

О.Е. Безуглов, начальник кафедры, УГЗУ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРЕДНЕОБЪЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОМЕЩЕНИИ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА

(представлено доктором техн. наук Ю.А. Абрамовым)

Построена математическая модель изменения среднеобъемной температуры газовой среды в помещении на начальной стадии пожара. Модель опирается на законы сохранения массы и энергии и может быть использована при проектировании систем раннего обнаружения пожаров.

Постановка проблемы. Пожары в производственных и непромышленных помещениях представляют особую опасность, как для жизни и здоровья людей, так и для материальных ценностей. Ущерб от таких пожаров во многом определяется стадией, на которой будет обнаружен пожар и начата его локализация и ликвидация. Тушение пожара на начальной стадии практически невозможно без систем автоматического пожаротушения. В свою очередь, их успешное функционирование определяется адекватностью модели пожара в помещении. Важным компонентом такой модели является температура газовой среды, являющаяся входным воздействием для тепловых пожарных извещателей.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1, 2] в общем виде получена система уравнений, основанная на законах сохранения массы и энергии и описывающая изменение среднеобъемной температуры в помещении при пожаре. При этом непосредственное использование системы для оценки температуры в помещении невозможно ввиду неопределенности ряда параметров (тепловой поток, поглощаемый ограждающими конструкциями, расход газов через проемы в помещениях и др.).

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является построение математической модели среднеобъемной температуры в помещении на начальной стадии пожара.

Система уравнений, в рамках интегральной математической модели, описывающей процессы, имеющие место для начальной стадии пожара в помещении, будет иметь вид [1, 2]

$$\eta\psi_y FQ - c_p TG - Q_1 = 0; \quad (1)$$

$$V \frac{dp}{dt} = \psi_y F - G; \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{T^2}{\rho_0 T_0} \frac{dp}{dt}, \quad (3)$$

где η – коэффициент полноты горения; ψ_y – удельная массовая скорость выгорания; F – площадь горения; Q – теплота сгорания; c_p – изобарная теплоемкость газов; T – среднеобъемная температура; G – расход газов, покидающих помещение через проемы; Q_1 – тепловой поток, поглощаемый ограждающими конструкциями; V – объем помещения; p – среднее давление газовой среды; ρ_0 , T_0 – плотность и температура среды перед началом пожара.

Определяя G из (1) и $\frac{dp}{dt}$ из (3), а затем, подставляя их в (2), получим

$$\frac{1}{T} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_0 T_0 V} (\eta \psi_y F Q - Q_1 - c_p \psi_y F T). \quad (4)$$

Тепловой поток Q_1 , поглощаемый ограждающими конструкциями, состоит из конвективной Q_k и лучистой Q_l составляющих. Конвективная составляющая определяется выражением

$$Q_k = \alpha_0 F_1 (T - T_0)^{4/3}, \quad (5)$$

где $\alpha_0 = 1,74d^{4/3}$; d – константа, лежащая в диапазоне $0,78 \div 0,9$; F_1 – полная площадь ограждающих конструкций (пол, стены, потолок). Лучистая составляющая может быть выражена через количество тепла Q_n , выделяющееся в результате химической реакции в пламенной зоне за единицу времени (скорость тепловыделения в очаге пожара)

$$Q_l = \gamma Q_n = \gamma \eta \psi_y F Q, \quad (6)$$

где γ – относительный лучистый тепловой поток, поступающий в ограничивающие конструкции от факела пламени. Объединяя (4)-(6), получим

$$\frac{1}{T} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_0 T_0 V} \left[\eta \psi_y F Q (1 - \gamma) - \alpha_0 F_1 (T - T_0)^{4/3} - c_p \psi_y F T \right]. \quad (7)$$

Оценим величину параметра γ . Согласно закону Стефана-Больцмана лучистая составляющая имеет вид

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon c_0 F_{\phi} \left(\left(\frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right), \quad (8)$$

где $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$; F_{ϕ} – площадь поверхности факела пламени; T_{ϕ} , T_1 – температуры факела и ограждающих конструкций; ε – приведенная степень черноты системы двух черных тел – факела пламени и ограждающих конструкций:

$$\varepsilon = \left[\frac{1}{\varepsilon_{\phi}} + \frac{F_{\phi}}{F_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (9)$$

