

УДК 614.841

## СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ КАК НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

*Б. Б. Поспелов*

*Национальный университет гражданской защиты Украины*

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

*Поступила в редакцию: 14.06.2016  
Прошла рецензирование: 04.07.2016*

#### *Ключевые слова:*

базовая системная модель пожара, системный анализ среднеобъемной температуры газовой среды, негерметичное помещение.

### АННОТАЦИЯ

Предложена базовая системная модель пожара в негерметичном помещении в виде нелинейной системы и представлены результаты системного анализа динамики среднеобъемной температуры газовой среды в помещении на начальной стадии пожара для различных известных моделей отвода тепла и стесненности развития пожара. Определены частные системные параметры пожара. Введены интегральные системные параметры, характеризующие скоростные свойства динамики среднеобъемной температуры и ресурс пожара, а также три его характерных системных параметра. Установлены особые точки, их характер и условия возникновения бифуркации динамики среднеобъемной температуры при пожаре, а также оценены системные возможности по управлению системными параметрами пожара в негерметичном помещении на начальной его стадии.

### 1. Введение.

Повышение требований к противопожарной защите объектов неразрывно связано с совершенствованием технических средств раннего обнаружения загораний. Известно, что процесс возникновения и развития пожара является многопараметрическим и зависит от большого числа факторов и граничных условий. Поэтому реальные пожары относятся к сложным системам и должны анализироваться с позиции теории систем. Экспериментальные данные, получаемые для реальных пожаров в закрытых помещениях, часто не согласуются с модельными расчетами. Это является следствием того, что с теплофизической точки зрения пожар в помещении является нелинейной системой, в которой протекают сложные процессы тепло- и массопереноса, динамика которых изучена недостаточно. В этой связи актуальными являются исследования пожаров в помещениях как нелинейных динамических систем. Одним из распространенных и важных факторов пожара в помещениях является температура среды. Поэтому актуальным является создание системной модели динамики среднеобъемной температуры в помещении для начальной стадии пожара и ее системный анализ.

### 2. Анализ последних достижений и постановка проблемы

Начальная стадия развития пожара в помещениях исследовалась как теоретически [1-4], так и экспериментально [5-8]. Рассмотрению математических моделей динамики температуры

на начальной стадии пожара посвящено достаточное число публикаций [9-15]. Общим недостатком следует считать наличие большого разнообразия моделей и ограничений их применения. Так, например, для моделей интегрального и зонного типа, как правило, постулируется стационарность условий горения. В [13] рассматривается интегральная модель динамики температуры в помещении на начальной стадии пожара в предположении, что удельная массовая скорость выгорания является постоянной величиной. Однако в [14] отмечается, что величина удельной массовой скорости выгорания, например, для дизельного топлива изменяется примерно вдвое в течение первых минут загорания. При этом известные результаты ряда авторов свидетельствуют о нестационарном характере всех физико-химических процессов в начальной стадии пожара в помещении [14]. К настоящему времени в литературе отсутствуют системные модели пожара и результаты их анализа для основных опасных факторов загорания.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка базовой системной модели начальной стадии пожара в негерметичном помещении в виде нелинейной системы и на ее основе выполнить системный анализ динамики среднеобъемной температуры газовой среды в помещении.

Для достижения поставленной цели выполнено теоретическое обоснование базовой системной модели пожара в помещении как

нелинейной системы, получено уравнение состояния среднеобъемной температуры газовой среды при пожаре в помещении, а также проведен анализ динамики среднеобъемной температуры пожара как в нелинейной динамической системе.

#### 4. Теоретическое обоснование базовой системной модели начальной стадии пожара в помещении

Для негерметичного помещения в начальной стадии пожара справедливо полагать [13], что среднеобъемные значения давления и плотности газовой среды определяются соотношениями

$$dp_m(t)/dt \cong 0, \quad (1)$$

$$\rho_m(t)T_m(t) = T_0\rho_0, \quad (2)$$

где  $p_m(t)$  – значение среднеобъемного давления газовой среды в помещении в момент времени  $t$ ;  $T_0, \rho_0$  – температура и плотность газовой среды в помещении до начала пожара;  $\rho_m(t), T_m(t)$  – значения среднеобъемной плотности и температуры газовой среды в помещении в момент времени  $t$ .

