

УДК 614.8

В.П.САДКОВОЙ, канд. техн. наук

Университет гражданской защиты Украины, г.Харьков

ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОМЕЩЕНИИ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА

С учетом нестационарности начальной стадии пожара в помещении получена модель, описывающая в рамках интегральной теории среднеобъемную температуру в помещении.

Повышение эффективности систем противопожарной защиты неразрывно связано с совершенствованием характеристик систем раннего обнаружения опасных факторов пожара. В этой связи, одной из проблем является адекватное математическое описание изменения опасных факторов пожара, в частности, на его начальной стадии.

Одним из опасных факторов пожара является температура. Созданию математических моделей, описывающих температуру в помещении на начальной стадии пожара, посвящено достаточно много исследований. К числу основных публикаций, в которых наиболее полно рассмотрен этот вопрос следует отнести работы [1-5], в которых все математические модели, описывающие температуру в помещении в условиях пожара, разделены на три группы. Использование дифференциальных (полевых) моделей для создания систем раннего обнаружения опасных факторов пожара на сегодняшний день является проблематичным. Общим недостатком, объединяющим интегральные и зонные модели, является то обстоятельство, что при их использовании, как правило, постулируется стационарность условий горения. В частности, в [5] получена в рамках интегральной теории математическая модель температуры в помещении применительно к начальной стадии пожара. Эта модель получена в предположении, что удельная массовая скорость выгорания является постоянной величиной.

В [6] показано, что величина удельной массовой скорости выгорания, в частности, дизельного топлива, для рассматриваемой системы параметров пожара изменяется примерно в два раза на интервале времени $t = 300$ с.

Целью настоящей работы является получение математической модели, описывающей температуру в помещении применительно к начальной стадии пожара, когда в качестве пожарной нагрузки выступает горючая жидкость.

В начальной фазе пожара в помещении с малым значением проемности процесс газообмена характеризуется тем, что он осуществляется в одном направлении. Поступление воздуха в помещение из ок-

ружающей среды на этой стадии развития пожара отсутствует [5], а среднее значение давления газовой среды является практически неизменным и его можно положить равным величине давления наружного воздуха. В этой связи будет иметь место соотношение

$$\rho T = \rho_0 T_0, \quad (1)$$

где ρ_0, T_0 – плотность и температура среды перед началом пожара соответственно; ρ, T – плотность и температура среды в рассматриваемый момент времени.

С учетом (1), а также полагая, что в качестве пожарной нагрузки выступает горючая жидкость, в рамках интегральной теории математическая модель пожара будет иметь вид:

$$\eta \Psi_y F Q - c T G - Q_1 = 0 ; \quad (2)$$

$$\frac{\rho_0 T_0 V}{T^2} \frac{dT}{dt} = G - \Psi_y F, \quad (3)$$

где η – коэффициент полноты сгорания; Ψ_y – удельная массовая скорость выгорания; F – площадь очага горения; Q – теплота сгорания горючей жидкости; c – теплоемкость газовой среды; G – расход газов через проемы помещения; Q_1 – тепловой поток, поглощаемый ограждающими конструкциями; V – объем помещения.

Тепловой поток Q_1 обусловлен процессами конвективного и лучистого теплообмена и в начальной фазе пожара эти составляющие являются аддитивными, т.е.

$$Q_1 = Q_k + Q_l, \quad (4)$$

где Q_k, Q_l – конвективный и лучистый тепловые потоки соответственно от газовой среды и от факела пламени в ограждающие конструкции.

Для составляющей Q_k будет иметь место

$$Q_k = [\alpha_1 F_c + (\alpha_2 + \alpha_3) F_n] (T - T_1), \quad (5)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты теплоотдачи на вертикальных поверхностях ограждений, на поверхности пола и на поверхности потолка соответственно; F_c, F_n – площадь стен и пола (потолка) соответственно; T_1 – температура поверхности ограждения.

Коэффициенты $\alpha_i (i = \overline{1,3})$ определяются из критериального уравнения [2]

$$Nu_i = a_i (Cr_i \cdot Pr)^{1/3}, \quad (6)$$

где $Nu_i = \alpha_i L_i \lambda^{-1}$ – число Нуссельта; $Cr_i = g\beta(T - T_1)L_i^3 v^{-2}$ – число Грасгофа; $Pr = \mu\lambda^{-1}$ – число Прандтля; L_i – характерный геометрический параметр помещения; λ – коэффициент теплопроводности газа; ν, μ – коэффициент кинематической и динамической вязкости газа; β – коэффициент объемного расширения газа; g – ускорение силы тяжести; $a_1 = 0,15$; $a_2 = 0,094$; $a_3 = 0,162$.