где ε_{ϕ} , ε_1 – степени черноты факела и поверхностей ограждений; F_1 – площадь поверхности ограждений. Для локальных пожаров в помещении на начальной стадии выполнены неравенства:

$$F_{\phi} F_1^{-1} \ll 1; \quad (10)$$

$$T_{\phi} \gg T_1. \quad (11)$$

С учетом (9)-(11) соотношение (8) примет вид

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\phi} c_0 10^{-8} F_{\phi} T_{\phi}^4. \quad (12)$$

Для определения площади поверхности факела примем гипотезу о его цилиндрической форме [3]. Тогда

$$F_{\phi} = F \left(1 + 4h_{\phi} d_{\text{э}}^{-1} \right), \quad (13)$$

где $F = 0,25\pi d_{\text{э}}^2$ – площадь очага горения; h_{ϕ} – высота пламени факела; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр очага горения. Для определения

приведенной высоты факела пламени $h_{\phi}d^{-1}$ получены различные выражения. В [4] предложено выражение

$$h_{\phi}d^{-1} = 10^{-2}(\eta\psi_y Q)^{0,4} F^{-0,1} - 1, \quad (14)$$

Объединяя (12)-(14), получим выражение для лучистой составляющей теплового потока, поступающего в ограждающие конструкции:

$$Q_{\text{л}} = 4 \cdot 10^{-10} \varepsilon_{\phi} c_0 T_{\phi}^4 (\eta\psi_y Q)^{0,4} F^{0,9}. \quad (15)$$

Подстановка в (15) величин c_0 ; $\varepsilon_{\phi} = 0,8$; $\eta = 0,9$ дает

$$\gamma = 1,96 \cdot 10^{-9} T_{\phi}^4 (\psi_y Q)^{-0,6} F^{-0,1}.$$

При удельной массовой скорости выгорания $\psi_y \geq 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ величина лучистого теплового потока не превышает 4% относительно величины скорости тепловыделения в очаге пожара, т.е. имеет место $\gamma \leq 0,04$. При этом величина площади горения F практически мало влияет на величину γ . Поэтому пренебрежем параметром γ в уравнении (7). Кроме того, в начальной стадии пожара величина третьего слагаемого в (7) не превышает 10% относительно первого слагаемого. В частности, для бензина отношение этих слагаемых составляет порядка 0,08. Тогда уравнение (7) может быть записано следующим образом

$$\frac{dT}{dt} \cong \frac{T}{c_p \rho_0 T_0 V} [\eta\psi_y F Q - \alpha_0 F_1 (T - T_0)^{4/3}]. \quad (16)$$

Полученное уравнение представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение. Решая его с начальным условием $T(0) = T_0$ (например, методом последовательных приближений или каким-либо из численных методов), получим зависимость среднеобъемной температуры в помещении от времени.

Уравнение (16) приближенно описывает изменение среднеобъемной температуры во времени. Помимо упрощений, которые были сделаны при переходе к нему от (7), оно содержит параметры, точные значения которых не могут быть известны:

– количество тепла, выделяемое при пожаре $\eta\psi_y FQ$;

– приведенный коэффициент конвективного теплообмена α_0 .

В связи с этим возникает задача о доверительных интервалах для температур $T(t)$, получаемых как решение уравнения (16). Ее решение возможно двумя способами. Первый способ состоит в том, что, варьируя параметрами, входящими в (16), получить ряд соответствующих им решений $T_i(t)$ и на их основе сформировать нижнюю и верхнюю границы

$$T_{\min}(t) = \min_i T_i(t); \quad T_{\max}(t) = \max_i T_i(t).$$

Второй способ заключается в переходе от детерминированной постановки задачи к стохастической, т.е. рассмотрении среднеобъемной температуры $T(t)$ и параметров, входящих в уравнение (16), как случайных процессов.

Выводы. Построена математическая модель, описывающая изменение среднеобъемной температуры в помещении с течением времени на начальной стадии пожара. Показано, что в этом случае система уравнений, описывающая изменение среднеобъемной температуры, может быть упрощена за счет особенностей, имеющих место на начальной стадии пожара. Модель может быть использована в системах раннего обнаружения пожаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. – М.: Академия ГПС, 2000. – 118 с.

2. Кошмаров Ю.А., Рубцов В.В. Процессы нарастания опасных факторов пожара в производственных помещениях и расчет критической продолжительности пожара. – М.: МИПБ МВД России, 1999. – 89 с.

3. Тищенко Е.А., Садковой В.П., Абрамов Ю.А. Оценка радиационной составляющей в тепловом потоке при пожаре в помещении // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техніка, 2007. – Вып. 79. – С. 383-386.

4. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990. – 420 с.

nuczu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 10.09.2008 г.