

УДК 614.8

Ю. А. Абрамов¹, д.т.н., професор, главн. н.с. (ORCID 0000-0001-7901-3768)

А. Е. Басманов¹, д.т.н., професор, главн. н.с. (ORCID 0000-0002-6434-6575)

А. А. Хижняк², ад'юнкт (ORCID 0000-0002-7250-7930)

¹Національний університет громадянської захисти України, Харків, Україна

²Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобыля Національного університету громадянської захисти України, Черкаси, Україна

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТУШЕНИЯ ПОЖАРА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Основным эффектом, который обеспечивает тушение пламени при подаче в него частиц порошкового состава, является гибель активных центров, ведущих процесс горения, вследствие обрыва цепей химической реакции. Несмотря на широкое применение порошковых огнетушащих составов при тушении пожаров, отсутствуют удобные для решения инженерных задач модели, описывающие эти процессы. Использование уравнения Навье-Стокса для построения математического описания происходящих тепловых процессов сопряжено с рядом трудностей, одной из которых является то, что получение аналитических решений возможно лишь для тривиальных случаев. Предложено рассматривать процесс тушения пожара как функционирование системы управления, где в качестве объекта управления выступает пожар, а управляющим объектом может быть некоторое устройство или боевой расчет с приданной ему штатной техникой. Для формализации процессов, протекающих в объекте управления, используется дифференциальное уравнение первого порядка, которое в общем случае является нелинейным. Вследствие малости отклонения температуры пламени от его начального значения, а также использования для определения скорости реакции усредненной по толщине пламени концентрации активных центров, оказывается возможным провести линеаризацию полученных моделей. Кроме того, учтено, что в смеси концентрация кислорода гораздо меньше, чем его концентрация в окружающей среде. Решение линеаризованного дифференциального уравнения представляет собой переходную функцию объекта управления, которая позволяет получить оценки быстродействия системы пожаротушения, а также оценку времени тушения пожара с использованием огнетушащих порошковых составов. Разработанные математические модели ориентированы на их использование при решении инженерных задач применительно к системам автоматического пожаротушения.

Ключевые слова: математическая модель, порошковый состав, объект управления

1. Введение

В настоящее время широкое распространение получили порошковые огнетушащие составы [1]. Основным эффектом, который обеспечивает тушение пламени при подаче в него частиц порошкового состава, является гибель активных центров, ведущих процесс горения, вследствие обрыва цепей химической реакции. Следует подчеркнуть, что, несмотря на широкое применение порошковых огнетушащих составов при тушении пожаров, отсутствуют удобные для решения инженерных задач модели, описывающие эти процессы.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

При проектировании систем порошкового пожаротушения в настоящее время используются в подавляющем большинстве обобщенные (интегральные) характеристики как всей системы, так и ее функциональных элементов [2]. Такие характеристики не отражают поведение систем при тушении пожара в динамическом режиме, а вопросы об оптимальных режимах тушения вообще не обсуждаются. Исключение составляет работа [3], в которой синтезирована оптимальная по быстродействию система газового пожаротушения. Применительно к системам автоматического пожаротушения с другими огнетушащими веществами, в частно-

сти, с порошковыми составами такие подходы практически отсутствуют, что обусловлено отсутствием адекватных математических моделей основного элемента таких систем – объекта управления. В работе [4] рассматривается моделирование движения твердых частиц в газовом потоке, которое основано на использовании уравнений массы, импульса и энергии. Авторами работы [5] разработана модель выброса порошкового огнетушащего вещества из огнетушителя, в основе которой лежит использование уравнений Навье-Стокса и k - ε турбулентных моделей. В [6] получена модель для импульсной аэрозольной системы пожаротушения разливов нефтепродуктов, в которой также лежит использование уравнения Навье-Стокса.

Следует отметить, что использование уравнения Навье-Стокса для математического описания процессов тушения пожара сопряжено с рядом трудностей, одной из которых является то, что получение аналитических решений возможно лишь для тривиальных случаев.

В работе [7] для построения модели используется уравнение диффузии, однако такие модели используют достаточно жесткую систему допущений.