Определяя коэффициенты теплоотдачи α_i из (6), выражение (5) можно записать в виде:

$$Q_k = a_i \lambda \left(\frac{g\beta Pr}{\nu^2} \right)^{1/3} F_1 (T - T_1)^{4/3}, \quad (7)$$

где $F_1 = F_c + 2F_n$.

В [7] приведена зависимость

$$(T - T_1)(T - T_0)^{-1} = (1 + 0,1Z^3) \exp(-Z), \quad (8)$$

где $Z = Bi \cdot F_u^{0,5}$; Bi, F_u – критерии Био и Фурье соответственно.

Применительно к рассматриваемому случаю

$$Z = 4,07\lambda_0^{-1}(T - T_1)^{1/3}(a_0\tau)^{0,5}, \quad (9)$$

где λ_0, a_0 – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материала ограждения соответственно; τ – продолжительность начальной фазы пожара.

Из анализа (9) следует, что в начальной фазе пожара, т.е. при $\tau \leq 300$ с, величина Z не превышает 0,2. Тогда в этом выражении разность $T - T_1$ можно заменить сомножителем $\gamma(T - T_0)$, где $\gamma = 0,85 \div 0,95$. Если предположить, что параметры газовой среды в помещении идентичны параметрам воздуха, то (7) трансформируется к виду:

$$Q_k = \alpha_{00}(T - T_0)^{4/3}F_1, \quad (10)$$

где $\alpha_{00} = 1,74\gamma^{4/3}$, т.е. $\alpha_{00} = (1,48 \div 1,65) \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4/3}$.

Введем в рассмотрение параметр β_0 , характеризующий долю теплового потока в ограждения, обусловленного излучением факела

пламени, относительно скорости тепловыделения в очаге горения. Тогда уравнение (2) будет иметь вид:

$$\eta \Psi_y FQ(1 - \beta_0) - cTG - \alpha_{00}(T - T_0)^{4/3} F_1 = 0. \quad (11)$$

Определяя из этого уравнения выражение для G и подставляя его в уравнение (3), получаем модель для температуры в помещении на начальной стадии пожара

$$\frac{dT}{dt} = (c\rho_0 T_0 V)^{-1} \left[\eta \Psi_y FQ(1 - \beta_0) - \alpha_{00} F_1 (T - T_0)^{4/3} - c\Psi_y FT \right] T. \quad (12)$$

Если в качестве пожарной нагрузки выступает горючая жидкость – толуол, бензин, керосин, ксилол, дизельное топливо, ацетон и др., то $Q > 2 \cdot 10^7$ Дж · кг⁻¹.

В дальнейшем будем рассматривать локальные пожары, т.е. такие пожары, для которых площадь поверхности воспламенившейся горючей жидкости меньше площади пола помещения на порядок и более. Анализ показывает, что при очаге горения, для которого эквивалентный диаметр d_3 превышает 1 м [1], величина удельной массовой скорости выгорания составляет около $6 \cdot 10^{-2}$ кг · м⁻² · с⁻¹ [2]. Для очагов горения с меньшей площадью эта величина уменьшается. В частности, при $0,1 \text{ м} \leq d_3 \leq 0,2 \text{ м}$, $\Psi_y \approx 2 \cdot 10^{-2}$ кг · м⁻² · с⁻¹. Кроме того, из [1] следует, что $\beta_0 \leq 0,5$, а согласно [5] можно положить $\eta \approx 0,9$.

С учетом приведенных соображений в начальной фазе пожара в помещении применительно к пожарной нагрузке в виде горючей жидкости можно не учитывать второе и третье слагаемые в квадратных скобках уравнения (12), так как их вклад примерно на два порядка меньше, чем вклад первого слагаемого.

Следует отметить, что обычно в рамках интегральных математических моделей пожара делается предположение, что $\Psi_y = \text{const}$ [5].

Однако результаты исследований ряда авторов свидетельствуют о том, что имеет место зависимость удельной массовой скорости выгорания от времени, т.е. процессы в начальной фазе развития пожара в помещении носят нестационарный характер [6].

