

*Ю.А. Абрамов, д.т.н., гл. научн. сотр., НУГЗУ,
С.Н. Бесараб, преподаватель, ЧАПБ им. Героев Чернобыля,
А.М. Тищенко, к.т.н., нач. кафедры, ЧАПБ им. Героев Чернобыля*

МОДЕЛИ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Проведен анализ математического описания начальной стадии пожара в помещении применительно к решению задачи синтеза систем автоматического пожаротушения.

Ключевые слова: пожар в помещении, математическая модель, интегральная модель.

Постановка проблемы. Обеспечение безопасной эвакуации людей в случае возникновения пожара, снижение ущерба от пожара и др. – все это обуславливает необходимость в разрешении проблемы раннего обнаружения опасных факторов пожара. Эта проблема неразрывно связана с созданием комплекса математических моделей, описывающих процессы, имеющие место в начальной стадии пожара.

Анализ последних исследований и публикаций. Все математические модели применительно к описанию пожаров в помещениях можно разделить на интегральные, зонные и дифференциальные (полевые) [1]. Наиболее полное описание состояния вопроса о математических моделях, описывающих процессы, имеющие место во время пожара в помещениях, в том числе и на его начальной стадии, приведено в монографии [2]. Однако в этой работе акцент делается на численные методы моделирования. Совершенствование систем пожарной автоматики обуславливает необходимость в создании математических моделей пожара в терминах теории динамических систем [3]. В [4, 5] с использованием процедуры линеаризации получены математические модели, принадлежащие к классу интегральных, которые описывают изменение усредненной по объему помещения температуры в начальной стадии пожара. Однако в этих работах отсутствуют рекомендации по использованию той или иной модели.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является выбор математических моделей, описывающих процесс пожара в помещении на его начальной стадии, которые адаптированы для решения задачи синтеза систем пожарной автоматики с использованием классических методов теории автоматического управления.

Локальная система уравнений, описывающих температурный режим развития пожара в помещении в его начальной стадии имеет вид [4, 5]

$$\eta\psi FQ_1 - cGT - Q_2 = 0; \quad (1)$$

$$V \frac{d\rho}{dt} = \psi F - G; \quad (2)$$

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

где η – коэффициент полноты горения; F – площадь горения; Q_1 – теплота сгорания; G – расход газов, покидающих помещение через проемы; c – теплоемкость газов; Q_2 – общий тепловой поток, который поглощается ограждающими конструкциями; V – объем помещения; ρ_0 , T_0 – плотность и температура среды перед началом пожара соответственно; ρ , T – плотность и температура среды в рассматриваемый момент времени соответственно; ψ – удельная массовая скорость выгорания.

Тепловой поток Q_2 включает две аддитивные составляющие – Q_{21} , обусловленную процессом лучистого теплообмена между факелом пламени и ограждающими конструкциями, и Q_{22} , обусловленную процессами конвективного теплообмена газовой среды с ограждающими конструкциями. Эти составляющие описываются выражениями [5, 6]

$$Q_{21} = 3,2 \cdot 10^{-9,2} \varepsilon_0 T_{\phi}^4 F [\eta\psi Q_1^{0,4} F^{-0,1} - 3,6 \cdot 10^{1,2}]; \quad (4)$$

$$Q_{22} = \alpha_{00} F_1 (T_{cp} - T_0)^{1/3} (T - T_0), \quad (5)$$

где ε_0 – приведенная степень черноты; T_{ϕ} – температура факела пламени; F_1 – площадь поверхности ограждающих конструкций; T_{cp} – температура срабатывания теплового пожарного извещателя; $\alpha_{00} = 1,72(1 - 0,9Z)^{4/3}$; $Z = Bi \cdot Fo^{0,5}$; Bi , Fo – числа Био и Фурье соответственно.