Все рассмотренные подходы к построению моделей, описывающих процессы, имеющие место при тушении пожара, объединяет отсутствие их ориентации на использование при решении инженерных задач применительно к синтезу оптимальных систем автоматического пожаротушения. В этой связи одной из проблем является создание базы данных по математическому описанию процессов тушения пожаров с использованием всего спектра огнетушащих веществ. Такое математическое описание должно быть адаптировано к инженерным методам синтеза систем автоматического пожаротушения.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка математической модели объекта управления автоматической системы пожаротушения, которым является пожар класса В, при его тушении порошковым огнетушащим веществом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- получить математическое описание процесса тушения порошковым огнетушащим веществом пожара, который интерпретируется как система с сосредоточенными параметрами;
- провести линеаризацию полученных решений с целью их представления в классе моделей, принадлежащих динамическим моделям во временной области;
- с использованием полученных линеаризованных моделей объекта управления системы автоматического пожаротушения получить оценки для времени тушения пожара.

4. Разработка математического описания процессов тушения с использованием порошковых огнетушащих веществ

Формализация процесса тушения горячей жидкости огнетушащим порошковым составом может быть представлена следующим образом

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = q_1 - q_2, \quad (1)$$

где ρ , c – плотность и удельная теплоемкость пламени соответственно; V – объем пламени; T – температура пламени; q_1 – скорость выделения тепла в области пламени; q_2 – скорость потерь тепла от пламени в окружающее пространство.

Выражения для q_i имеют вид

$$q_1 = QuV; \quad (2)$$

$$q_2 = \alpha S(T - T_0), \quad (3)$$

где Q – тепловой эффект реакции; u – скорость реакции; α – коэффициент теплоотдачи, учитывающий потери тепла за счет конвекции и за счет излучения; T_0 – температура окружающей среды; S – площадь поверхности горения.

Если ввести обозначения

$$V = Sh; \quad \theta = T_n - T; \quad \tau = \frac{\rho ch}{\alpha}, \quad (4)$$

где h – толщина пламени; T_n – начальная температура, то уравнение (1) трансформируется к виду

$$\tau \frac{d\theta}{dt} + \theta = T_n - T_0 - \frac{Quh}{\alpha}. \quad (5)$$

Скорость реакции u определяется временем жизни активных центров Δt и усредненной по толщине пламени концентрацией активных центров $\mu(x)$

$$u = \frac{1}{\Delta t \cdot h} \int_0^h \mu(x) dx. \quad (6)$$

Функция $\mu(x)$ определяется решением уравнения диффузии.

В [8] показано, что для характерных условий тушения горящих углеводородных компонентов имеет место

$$u = \mu_0 (\Delta t A)^{-1}, \quad (7)$$

где

$$\mu_0 = K_0 C_1^v \exp\left(-\frac{E}{RT}\right); \quad (8)$$

$$A = a_1 + a_2 - a_3, \quad (9)$$

причем

$$a_i = b_i (\Delta t)^{-1}, \quad \tau = \overline{1,3}, \quad (10)$$

где K_0 – параметр; C_1^v – концентрация недостающего компонента в смеси; E – энергия активации; R – газовая постоянная; v – порядок образования активных центров результате термической активности; b_1 – вероятность обрыва цепей в объеме пламени при соударении с молекулами реагирующей смеси (с энергией активации G); b_2 – вероятность обрыва цепей на поверхности дисперсных частиц порошкового состава (с энергией активации P); b_3 – вероятность разветвления цепей.

Подставим в (8) выражение для T , которое определим из (4). При этом,

учтем, что величина θ для углеводородов не превышает нескольких десятков градусов, а величина T_H составляет порядка $1,6 \cdot 10^3$ К. После подстановки получим

$$\mu_0 = K_0 C_1^v \exp\left(-\frac{E}{RT_H}\right), \quad (11)$$

а выражения для b_i можно по аналогии записать в виде

$$b_1 = b_{10} \exp\left(\frac{G}{RT_H}\right) = b_{1H}; \quad b_2 = b_{20} \exp\left(-\frac{P}{RT_H}\right) = b_{2H};$$

$$b_3 = b_{30} \exp\left(-\frac{R}{RT_H}\right) = b_{3H}, \quad (12)$$

где b_{i0} – постоянные, не зависящие от температуры.

