

УДК 621.374:614.833

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАЖИГАНИЯ ПЫЛЕВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ИНДУКЦИИ ПРОЦЕССА

¹Задорожная Т.А., ¹Сечин А.И., ²Осипенко С.И., ¹Долдин И.Н.,¹Терехин Д.В., ¹Барский М.С.¹ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: auct-68@yandex.ru;²Уральский Институт ГПС МЧС России, Екатеринбург

Разработана физическая модель зажигания пылевоздушной смеси высокотемпературным источником зажигания, учитывающая прогрев твердой фазы и ее испарение. Получено аналитическое выражение, описывающее распределение температуры в рассматриваемой системе. Получено выражение, которое может быть использовано при определении времени установления стационарного испарения твердой фазы, до прогрева паров вещества до температуры самовоспламенения, что является критерием растущей потенциальной опасности. Получено выражение для оценки периода индукции зажигания пылевоздушных смесей сложных органических веществ высокотемпературным источником зажигания, которое может быть использовано для оценки рисков технологических процессов.

Ключевые слова: технологический риск, испарение, самовоспламенение, период индукции, энергия зажигания

SOME ASPECTS OF MODELING THE IGNITION AIR-DUST MIXTURE TO DETERMINE THE TIME OF INDUCTION PROCESS

¹Zadorozhnaya T.A., ¹Sechin A.I., ²Osipenko S.I., ¹Doldin I.N.,¹Terehin D.V., ¹Barsky M.S.¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: auct-68@yandex.ru;²Ural Institute of State Fire Fighting Service of Emergency Control Ministry of Russia, Ekaterinburg

A physical model of air-dust mixture ignition by high – temperature source is developed. It takes into account the heating and evaporation of the solid phase. Analytical expression which describes temperature distribution in this system is found. An expression that can be used in determining the time of establishment of steady evaporation of the solid phase and vapor substances heating to a temperature of ignition. It is the criterion of increasing the potential danger. An expression that evaluates the induction period of ignition of air-dust mixtures complex organic compounds by high-temperature ignition source is found. It can be used for risk assessment processes.

Keywords: technological risks, evaporation, combustion, induction period, ignition energy

Известно много способов математического моделирования с целью оценки опасности технологического процесса и перерабатываемых в нем пылеобразующих материалов, что всегда представляло как большое практическое значение, так и основу расчетов рисков [1-5].

Цель исследования – нами была поставлена задача разработки физической модели зажигания пылевоздушной смеси, учитывающей прогрев твердой фазы и ее испарение, с целью оценки риска появления опасных и пограничных состояний технологической системы и предупреждения аварийных ситуаций.

Предлагаемая модель зажигания заключается в следующем:

1) пылевоздушная смесь считается некоторым однородным веществом, теплофизические свойства которого не зависят от температуры;

2) выделившееся источником зажигания тепло переносится лучистым потоком, который полностью поглощается на поверхности вещества;

3) на поверхности вещества под действием поглощенного тепла начинается газификация (испарение), скорость которой изменяется во времени;

4) энергия источника зажигания расходуется на нагрев, испарение вещества и рассеивается в веществе;

5) в качестве условия зажигания принимается прогрев продуктов газификации вещества до температуры самовоспламенения.

Рассмотрен одномерный случай. Предполагается, что вещество занимает часть пространства $x \geq 0$. В момент $t = 0$ в плоскости $x = 0$ начинает действовать тепловой источник мощностью $q(t) = \sigma \cdot T^{*4}$. Распределение температуры в веществе в каждый момент времени с учетом затрат тепла на испарение находится из решения уравнения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (1)$$

С начальными и граничными условиями: при условиях

$$T(x, 0) = T(\infty, t); \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=\int_0^t v(t) dt} = q(t) - L_0 \cdot v(t). \quad (3)$$

Уравнение (1) для системы координат, движущейся со скоростью испарения $v(t)$ вдоль оси x переписывается как

$$\frac{\partial T}{\partial t} - v(t) \frac{\partial T}{\partial x'} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x'^2} \quad (4)$$

$$T(t) = \frac{a}{k\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{q - L_0 \cdot v(\tau)}{\sqrt{a(t-\tau)}} d\tau - \frac{v_0 \cdot T_0}{a} \int_0^t v(\tau) \cdot \exp\left[\frac{v_0^2}{a}(t-\tau)\right] \cdot \Phi^*\left(v_0 \sqrt{\frac{t-\tau}{a}}\right) d\tau, \quad (7)$$

где $\Phi^*(x) = 1 - \Phi(x)$.

$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – интеграл вероятности.