Рассмотрим развитие загорания в помещении в виде некоторой термодинамической системы, ограниченной внутренней поверхностью помещения. В такой системе среднеобъемные температура, плотность и суммарная масса газа в помещении будут изменяться во времени  $t$ . Для фиксированного объема помещения  $V = const$  масса газа в произвольный момент времени  $t$  будет определяться

$$M(t) = \rho_m(t)V, \quad (3)$$

Следуя (3), изменение массы газа в течение интервала времени  $\Delta t$  будет определяться величиной

$$\Delta M(t) = \Delta \rho_m(t)V, \quad (4)$$

где  $\Delta \rho_m(t) = \rho_m(t + \Delta t) - \rho_m(t)$  – изменение среднеобъемной плотности газовой среды в момент  $t$  на интервале времени  $\Delta t$ . Пусть расход массы газа, покидающего помещение через проемы и щели, в момент времени  $t$  описывается  $G(t)$ .

Тогда в течение интервала  $\Delta t$  масса газа, покинувшего помещение, будет равна  $G(t)\Delta t$ . В

процессе загорания твердые и жидкие горючие материалы переходят в газообразное состояние. Если массовая скорость выгорания горючего материала в момент  $t$  определяется  $\Psi(t)$ , то в течение  $\Delta t$  масса выгоревшего материала будет равна  $\Psi(t)\Delta t$ . Следуя закону сохранения массы, для момента  $t$  и интервала  $\Delta t$  справедливо, что

$$\Delta M(t) = \Psi(t)\Delta t - G(t)\Delta t \quad (5)$$

Полагая  $\Delta t \rightarrow 0$ , соотношение (5) переходит в известное уравнение материального баланса начальной стадии пожара в негерметичном помещении:

$$d\rho_m/dt = \Psi(t)/V - G(t)/V. \quad (6)$$

Аналогично можно записать независимые уравнения баланса массы для кислорода, продуктов горения и оптического количества дыма [13]. Анализ решений этих уравнений может производиться для известных функций  $\Psi(t)$  и  $G(t)$  независимо от (1), (2) и (6). В связи с этим уравнения (1), (2) и (6) могут рассматриваться в качестве уравнений, определяющих базовую системную модель начальной стадии пожара в негерметичном помещении.

#### 5. Уравнение состояния среднеобъемной температуры газовой среды при пожаре в помещении как в нелинейной системе

В пожарной практике чаще вместо среднеобъемной плотности газовой среды при пожаре используется среднеобъемная температура. Перейдем от уравнения (6) к соответствующему уравнению состояния пожара для среднеобъемной температуры среды. С учетом (1) уравнение энергии пожара в помещении для момента  $t$  будет определяться в виде

$$\Psi(t)Q_p\eta - c_p T_m(t)G(t) - Q_w(t) = 0, \quad (7)$$

где  $Q_p$  – теплота сгорания горючего материала, Дж/кг;  $\eta$  – коэффициент полноты сгорания горючего материала ( $0 < \eta \leq 1$ );  $c_p$  – теплоемкость газовой среды в помещении, Дж/(кг К);  $Q_w(t)$  – тепловой поток, поглощаемый ограждающими конструкциями и излучаемый через проемы и щели помещения, Дж/с (Вт).

Учитывая (6) и (7), можно показать, что базовая системная модель динамики среднеобъемной температуры газовой среды в помещении на начальной стадии пожара будет определяться нелинейным уравнением вида:

$$dT_m / dt = r\{\Psi(t), Q_p, \eta, Q_w(t), V, c_p, T_0, \rho_0\} / T_m(t)[1 - T_m(t) / R\{\Psi(t), Q_p, \eta, Q_w(t)\}] \quad (8)$$

$$r\{\Psi(t), Q_p, \eta, Q_w(t), V, c_p, T_0, \rho_0\} = \text{где} \frac{[\Psi(t)Q_p\eta - Q_w(t)] / Vc_pT_0\rho_0}{b\{\Psi(t), V, T_0, \rho_0\} = \Psi(t) / VT_0\rho_0,}$$

$$b\{\Psi(t), V, T_0, \rho_0\} = \Psi(t) / VT_0\rho_0,$$

$$R\{\Psi(t), Q_p, \eta, Q_w(t)\} = r\{\Psi(t), Q_p, \eta, Q_w(t), V, c_p, T_0, \rho_0\} / b\{\Psi(t), V, T_0, \rho_0\}$$

