

Ю.А. Абрамов, д.т.н., профессор, гл. научн. сотр., НУГЗУ,
Е.А. Тищенко, к.т.н, доц., нач. каф., ЧИПБ им. Героев Чернобыля НУГЗУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ КЛАССА В РАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ

Приведены результаты моделирования процессов тушения пожара класса В распыленной водой, в основе которого лежит использование аналитического подхода.

Ключевые слова: пожар класса В, распыленная вода, время тушения.

Постановка проблемы. Одним из эффективных методов тушения пожара класса В является метод, основанный на использовании распыленной воды. К числу проблем, которые необходимо решить для реализации этого метода, относится проблема, которая обуславливает необходимость учета инерционных свойств систем пожаротушения.

Анализ последних исследований и публикаций. Нормативные документы применительно к системам пожаротушения распыленной водой, в частности НПБ 80-99 [1, 2] определяют время срабатывания таких систем максимальным значением, равным 180 с.

К числу основных характеристик систем пожаротушения относят огнетушащую способность, которая является количественной характеристикой. Время тушения пожара, согласно тех не нормативных документов, не является характеристикой системы пожаротушения. Эта характеристика в подавляющем числе случаев определяется эмпирическим путем [3]. В [4] аналитическим путем с использованием алгебраического уравнения баланса тепла на поверхности горящей жидкости получена зависимость времени ее тушения от ряда параметров. Однако эта зависимость носит чисто иллюстративный характер и ее использование на практике является проблематичным, что обусловлено неопределенностью при определении исходных данных.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является моделирование процессов тушения пожара класса В распыленной водой с использованием аналитических методов.

Будем полагать, что процессы тушения горючей жидкости осуществляются вследствие отбора тепла от ее поверхности при испарении капель воды, которые не пересекают поверхность горящей жидкости.

В этом случае процесс тушения горючей жидкости с гомотермическим слоем будет описываться дифференциальным уравнением [5]

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

с начальными и граничными условиями

$$T(x,0) = T_k; \lambda \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = I(t)rK(T); T(\infty,t) = T_k, \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности; ν – линейная скорость распространения; T_k – температура кипения горючей жидкости; r – теплота испарения; $K(T)$ – коэффициент использования воды; $I(t)$ – интенсивность подачи распыленной воды в очаг горения.

Введем следующие обозначения

$$\tau = V^2 a^{-1} t; z = Va^{-1} x; \theta = (T_k - T)(T_k - T_0)^{-1}, \quad (3)$$

где T_0 – температура окружающей среды.

С учетом обозначений (3) уравнение (1) и условия (2) трансформируется следующим образом

$$\frac{\partial \theta(z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta(z, \tau)}{\partial z^2} + \frac{\partial \theta(z, \tau)}{\partial z}, \quad (4)$$

$$\theta(z,0) = 0; \frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial z} = -\frac{I(\tau)raK(T)}{\lambda V(T_k - T_0)}; \theta(\infty, \tau) = 0. \quad (5)$$

В дальнейшем будем рассматривать случай, когда

$$K(T) = K = (T_k - T_T)^{-1} \int_{T_T}^{T_k} K(T) dT = const, \quad (6)$$

где T_T – температура тушения горючей жидкости.

Применив к (4) интегральное преобразования Лапласа, получим

$$\frac{\partial^2 \bar{\theta}(z, p)}{\partial z^2} + \frac{\partial \bar{\theta}(z, p)}{\partial z} - p \bar{\theta}(z, p) = 0, \quad (7)$$

где

$$\bar{\theta}(z, p) = \int_0^{\infty} \theta(z, \tau) \exp(-p\tau) d\tau. \quad (8)$$

С учетом условий (5), а также с учетом физических соображений решение уравнения (7) можно представить следующим образом

$$\bar{\theta}(z, p) = \frac{raK \exp\left[-\left[0,5 + (0,25 + p)^{0,5}\right]z\right]}{\lambda V(T_k - T_0) \left[0,5 + (0,25 + p)^{0,5}\right]} \bar{I}(p). \quad (9)$$

