I_0$  – начальный расход продуктов пиролиза, кг/с.

Поступление продуктов горения в поток воздуха связано с его диффузией и движением в порах и трещинах уравнением:

$$\frac{dm}{d\tau} = -k_2(m - I), \quad (3)$$

где  $m$  – массовый расход газообразных продуктов пиролиза, поступающих в поток воздуха, кг/с;  $k_2$  – коэффициент газообмена между потоком воздуха и стенками пор и трещин твердого материала, 1/с.

Подставляя функцию (2) в уравнение (3), находим его решение в виде

$$m(\tau) = \frac{k_2 I_0}{k_2 - k_1} [\exp(-k_1 \tau) - \exp(-k_2 \tau)]. \quad (4)$$

При коэффициентах газообмена и скорости реакции при пиролизе примерно равных друг другу:  $k_1 \approx k_2$ , вместо формулы (4), получим

$$m(\tau) = I_0 k_1 \tau \exp(-k_1 \tau). \quad (5)$$

Поскольку по мере выгорания материала происходит перемещение очага пожара, например, вдоль какого-нибудь канала, учтем этот фактор [4] и представим формулу (6) в виде

$$m = I_0 k_1 (\tau - x/w) \exp[-k_1 (\tau - x/w)], \quad (6)$$

где  $x$  – расстояние от места возникновения пожара в канале, м;  $w$  – скорость перемещения очага пожара, м/с.

Формула (6) верна при  $\tau > x/w$  и должна обращаться нуль при  $\tau < x/w$ . Для автоматического учета этого фактора преобразуем формулу (6) к виду

$$m = 0,5 I_0 k_1 [(\tau - x/w) + |\tau - x/w|] \exp[-k_1 (\tau - x/w)]. \quad (7)$$

На рис. 1 представлены кривые развития и перемещения очага горения вдоль канала.

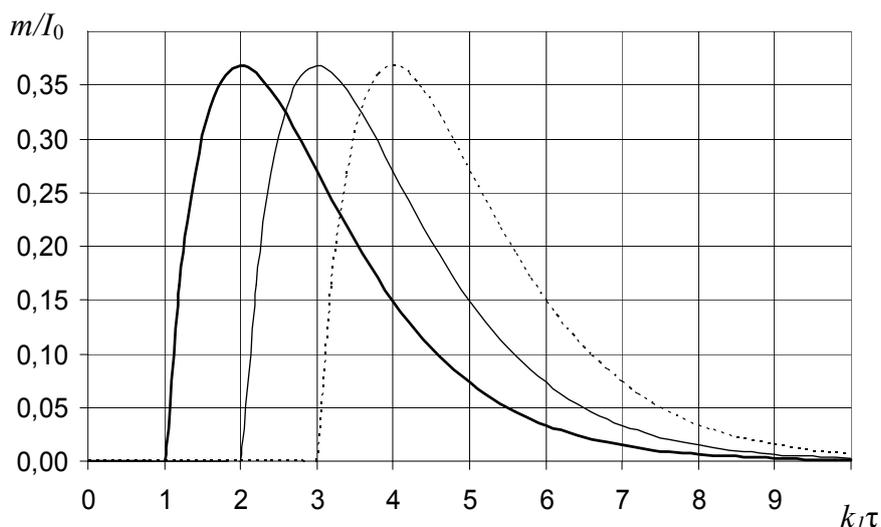


Рисунок 1 – Кривые развития и перемещения очага горения вдоль канала (жирная линия –  $k_1x/w=1$ , тонкая линия –  $k_1x/w=2$ , штрих-линия –  $k_1x/w=3$ )

Как видно, пока фронт пожара не достиг определенного расстояния от места возникновения пожара, здесь отсутствует горение. Затем в месте расположения фронта горения происходит бурное развитие пиролиза и выделение его газообразных продуктов с дальнейшим угасанием процесса в течение определенного времени.

На рис. 2 приведены кривые распределения вдоль канала зоны горения в различные моменты времени.

Анализ полученных результатов (рис. 2) показывает, что вначале зона горения имеет максимум в месте возникновения ( $k_1\tau = 1$ ), затем максимум смещается и в месте возникновения пожара интенсивность горения меньше, чем в точке максимума ( $k_1\tau = 2$ ), после чего в этом месте происходит догорание твердого материала ( $k_1\tau > 4$ ).