– определяют основные системные параметры базовой модели, которые в общем случае зависят температуры и текущего времени. Базовая системная модель (8) относится к классу автономных систем, динамика которых управляется самой системой – решением (8). Для модели (8) динамика среднеобъемной температуры будет полностью описываться свойствами правой части (8) – свойствами фазового портрета. Характерные системные параметры модели (8)  $r\{\Psi(t), Q_p, \eta, Q_w(t), V, c_p, T_0, \rho_0\}$  и  $R\{\Psi(t), Q_p, \eta, Q_w(t)\}$  характеризуют скоростные свойства среднеобъемной температуры и ресурс пожара (максимальное возможное значение среднеобъемной температуры газовой среды, которое может быть достигнуто при пожаре в заданном помещении).

### 6. Анализ динамики среднеобъемной температуры пожара в помещении как в нелинейной динамической системе

Анализ модели (13) выполним при условии, что на интервале наблюдения  $\Delta t$  для произвольного момента времени  $t$  функции  $\Psi(t) = \Psi$  и  $Q_w(t) = Q_w$ . При этом (13) представимо в виде

$$dT_m / dt = r\{\Psi, Q_p, \eta, Q_w, V, c_p, T_0, \rho_0\} T_m(t) / [1 - T_m(t) / R\{\Psi, Q_p, \eta, Q_w\}] \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает частный случай базовой системной модели (8) для

фиксированного интервала наблюдения загорания. Следует заметить, что (9) оказывается подобным известному уравнению, описывающему различные сложные природные явления и процессы. Из уравнения (9) следует, что ресурс пожара определяет величину максимальной среднеобъемной температуры газовой среды в помещении, которая может быть достигнута при заданных значениях теплоты, скорости и коэффициента полноты сгорания горючего материала, а также теплоемкости газовой среды и теплового потока, поглощаемого ограждающими конструкциями и излучаемого через проемы и щели помещения. При этом системный параметр

$$r\{*\} = \Psi Q_p \eta / c_p V T_0 \rho_0 - Q_w / c_p V T_0 \rho_0$$

характеризует скоростные свойства динамики среднеобъемной температуры газовой среды в помещении при неограниченном ресурсе пожара, когда  $R\{*\} \rightarrow \infty$ . Наличие и характер особых точек решения (14), определим из уравнения

$$r\{*\}c[1 - c / R\{*\}] = 0. \quad (10)$$

Найденные решения  $T_m(t) \equiv c$  будут изображаться в фазовом пространстве точками  $T_m = c$  для всех значений времени  $t$  и определять соответствующие неподвижные решения (9). Следуя (10), когда  $r\{*\}$  и  $R\{*\}$  не зависят от времени, такими неподвижными решениями (9) являются особые точки  $c = c1 = 0$  и  $c = c2 = R\{*\}$ . При этом первая особая точка  $c1 = 0$  является репеллером, а вторая  $c2 = R\{*\}$  – аттрактором (определяется ресурсом пожара). На рис.1 представлен характерный фазовый портрет (9), определяемый нелинейностью (8), для негерметичного помещения фиксированного объема  $V = 6 \text{ м}^3$  при заданных параметрах загорания. Для сравнения на рис.1 также представлены фазовые портреты  $f1(T_m(t)) = r\{*\}T_m(t)$  и  $f2(T_m(t)) = -r\{*\}T_m^2(t) / R\{*\}$  соответственно в случае  $R\{*\} \rightarrow \infty$  и при наличии стесненности  $b\{\Psi(t), V, T_0, \rho_0\} = \Psi(t) / VT_0\rho_0$  развития пожара в помещении. Выделенными точками на фазовой оси обозначены неподвижные решения (9).