Тогда решение дифференциального уравнения (4) будет иметь вид

$$\theta(z, \tau) = \frac{raK}{\lambda V(T_k - T_0)} L^{-1} \left[\frac{\exp\left[-\left[0,5 + (0,25 + p)^{0,5}\right]z\right] \bar{I}(p)}{0,5 + (0,25 + p)^{0,5}} \right], \quad (10)$$

где L^{-1} – оператор обратного интегрального преобразования Лапласа.

Выражение (10) описывает распределение температуры в горючей жидкости при ее тушении распыленной водой, интенсивность подачи которой в общем случае является функцией времени.

Для поверхности жидкости в (10) необходимо положить $z = 0$. Тогда время тушения τ_T пожара класса В распыленной водой будет определяться решением трансцендентного уравнения

$$T_k - T_T - \theta(0, \tau_T)(T_k - T_0) = 0. \quad (11)$$

Если $I(\tau) = I_0 = const$, то $\bar{I}(p) = p^{-1}I_0$ и из (10) при $z = 0$ с использованием системы Maple следует

$$\theta(\tau) = \frac{raKI_0}{\lambda V(T_k - T_0)} \left[1 + \left(\frac{\tau}{\pi}\right)^{0,5} \exp(-0,25\tau) - (1 + 0,5\tau) \operatorname{erfc}(0,5\tau^{0,5}) \right], \quad (12)$$

которое полностью совпадает с выражением, полученным в [5]. Это выражение по смыслу представляет собой переходную функцию объекта управления системы пожаротушения распыленной водой применительно к пожарам класса В. Под объектом управления такой системы понимается пожар класса В, который подвергается активному воздействию в виде тушения его распыленной водой.

Следует отметить, что выражение (12) совместно с (11) характеризуют потенциальные возможности системы пожаротушения, т.к. отражают реакцию объекта управления этой системы на активное воздействие безынерционного управляющего устройства. Такой процесс тушения пожара класса В распыленной водой характеризуется минимальным значением времени тушения $\tau_{T \min}$. В реальных условиях подача распыленной воды в очаг горения осуществляется инерционными устройствами. В частности, в [2] отмечается, что время срабатывания устройств управления систем пожаротушения может достигать 180 с. В [6] предлагается инерционные свойства систем пожаротушения учитывать обобщенной постоянной времени τ_0 устройства управления, т.е. для описания интенсивности подачи распыленной воды в реальных условиях использовать феноменологическую модель

$$I(\tau) = I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \right], \quad (13)$$

где
$$\tau_0 \leq \beta V^2 a^{-1}; \quad \beta = 60 \text{ с}. \quad (14)$$

С использованием системы Maple после объединения (10) и (13) получим

$$\theta(\tau) = \frac{raKl_0}{\lambda V(T_k - T_0)} \left[\begin{aligned} & 1 + \left(\frac{\tau}{\pi}\right)^{0,5} \exp(-0,25\tau) - 2 \left(1 - \frac{4}{\tau_0}\right)^{-0,5} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \times \\ & \times \operatorname{erf}\left[0,5 \left[\left(1 - \frac{4}{\tau_0}\right) \tau \right]^{0,5} \right] + \\ & + (\tau_0 - 4)^{-1} \left[\begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & 1 - \left(1 - \frac{4}{\tau_0}\right)^{0,5} \times \\ & \times \operatorname{erf}\left[0,5 \left[\left(1 - \frac{4}{\tau_0}\right) \tau \right]^{0,5} \right] \end{aligned} \right] \tau_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) - \\ & - 0,5(2 - \tau_0 + \tau) \operatorname{erfc}(0,5\tau^{0,5}) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right]. \quad (15)$$