Поступая в поток воздуха, продукты пиролиза мгновенно вступают в химическую реакцию и выделяют тепло в единице объема в зависимости от концентрации кислорода с интенсивностью [3]

$$q = \chi \frac{mH_c}{V} \frac{C}{C_0}, \quad (8)$$

где  $\chi$  – коэффициент неполноты сгорания горючего материала;  $H_c$  – теплота сгорания летучих веществ, кДж/кг;  $V$  – объем зоны термического разложения, м<sup>3</sup>.

Свяжем объем зоны термического разложения с ее длиной  $l$  и с площадью  $S$  поперечного сечения канала:  $V = Sl$ , а начальный расход продуктов пиролиза примем равным начальной скорости  $v_0$  их поступления в поток воздуха, умноженной на площадь  $F = bl$  горячей поверхности:  $I_0 = v_0lb$ . Подставляя формулу (7) в формулу (8), получим

$$q = \frac{\chi v_0 H_c b}{2S} \frac{C}{C_0} k_1 [(\tau - x/w) + |\tau - x/w|] \exp[-k_1(\tau - x/w)], \quad (9)$$

где  $v_0$  – начальная массовая скорость поступления продуктов пиролиза в поток воздуха, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $b$  – ширина поверхности термического разложения, м.

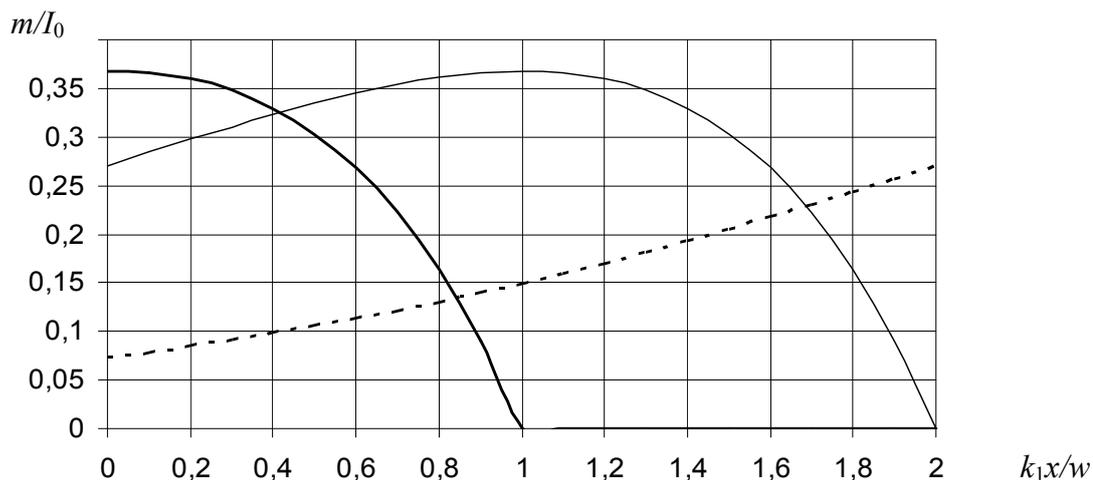


Рисунок 2 – Кривые распределения вдоль канала зоны горения в различные моменты времени (жирная линия –  $k_1\tau = 1$ , тонкая линия –  $k_1\tau = 2$ , штриховая линия –  $k_1\tau = 4$ )

**Выводы.** Предложенная формула (9), в отличие от известных эмпирических и аналитических зависимостей, учитывает, как процесс развития горения твердого материала, так и его выгорание с учетом перемещения пожара.

Анализ зависимости показывает, что фронт горения находится на расстоянии  $x = w\tau$  и со временем перемещается вдоль канала. Горение в различных сечениях канала начинается тем позже, чем дальше отстоит рассматриваемое сечение от места возникновения пожара. В то же время постепенно режим горения будет переходить в режим тления по мере уменьшения поступления продуктов пиролиза в поток воздуха.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
2. Астапенко, В.М. Термогазодинамика пожаров в помещениях/ В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков // – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
3. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров/ Д. Драйздейл // – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
4. Ковалишин, В.В. Математичне моделювання розвитку і гасіння пожеж різними засобами на об'єктах значної протяжності / В.В. Ковалишин. – Київ, Науковий вісник НДІПБ, 2013, № 1 (27). – С. 153 – 160.