Качественные свойства (9) исследуем с помощью фазового портрета и анализа самого уравнения. Из анализа рис. 1 видно, что точка

$c_1 = 0$  асимптотически неустойчива (репеллер), а  $c_2 = R\{*\}$  устойчива (аттрактор). Все решения (интегральные кривые) возрастают во времени  $t$  для всех  $T_m \in (0, c_2)$  и убывают для всех  $T_m < 0$  и  $T_m > c_2$ . На расширенной фазовой плоскости  $(t, T_m)$  этим диапазонам изменения  $T_m$  соответствуют характерные горизонтальные участки возрастания, и убывания решений вдоль оси времени. Для участка  $dT_m/dt > 0$  и возрастания при условии  $d^2T_m/d^2t > 0$

решения возрастают и выпуклы. Для участка  $dT_m/dt > 0$  и убывания и  $d^2T_m/d^2t < 0$  решения возрастают и вогнуты. Для участка  $dT_m/dt < 0$  и возрастания и  $d^2T_m/d^2t > 0$  решения убывают и выпуклы, а для участка  $dT_m/dt < 0$  и убывания при условии  $d^2T_m/d^2t < 0$  решения убывают и вогнуты. Следовательно, соответствующее решение  $T_m(t)$  для произвольного начального состояния  $T_m(0) = T_0 > 0$  останется положительным.

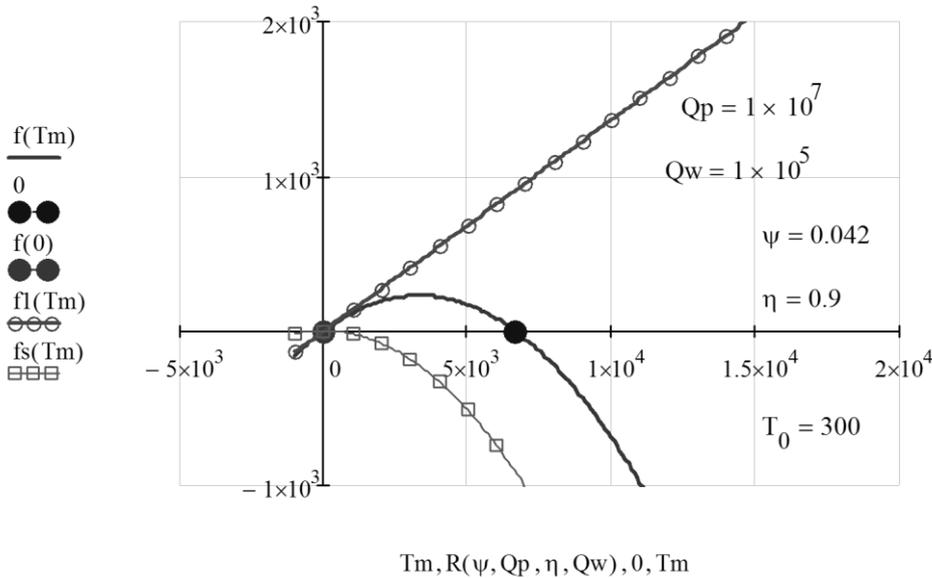


Рисунок 1 – Фазовый портрет для базовой системной модели пожара (9)

Уравнение (9) является нелинейным уравнением Риккати, решение которого

$$T_m(t) = r\{*\}T_0 / [b\{*\}T_0 + (r\{*\} - b\{*\}T_0)e^{-r\{*\}t}] \quad (11)$$

Из (11) следует, что при  $t \rightarrow \infty$   $T_m(t) \rightarrow T^*m = R\{*\} = r\{*\}/b\{*\}$ , и среднеобъемная температура стремится к ресурсу пожара в помещении и не противоречит результатам проведенного выше анализа нелинейной системы пожара. В случае  $T_0 \neq 0$  и  $T_0 \neq R\{*\}$  выражение (17) можно представить в виде

$$T_m(t) = T_0 e^{r\{*\}t} / [1 + T_0(e^{r\{*\}t} - 1) / R\{*\}]. \quad (12)$$

Следуя (12), в случае  $R\{*\} \rightarrow \infty$  решение

$$T_m(t) = T_0 e^{r\{*\}t} = TB1m(r\{*\}, t). \quad (13)$$

Следовательно, неограниченный ресурс пожара ( $R\{*\} \rightarrow \infty$ ) для помещения соответствует ситуации, когда в помещении  $r\{*\} \neq 0$   $[1/c]$ , а величина