Тогда выражение для скорости реакции u можно переписать следующим образом

$$u = mC_1^v, \quad (13)$$

где

$$m = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_H}\right) (b_{1H} + b_{2H} - b_{3H})^{-1}. \quad (19)$$

Следует отметить, что количество кислорода, потребляемого в объеме зоны горения, определяется выражением $mC_1^v Sh$, а количество кислорода, доставляемого в зону горения определяется выражением $\gamma(C - C_1)S$, где γ – коэффициент массоотдачи, а C – концентрация кислорода в окружающей среде. Тогда из условия баланса масс следует, что

$$u = \frac{\gamma C}{h} (1 - C_1 C^{-1}). \quad (15)$$

В реальных условиях имеет место

$$C_1 C^{-1} \ll 1,0, \quad (16)$$

вследствие чего

$$u = \gamma C h^{-1}. \quad (17)$$

С учетом этого выражения, а также вследствие того, что $\theta(0) = 0$, из решения уравнения (5) вытекает зависимость для температуры пламени

$$T(t) = T_0 + \gamma C Q \alpha^{-1} + (T_H - T_0 - \gamma C Q \alpha^{-1}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (18)$$

На рис. 1 приведен качественный вид зависимостей $\theta(t)$ и $T(t)$. Точке O_1 на зависимости $T(t)$ соответствует момент тушения пламени, которое имеет место

при T_T – температуре тушения. Время тушения t_T определяется решением трансцендентного уравнения

$$T(t_T) - T_T = 0. \quad (19)$$

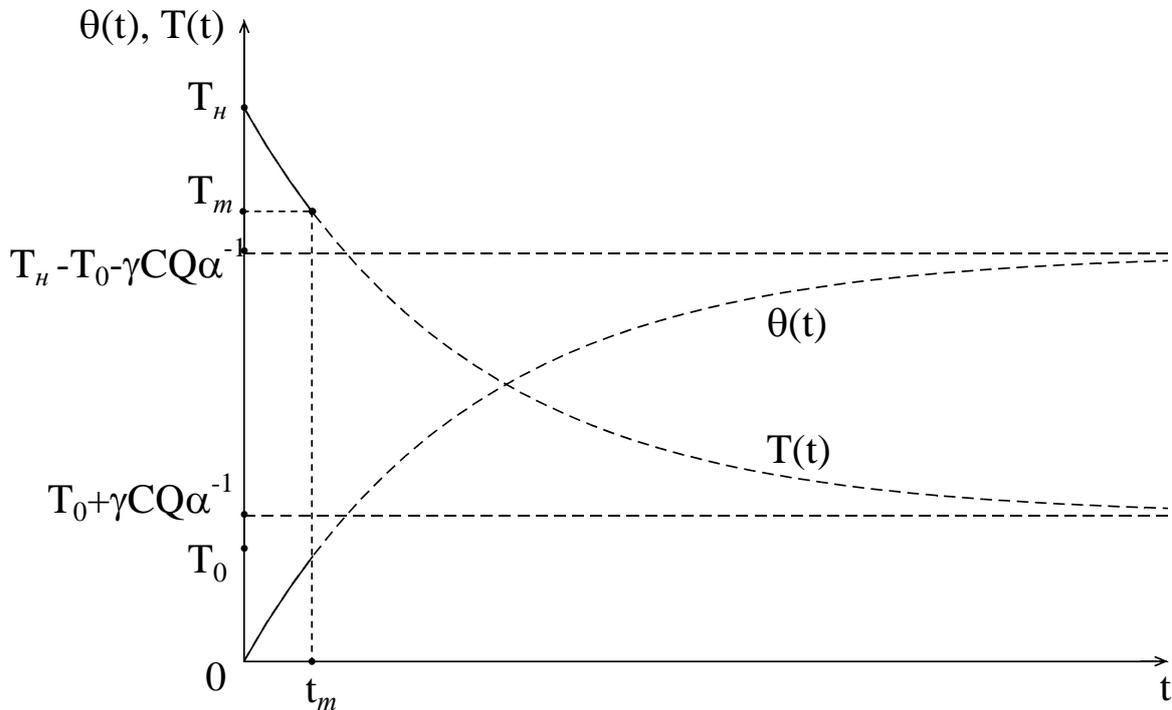


Рис. 1. Зависимости $\theta(t)$ и $T(t)$

Для получения оценки времени тушения представим в выражении (18) сомножитель $\exp\left(-\frac{t_T}{\tau}\right)$ в виде усеченного степенного ряда, содержащего два члена. Тогда из (19) следует, что

$$t_T = \tau(T_h - T_T)(T_h - T_0 - \gamma C Q \alpha^{-1})^{-1} = \left[1 - (T_T - T_0)(T_h - T_0)^{-1}\right] \times \left[1 - \gamma C Q [(T_h - T_0)\alpha]^{-1}\right]^{-1} \tau. \quad (20)$$

Если учесть, что

$$T_T - T_0 > \gamma C Q \alpha^{-1}, \quad (21)$$

то из (2) следует, что $t_T < \tau$.