Если учесть, что $Q_{21} = \gamma Q$, где $Q = \eta\psi GQ_1$, то из (1)÷(5) следует, что температура в помещении в начальной стадии пожара описывается дифференциальным уравнением Бернулли

$$\frac{dT}{dt} = AT - BT^2, \quad (6)$$

где

$$A = \frac{\eta\psi FQ_1(1 - \gamma) + \alpha_{00} F_1 (T_{cp} - T_0)^{1/3}}{c\rho_0 T_0 V}; \quad (7)$$

$$B = \frac{\alpha_{00} F_1 (T_{cp} - T_0)^{1/3} + c\psi F}{c\rho_0 T_0 V}. \quad (8)$$

Решение уравнения (6), например, в среде Maple, имеет вид

$$T(t) = T_0 \left[\left(1 - \frac{B}{A} T_0 \right) \exp(-At) + \frac{B}{A} T_0 \right]^{-1}. \quad (9)$$

Если в качестве пожарной нагрузки используется горючая жидкость, то [1, 7]

$$\psi \leq 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}; Q \sim 10^7 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

а также имеет место

$$\begin{aligned} T_{cp} &= 327 \text{ К (для извещателя класса A1);} \\ T_0 &= 293 \text{ К; } c \sim 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; FF_1^{-1} < 1; \\ \alpha_{00} &\leq 1,82; \eta < 1; \gamma \leq (0,3 \div 0,4), \end{aligned}$$

вследствие чего

$$BA^{-1} \ll 1. \quad (10)$$

С учетом (10) выражение (9) можно упростить и оно примет вид

$$T(t) \cong T_0 \exp(At). \quad (11)$$

В [4] с учетом того, что

$$T(t) = T_c + \Delta T(t); \psi(t) = \psi_c + \Delta\psi(t), \quad (12)$$

где T_c, ψ_c – средние значения температуры и удельной скорости выгорания жидкости соответственно; $\Delta T(t), \Delta\psi(t)$ – приращение температуры и удельной скорости выгорания жидкости соответственно, причем

$$\Delta T(t) \ll T_c; \Delta\psi(t) \ll \psi_c, \quad (13)$$

к уравнению (6) применена процедура линеаризации с использованием разложения в ряд Тейлора и получено дифференциальное уравнение

$$\tau_1 \frac{d(\Delta T)}{dt} + \Delta T = K_1 \Delta\psi_1, \quad (14)$$

где

$$\tau_1 = c\rho_0 V \frac{T_0}{T_c} \left[F_1 \left[c\psi_c \frac{F}{F_1} + \frac{4}{3} \alpha_{00} T_c^{1/3} \left(1 - \frac{T_0}{T_c} \right)^{1/3} \right] \right]^{-1}; \quad (15)$$

$$K_1 = \eta Q_1 F (1 - \gamma) \left[F_1 \left[c\psi_c \frac{F}{F_1} + \frac{4}{3} \alpha_{00} T_c^{1/3} \left(1 - \frac{T_0}{T_c} \right)^{1/3} \right] \right]^{-1}. \quad (16)$$

Если $\Delta\psi = M = \text{const}$, то из (14) следует, что

$$\Delta T(t) = K_1 M \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) \right]. \quad (17)$$

В [5] с использованием коэффициента теплопотерь φ , выражение для которого имеет вид

$$\varphi = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \frac{Q_2}{\eta\psi F Q_1} d\tau = \text{const}, \quad (18)$$

где t_0 – продолжительность начальной стадии пожара в помещении, температура в помещении описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{1}{T} \frac{dT}{dt} + \frac{\psi F}{\rho_0 T_0 V} T = \frac{\eta F Q_1 (1 - \varphi)}{c\rho_0 T_0 V} \psi. \quad (19)$$

использование процедуры линеаризации путем разложения в ряд Тейлора в предположении, что

$$\Delta T(t) \ll T_0; \Delta\psi(t) \ll \psi_0, \quad (20)$$

трансформирует (19) к виду

$$\tau_2 \frac{d(\Delta T)}{dt} + \Delta T = K_2 \Delta\psi, \quad (21)$$

где

$$\tau_2 = \frac{\rho_0 V}{\psi_0 F}; K_2 = \frac{\eta Q_1 (1 - \varphi)}{c\psi_0}. \quad (22)$$

При $\Delta\psi = M = \text{const}$ решение (21) имеет вид

$$\Delta T(t) = K_2 M \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right]. \quad (23)$$

На рис. 1 приведены графики зависимостей (9), (17), (23), из анализа которых следует, что модель (23) дает завышенную оценку по температуре в помещении.