На рис. 1 приведены зависимости $t_T = t_T(I_0)$, полученные для случая, когда в качестве горючей жидкости используется трансформаторное масло. Эти зависимости получены путем решения трансцендентного уравнения (11) совместно с (12) или (15). Кривой 1 соответствует система пожаротушения безынерционного типа, т.е. объект управления такой системы пожаротушения описывается моделью (12), а устройство управления является безынерционным. Кривые 2 и 3 отражают свойства инерционных систем пожаротушения. Зависимость 2 получена применительно для слабоинерционной системы пожаротушения, для которой величина обобщенной постоянной времени составляет 1,0 с. Зависимость 3 получена для среднеинерционной системы пожаротушения, для которой величина обобщенной постоянной времени равна максимальному значению – 60,0 с [1, 2]. Зависимости получены для $K = 0,05$; $V = 3 \cdot 10^{-5} \text{ мс}^{-1}$; $T_k = 600 \text{ К}$; $T_T = 420 \text{ К}$; $a = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$; $\lambda = 0,1 \text{ Вт}(\text{м} \cdot \text{К})^{-1}$.

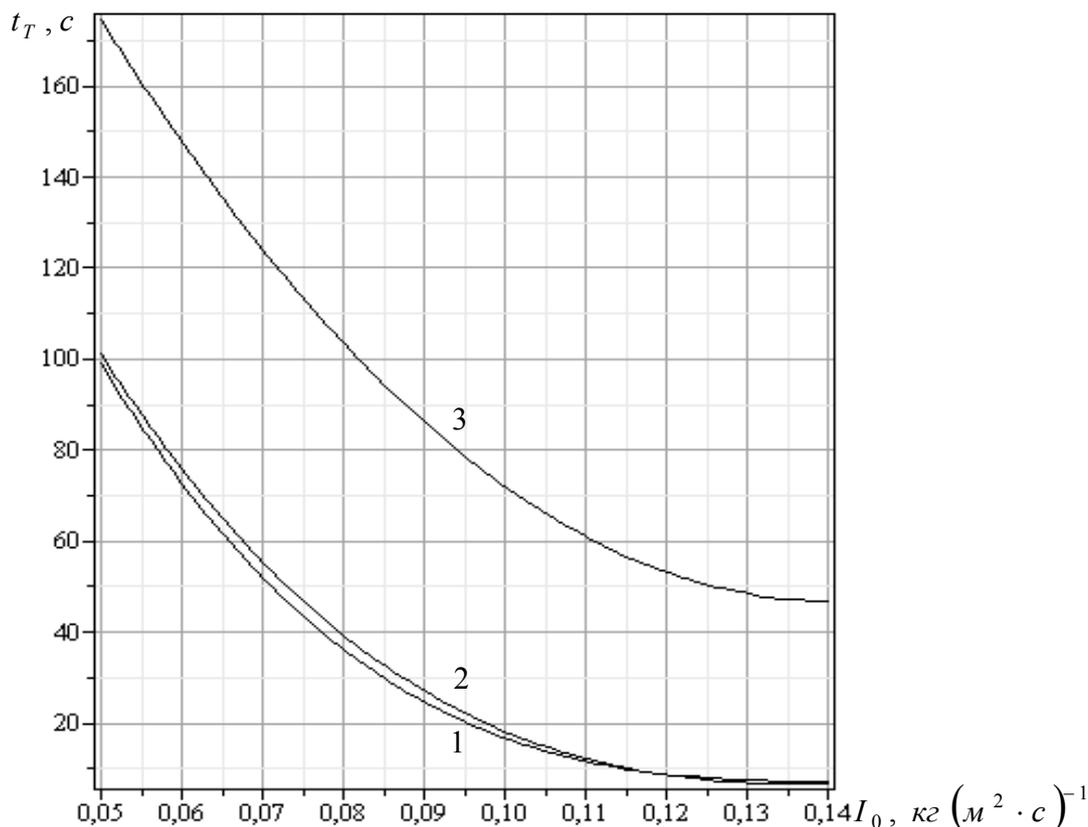


Рис. 1. Зависимость $t_T = t_T(I_0)$: 1 – безынерционная система; 2 – слабоинерционная система; 3 – среднеинерционная система