Используя известное соотношение

$$\frac{1}{x + \sqrt{x^2 + 2}} < I^*(x) \leq \frac{1}{x + \sqrt{x^2 + \frac{4}{\pi}}} \quad (8)$$

видим, что в выражении (8) основную роль играет первый член. Тогда рассматривая (7) как интегральное уравнение на неизвестную функцию $v(t)$, получим приближенное решение, учитывая только первый член в (7)

$$v(t) = \frac{q}{L_0} - \frac{k}{\sqrt{a \cdot \pi \cdot L_0}} \int_0^t \frac{\partial T_0(\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} \quad (9)$$

$$v(t) = \frac{q}{L_0} - \frac{k \cdot T_0 \sqrt{\pi}}{2\sqrt{a \cdot t_0 \cdot L_0}} \left[I_0\left(-\sqrt{\frac{t}{t_0}}\right) + J_0\left(-\sqrt{\frac{t}{t_0}}\right) \right], \quad t < t_0, \quad (11)$$

где $I_0(x)$ и $J_0(x)$ – модифицированные функции Бесселя и Струве, соответственно.

Так как рассматриваются времена $t < t_0$, то, используя разложения $I_0(x)$ и $J_0(x)$ в ряды и ограничиваясь основными членами рядов, а также учитывая, что $v(0) = 0$, найдем выражение для скорости испарения вещества и времени установления стационарного испарения:

$$v(t) = \frac{4q^2 \sqrt{a}}{\pi^{3/2} \cdot k \cdot T_0 \cdot L_0} \sqrt{t}; \quad (12)$$

$$t_0 = \frac{\pi \cdot k^2 \cdot T_0^2}{4 \cdot a \cdot q^2}. \quad (13)$$

Формулы (11)–(13) справедливы до того момента времени, пока пары вещества не прогреются до температуры самовоспла-

Решение уравнения теплопроводности с учетом затрат тепла на испарение дает, что температура на границе испарения подчиняется закону:

$$T(x', 0) = T(\infty, t) \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x'}(0, t) = q(t) - L_0 \cdot v(t). \quad (6)$$

Для определения явного выражения для скорости нестационарного испарения и температуры поверхности вещества, необходимо решать уравнения (7) и (9) с учетом активационной формулы. Однако аналитическое решение такой задачи не представляется возможным. Одним из способов решения аналогичных задач в физике горения является задание одной из зависимостей $v(t)$, либо $T(t)$, исходя из общих физических соображений.

Принято, что температура поверхности испарения подчиняется закону

$$T_0(t) = T_0 \cdot \left[1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{t}{t_0}}\right) \right], \quad (10)$$

где t_0 – момент времени установления стационарного испарения.

Подставляя (10) в (9), определили

менения. При самовоспламенении паров появится дополнительный источник тепла, мощность которого определяется тепловым эффектом реакции окисления.

Скорость газификации твердого вещества и температура поверхности вещества при наличии реакции окисления газовой фазы достаточно полно представлены в работах [2, 6–7].

Для определения момента времени достижения газовой фазой температуры $T_{свс}$ использовано выражение (10). Учитывая (13), а также соотношение $a \cdot C_p \cdot \rho = k$, получим

$$t_n = \frac{\pi \cdot C_p \cdot \rho \cdot k \cdot T_0^2}{4q^2} \cdot \ln^2 \frac{T_0}{T_0 - T_{свс}}. \quad (14)$$

Для пылевых взвесей сложных органических веществ $T_{свс} \ll T_0$. С учетом

того, что $T_0(0) = T_n$, формула (14) запишется

$$t_n = \pi \frac{C_p \cdot \rho \cdot k \cdot (T_{свс} - T_n)^2}{4q^2}, \quad (15)$$

где q – тепловой источник мощностью $q(t) = \sigma \cdot T^{*4}$.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Разработана физическая модель зажигания пылевоздушной смеси, учитывающая прогрев твердой фазы и ее испарение при воздействии на систему высокотемпературным источником зажигания.

Выражение (13) может быть использовано при определении времени установления стационарного испарения, что является критерием растущей потенциальной опасности.

Полученное выражение (15) может быть использовано в простых инженерных расчетах при оценке периода индукции за-

жигания пылевоздушных смесей высокотемпературным источником зажигания, что в технологической системе является инициатором аварийной ситуации, а также при оценке рисков технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989. – 678 с.
2. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
3. Корольченко А.Я. Пожаровзрывобезопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986. – 216 с.
4. Сечин А.И. Безопасность систем перерабатывающих пылеобразующие материалы / под ред. д.ф.-м.н. Н.И. Федосова. – Томск: Изд-во ТГУ, 2003. – 138 с.
5. Алгоритм Н.Н. Семенова и длительное хранение и транспортирование веществ / А.И. Сечин, А.А. Шаталов, В.Я. Яшин, А.А. Сечин, Д.А. Лаптев, Т.А. Задорожная // Известия Самарского научного центра РАН. Самара: Изд-во СНЦ РАН. Спецвыпуск: Безопасность, технология, управление. – 2008. Вып. 9. – С. 301–305.
6. Теория нестационарного горения пороха / Я.Б. Зельдович, О.И. Лейпунский, В.Б. Либрович. – М.: Наука, 1975. – 135 с.
7. Новожилов Б.В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. – М.: Наука, 1973. – 176 с.