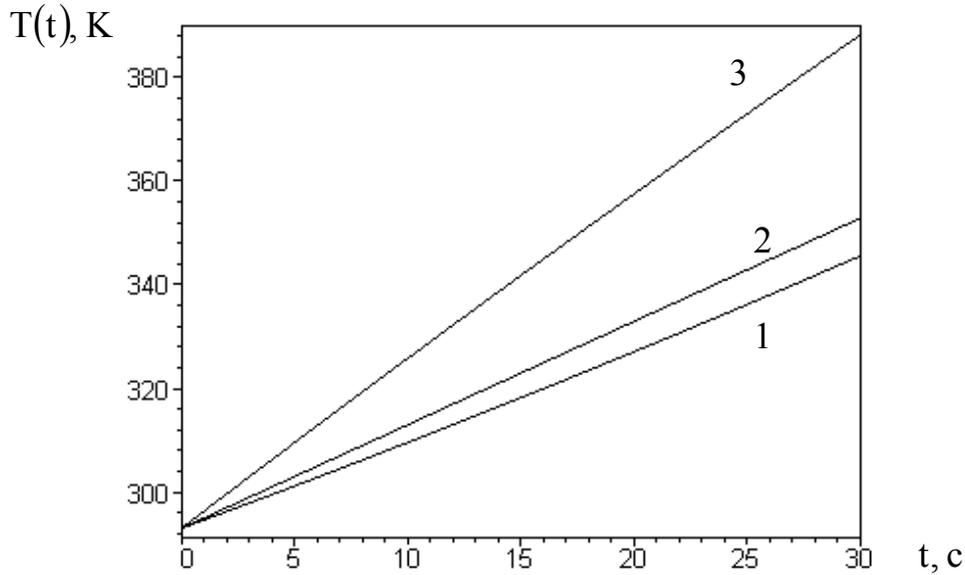


Рис. 1 – Зависимость $T(t)$ в помещении от времени на начальной стадии пожара: 1 – модель (9); 2 – модель (17); 3 – модель (23)

Погрешность рассогласования между моделями (9) и (23) на интервале $t=30$ с составляет около 15%, в то время как погрешность рассогласования между моделями (9) и (17) почти в шесть раз меньше.

На рис. 2 приведены результаты сравнения оценок, полученных с помощью модели (17), с экспериментальными данными, приведенными в [8].