Для характерных параметров углеводородов время тушения составляет порядка $(4 \div 6)h$.

5. Обсуждение результатов

Процесс тушения пожара рассматривается как функционирование системы управления, которая в общем случае представляет собой совокупность объекта управления и управляющего объекта (устройства). Такое сочетание двух объектов объединено достижением единой цели – потушить пожар. В качестве объекта управления выступает собственно пожар, а управляющим объектом может быть

некоторое устройство или боевой расчет с приданной ему штатной техникой. В первом случае система пожаротушения является автоматической. Для формализации процессов, протекающих в объекте управления, используется дифференциальное уравнение первого порядка, которое в общем случае является нелинейным. Линеаризация такого уравнения возможна с учетом малости отклонения температуры пламени от его начального значения, а также при использовании для определения скорости реакции усредненной по толщине пламени концентрации активных центров. Кроме того, учитывается то обстоятельство, что в смеси концентрация кислорода гораздо меньше, чем его концентрация в окружающей среде.

Использование этих обстоятельств позволяет свести дифференциальное уравнение, описывающее тепловые процессы в объекте управления, к классу дифференциальных уравнений линейного типа. Решение такого дифференциального уравнения представляет собой переходную функцию объекта управления, которая позволяет получить оценки быстродействия системы пожаротушения, а также оценку времени тушения пожара с использованием огнетушащих порошковых составов.

6. Выводы

1. С использованием феноменологического подхода получено математическое описание процесса тушения пожара класса В порошковым огнетушащим составом, принадлежащим классу математических моделей в виде дифференциальных уравнений.

2. Путем усреднения выражения для скорости химической реакции по координате, а также с использованием усеченных выражений для степенных рядов проведена процедура линеаризации полученных математических моделей.

3. Использование линеаризованных математических моделей, описывающих процесс тушения пожара порошковым огнетушащим составом, позволило получить оценки для времени его тушения, которое не превышает нескольких единиц толщины пламени.

Литература

1. Долговидов А. В. Автоматические установки порошкового пожаротушения. Москва: Пожнаука, 2008. 322 с.

2. Котов А. Г. Пожаротушение и системы безопасности. Бранд-мастер, 2010. 277 с.

3. Управление в технических системах с газовым и жидким компонентами / Абрамов Ю. А. и др. Киев: НСМО, 1997. 288 с.

4. 3D Unsteady Simulation of Polydispersed Gas-Solid Flows in Circulating Fluidized Bed / O. Batrak and others. 5th International Conference on Multiphase Flow. Yokohama. 2004. № 568.

5. P. Coorevits C., Marie K. Benhabib. Modeling the discharge of a powder fire extinguisher by mixed discrete element method and computational fluid dynamics / European Journal of Computational Mechanics. 2011. Vol. 8. № 7–8. DOI: 10.3166/ejcm.20.487-502

6. Рычков А. Д. Численное моделирование работы импульсной аэрозольной системы пожаротушения при возгорании жидких углеводородных топлив / Теплофизика и аэромеханика, 2009. Т. 16. № 2. С. 307–318.

7. Zhu C., Lu C., Wang J. Evaluation of Aerosol Fire Extinguishing Agent Using a Simple Diffusion Model / Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2012. DOI: 10.1155/2012/873840

8. Абрамов Ю. А., Тищенко Е. А., Хижняк А. А. Модель тушения пожара / Проблемы пожарной безопасности. Харьков: НУГЗУ, 2018. Вып. 43. С. 3–8.

Ю. О. Абрамов¹, д.т.н., професор, головн. н.с.

О. Є. Басманов¹, д.т.н., професор, головн. н.с.

А. А. Хижняк², ад'юнкт

¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

*²Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ЯК ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЖЕЖОГАСІННЯ

Основним ефектом, який забезпечує гасіння полум'я при подачі в нього частинок порошкового складу, є загибель активних центрів, що ведуть процес горіння внаслідок розриву ланцюгів хімічної реакції. Незважаючи на широке застосування порошкових вогнегасних складів при гасінні пожеж, відсутні зручні для розв'язання інженерних задач моделі, які описують ці процеси. Використання рівняння Нав'є-Стокса для побудови математичного опису теплових процесів, що відбуваються, стикається з низкою труднощів, однією з яких є те, що отримання аналітичних розв'язків можливо лише для тривіальних випадків. Запропоновано розглядати процес гасіння пожежі як функціонування системи управління, де в якості об'єкта управління виступає пожежа, а об'єктом, який управляє, може бути деякий пристрій або бойовий розрахунок з приданою штатною технікою. Для формалізації процесів, що протікають в об'єкті управління, використовується диференціальне рівняння першого порядку, яке в загальному випадку є нелінійним. Внаслідок малих відхилень температури полум'я від її початкових значень, а також використання для визначення швидкості реакції усередненої по товщині полум'я концентрації активних центрів, виявляється можливим провести лінеаризацію отриманих моделей. Крім того, враховано, що в суміші концентрація кисню значно менша, ніж його концентрація у навколишньому середовищі. Розв'язок лінеаризованого диференціального рівняння являє собою перехідну функцію об'єкта управління, яка дозволяє отримати оцінки швидкодії системи пожежогасіння, а також оцінку часу гасіння пожежі з використанням вогнегасних порошкових складів. Розроблені математичні моделі орієнтовані на їх використання при розв'язанні інженерних задач стосовно систем автоматичного пожежогасіння.

Ключові слова: математична модель, порошковий склад, об'єкт управління

Y. Abramov¹, DSc, Professor, Chief Researcher

O. Basmanov¹, DSc, Professor, Chief Researcher

A. Khyzniak², Adjunct

¹National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

*²Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes
of National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkassy, Ukraine*

MATHEMATICAL MODELS OF THE FIRE FIGHTING PROCESS AS A CONTROL OBJECT OF THE AUTOMATIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEM

The main effect of extinguishing of fire after delivering dry powder composition is destroying active hotspots, which fuel the fire, due to chemical chains termination. Despite the widespread use of dry fire extinguishing composition, there is no convenient model to describe those processes that can be used to solve engineering problems. The use of Navier-Stokes equation to build a mathematical description may involve some difficulties; one of those difficulties is that the analytical solutions are possible only for trivial cases. It has been proposed to consider a process of fire extinguishing as functioning like a control system, which includes the fire as the controlled object and a device or a team of firefighters with equipment as the controller. To formalize those processes within the controlled object, a first-order non-linear differential equation is used. Due to the smallness of fire temperature deviation from its initial value and the use of concentration of active centers averaged by fire thickness in order to determine a reaction rate, the obtained models can be linearized. In addition, it is taken into account that

the oxygen concentration in a composition is much less than the concentration in an environment. The solution of the mentioned-above linearized differential equation is a transition function of the controlled object that allows us to obtain a performance estimation of a fire extinguishing system and estimation of required time to extinguish a fire with powder composition. The developed mathematical models are designed to solve the engineering problems in automatic fire extinguishing systems.

Keywords: mathematical model, dry powder composition, control object

References

1. Dolgovidov, A. V., & Terebnev, V. V. (2008). Avtomaticheskie ustanovki poroshkovogo pozharotusheniya. Moscow, Pozhnauka, 322.
2. Kotov A. G. (2010). Pozharotusheniye I sistemy bezopasnosti. Kyiv, Brand-master, 277.
3. Abramov, Y. A., Gubarev, A. P., Uzunov, A. V. (1997). Upravlenie v tehnikeskikh sistemah s gazovym s zhidkim komponentami. Kyiv, NSMO, 288.
4. Batrak O., Simonin O., Flour I., Guevel T., Perez E. (2004). 3D Unsteady Simulation of Polydispersed Gas-Solid Flows in Circulating Fluidized Bed. 5th International Conference on Multiphase Flow. Yokohama, № 568.
5. Coorevits P., Marie C., Benhabib K. (2011). Modeling the discharge of a powder fire extinguisher by mixed discrete element method and computational fluid dynamics. European Journal of Computational Mechanics, 8(7–8). DOI: 10.3166/ejcm.20.487-502
6. Rychkov A. D. (2009). Chislennoe modelirovanie raboty impulsnoy aerolnoy sistemy pozharotusheniya pri vozgoranii zhidkih uglevodorodnyh topliv. Teplofizika i aeromehanika, 16(2), 307–318.
7. Zhu C., Lu C. Wang J. (2012). Evaluation of Aerosol Fire Extinguishing Agent Using a Simple Diffusion Model. Mathematical Problems in Engineering, 2012. DOI: 10.1155/2012/873840
8. Abramov Y. A., Tischenko E. A., Khyzhniak A. A. (2018). Model tusheniya pozhara. Problemy pozharnoy bezopasnosti, 43, 3–8.

Надійшла до редколегії: 10.09.2018

Прийнята до друку: 12.11.2018