Анализ этих зависимостей свидетельствует о том, что при тушении пожара класса В распыленной водой для случая, когда горючим материалом является трансформаторное масло, инерционные свойства систем пожаротушения обуславливают увеличение времени тушения примерно в 2 раза по сравнению с потенциальными возможностями такой системы (при нормативном значении интенсивности подачи распыленной воды, равном $0,05 \text{ кг} (\text{м}^2 \cdot \text{с})^{-1}$). Из анализа также следует, что увеличение интенсивности подачи распыленной воды в три раза, т.е. до $I_0 = 0,15 \text{ кг} (\text{м}^2 \cdot \text{с})^{-1}$, может обеспечить уменьшение времени тушения пожара такого типа примерно в 3,5 раза (в случае использования среднеинерционных систем, для которых величина обобщенной постоянной времени лежит в диапазоне $(3,0 \div 60,0) \text{ с}$ [1, 2]). Использование слабоинерционных систем пожаротушения с таким значением интенсивности подачи распыленной воды позволяет уменьшить время тушения пожара такого типа не менее, чем в 20 раз по сравнению с вариантом тушения при нормативном значении интенсивности подачи распыленной воды.

Выводы. С использованием аналитических методов проведено моделирование процесса тушения пожара класса В распыленной водой, в основе которого лежит использование нестационарного уравнения теплопроводности в подвижной системе координат. Модели-

рование осуществлено как для потенциально возможных характеристик систем пожаротушения по ее быстродействию, так и с учетом ее инерционных свойств. В качестве примера использован пожар, в котором пожарной нагрузкой служит трансформаторное масло. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что инерционные свойства системы пожаротушения существенно влияют на результат тушения пожара. В частности, для систем пожаротушения, время срабатывания которых составляет 180 с, процесс тушения на примере трансформаторного масла затягивается по сравнению с безынерционным вариантом примерно в два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов А.Г. Пожаротушение и системы безопасности / А.Г. Котов. – К.: Репро-Графика, 2003. – 270 с.
2. Бабуров В.П. Автоматические установки пожаротушения / В.П. Бабуров, В.В. Бабурин, В.Н. Фомин. – М.: Пожнаука, 2007. – 294с.
3. Герасимов А.А. Тушение пламени нефтепродуктов распыленной водой / А.А. Герасимов, И.И. Петров, В.Н. Рауст // Новые способы и средства тушения пламени нефтепродуктов. – М.: ГТТП, 1960. – С. 84-98.
4. Кухто А.Н. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи воды / А.Н. Кухто, Е.Н. Панин // Пожаротушение. – М.: ВНИИПО, 1984. – С. 84-93.
5. Садковой В.П. Упрощенная математическая модель объекта управления системы автоматического пожаротушения / В.П. Садковой, Ю.А. Абрамов // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, 2007. – Вип. 43. – С. 142-146.
6. Абрамов Ю.А. Оценка влияния инерционных свойств систем автоматического тушения пожаров класса В распыленной водой на время их тушения / Ю.А. Абрамов, В.М. Гвоздь, А.М. Тищенко // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2013. – Вып. 33. – С. 3-8.

Ю.О. Абрамов, Є.О. Тищенко

Моделювання процесів гасіння пожежі класу В розпиленою водою

Наведено результати моделювання процесів гасіння пожежі класу В розпиленою водою, в основі якого лежить використання аналітичного підходу.

Ключові слова: пожежа класу В, розпорошена вода, час гасіння.

Y.A. Abramov, E.A. Tishchenko

Simulation of fire fighting class in the sprayed water

The results of the simulation processes firefighting class In the sprayed water, based on the use of analytical approach.

Keywords: fire class, water spray, extinguishing.