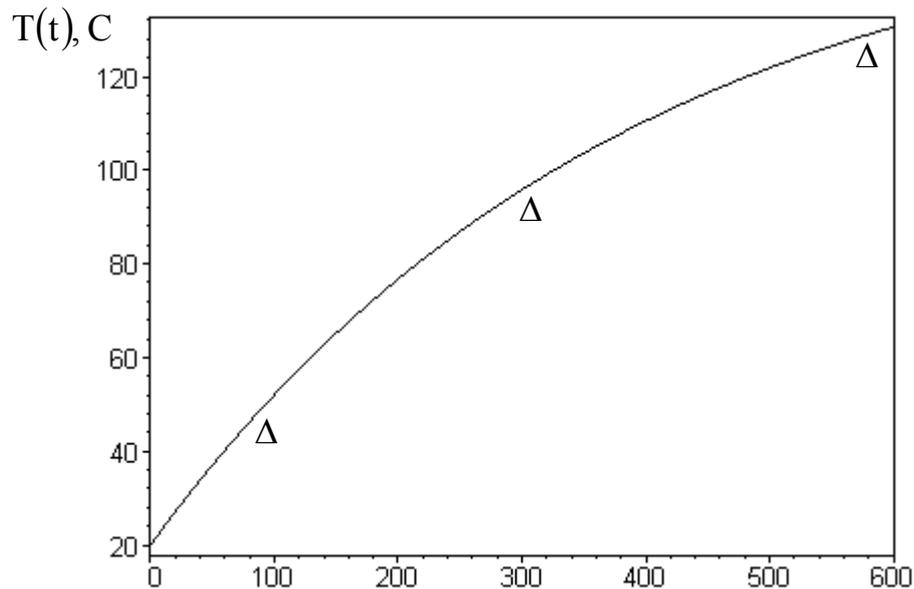


Рис. 2 – Зависимость температуры в помещении от времени на начальной стадии пожара: – – модель (17); Δ – эксперимент [8]

Результаты, приведенные на рис. 2, получены при следующих значениях параметров:

$$V = 6,2 \cdot 10^3 \text{ м}^3; F_1 = 3,2 \cdot 10^2 \text{ м}^2; F = 9,0 \text{ м}^2;$$

$$Q_1 = 2,75 \cdot 10^7 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}; \psi = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}; T_c = 237 \text{ К}.$$

Анализ этих зависимостей свидетельствует о том, что при использовании тепловых пожарных извещателей для обнаружения пожара, оценки, полученные с помощью модели (17), обладают погрешностью по сравнению с экспериментальными данными, величина которой не превышает 10%.

Следует отметить, что по своему смыслу модель (17) представляет собой переходную функцию такого динамического объекта как пожар в помещении. Тогда для такого динамического объекта можно записать выражение для передаточной функции, которое будет иметь вид

$$W(p) = pM^{-1}L[\Delta T(t)] = K_1(\tau_1 p + 1)^{-1}, \quad (24)$$

где L – оператор интегрального преобразования Лапласа.

Выводы. Показано, что при выборе математической модели, описывающей пожар в помещении на его начальной стадии, предпочтение следует отдать модели (17). Это обусловлено тем, что:

- по своей структуре эта модель является более простой по сравнению с эталонной, которая получена путем решения дифференциального уравнения Бернулли;
- погрешность рассогласования с моделью, которая выбрана в качестве эталонной, не превышает нескольких процентов (применительно к обнаружению пожаров тепловыми пожарными извещателями класса А1);
- модель такого вида открывает возможности для использования классических методов теории автоматического управления при решении задач синтеза систем автоматического пожаротушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Ю.А. Кошмаров. – М.: АГПС МВД России, 2000. – 118 с.
2. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: АГПС МЧС РФ, 2005. – 336 с.

3. Абрамов Ю.А. Алгоритм синтеза системы автоматического пожаротушения / Ю.А. Абрамов, В.П. Садковой // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, 2006. – Вип. 36. – С. 199-202.

4. Абрамов Ю.А. Модели начальной стадии пожара как динамического объекта // Ю.А. Абрамов, В.П. Садковой // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техніка, 2007. – Вып. 76. – С. 399-402.

5. Садковой В.П. Температура в помещении для начальной стадии пожара при воспламенении горючей жидкости / В.П. Садковой // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, 2007. – Вип. 41. – С. 294-299.

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

7. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

8. Башкирцев М.П. Исследование температурного режима при горении жидкостей в помещении: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02 / Башкирцев М.П. – М., 1967. – 226 с.

nuczu.edu.ua

Ю.О. Абрамов, С.Н. Бесараб, О.М. Тищенко

Моделі початкової стадії пожежі в приміщенні

Проведено аналіз математичного опису початкової стадії пожежі в приміщенні стосовно до розв'язання задачі синтезу систем автоматичного пожежогашіння.

Ключові слова: пожежа в приміщенні, математична модель, інтегральна модель.

Y.A. Abramov, S.N. Besarab, A.M. Tischenko

Models of the fire initial stage in the premises

The analysis of the mathematical description of the initial stage of a fire in the premises in relation to the problem of synthesis of automatic fire extinguishing systems is present.

Keywords: fire in premises, mathematical model, integral model.