Тогда i-е приближение решения уравнения (12) можно представить следующим образом:

$$T_i(t) = T_0 + \int_0^t \frac{\eta FQ(1 - \beta_0) \Psi_y(\tau)}{c\rho_0 T_0 V} T_{i-1}(\tau) d\tau, \quad i = 0, 1 \dots \quad (13)$$

Пусть $\Psi_y(t) = a_0 t$, где a – параметр.

Полагая нулевое приближение решения уравнения (12) равным T_0 , для первого и второго приближений можно записать:

$$T_1(t) = T_0 + \frac{\eta F Q (1 - \beta_0)}{2 c \rho_0 V} a_0 t^2; \quad (14)$$

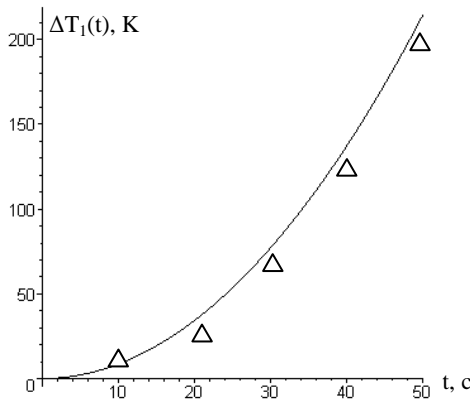
$$T_2(t) = T_1(t) + \left[\frac{\eta F Q (1 - \beta_0)}{2 c \rho_0 V} \right]^2 \frac{2 a_0^2}{3 T_0} t^3. \quad (15)$$

Анализ этих выражений свидетельствует о том, что при $a_0 \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot (\text{мс})^{-2}$ на интервале времени $t = 100 \text{ с}$ для рассматриваемого случая имеет место соотношение

$$\Delta = \frac{T_2(100) - T_1(100)}{T_1(100)} = 2\%. \quad (16)$$

Это обстоятельство свидетельствует о том, что применительно к рассматриваемому варианту начальной стадии пожара в помещении в качестве математической модели, описывающей температуру в этом помещении, целесообразно использовать выражение (14).

На рисунке приведен график зависимости $\Delta T_1 = T_1(t) - T_0$ для случая, когда $F = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, $V \approx 1,0 \text{ м}^3$, а в качестве горючей жидкости используется бензин (сплошная линия). Здесь же приведены экспериментальные данные.



Зависимость температуры в помещении на начальной стадии пожара

Анализ этих зависимостей свидетельствует о достаточно высокой степени адекватности модели (14). Погрешность рассогласования между модельными и экспериментальными данными не превышает 12%.

Следует заметить, что учет конвективной составляющей в уравнении (12) при использовании метода последовательных приближений (13) для получения решения этого уравнения в качестве первого приближения дает результат, который в точности совпадает с (14).

Таким образом, для начальной стадии пожара в помещении, когда в качестве горючей нагрузки выступает горючая жидкость, определение температуры в этом помещении целесообразно осуществлять с помощью первого приближения решения уравнения, получаемого в рамках интегральных моделей пожара.

1. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990. – 421 с.

2. Термогазодинамика пожаров в помещениях / Под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.

3. Моделирование пожаров и взрывов / Под ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – 482 с.

4. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. – М.: АГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

5. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. – М.: АГПС МВД России, 2000. – 118 с.

6. Башкирцев М.П. Исследование температурного режима при горении жидкостей в помещении: Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МИСИ им. В.Куйбышева, 1967. – 226 с.

7. Романенко П.Н., Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1977. – 405 с.

Получено 18.01.2008

УДК 614.842

Ю.В.ЦАПКО, канд. техн. наук

Институт Державного управління в сфері цивільного захисту УЦЗУ, м.Київ

КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОГНЕЗАХИСТУ ЦЕЛЮЛОЗОВІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Наведено результати досліджень на відповідність вогнезахисних целюлозовмісних матеріалів показникам пожежної небезпеки пожежно-технічної класифікації будівельних матеріалів і подальшого використання їх на об'єктах з масовим перебуванням людей.

Використання целюлозовмісних матеріалів (деревина, фанера, тканини, папір та картон, очерет і ін.) та конструкцій з них у будівництві з кожним роком набуває дуже широкого спектру. З огляду на той факт, що саме ці матеріали та вироби є основними провідниками поширення полум'я, пожежна безпека висуває все більш високі вимо-