$b\{\Psi, V, T_0, \rho_0\} = \Psi / VT_0 \rho_0 \rightarrow 0$   $[1/(c \text{ K})]$ . Такая ситуация характерна для реальных пожаров в больших по объему помещениях и при очень малых скоростях сгорания горючего материала. Если  $r\{*\} = 0$ , то в указанных условиях, следуя (13), среднеобъемная температура  $T_m(t) = T_0$ . При величине  $r\{*\} > 0$  среднеобъемная температура  $T_m(t)$  неограниченно возрастает по закону  $T_0 e^{r\{*\}t}$ . Если величина  $r\{*\} < 0$ , то среднеобъемная температура  $T_m(t)$  убывает по закону  $T_0 e^{-r\{*\}t}$  и при условии  $t \rightarrow \infty$  значение  $T_m(t) \rightarrow 0$ . Отсюда следует, что при неограниченном ресурсе пожара в помещении для его прекращения (снижения величины среднеобъемной температуры) необходимо выполнять условия  $r\{*\} < 0$  или  $\Psi Q_p \eta / c_p VT_0 \rho_0 < Q_w / c_p VT_0 \rho_0$ .

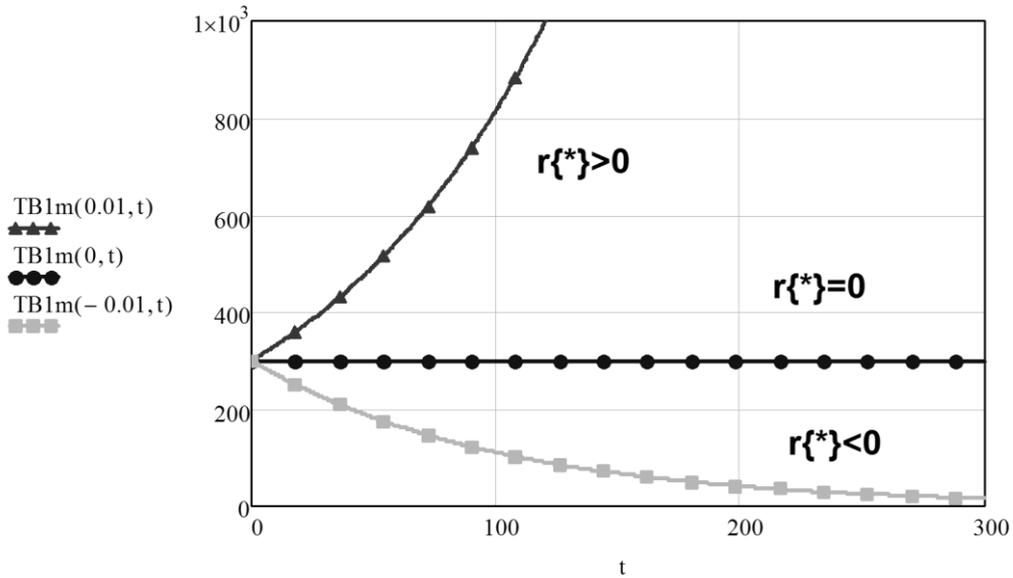


Рисунок 2 – Динамика среднеобъемной температуры при неограниченном ресурсе пожара

При ограниченном ресурсе пожара обычно справедливо условие  $0 < R\{*\} < \infty$ , а параметр  $b\{\Psi, V, T_0, \rho_0\} = \Psi / VT_0\rho_0 > 0$ . Тогда в случае  $r\{*\} \neq 0$ , а также с учетом  $R\{*\} = r\{*\} / b\{*\}$  выражение (12) можно представить в виде

$$Tm(t) = r\{*\}e^{r\{*\}t} / [b\{*\}(e^{r\{*\}t} - 1) + r\{*\} / T_0] \Rightarrow TB1m(r\{*\}, b\{*\}, t) \quad (14)$$

В общем случае (14) определяет динамику среднеобъемной температуры на начальной стадии загорания в негерметичном помещении, когда скоростные свойства динамики температуры за счет очага и отвода тепла в ограждающие конструкции и проемы различны. Если скоростные свойства динамики

среднеобъемной температуры за счет очага и отвода тепла одинаковы, то имеет место случай  $r\{*\} = 0$  и, следуя (14), будем иметь, что

$$Tm(t) = 1 / [b\{*\}t + 1 / T_0] \Rightarrow TB0m(b\{*\}, t) \quad (15)$$

Из анализа (14) и (15) следует, что системный параметр пожара  $r\{*\} = 0$  является точкой бифуркации для базовой системной модели пожара в негерметичном помещении. На рис.3 представлены решения (14) и (15) на интервале времени  $[0 - 1000c]$  при различных фиксированных на интервале значений системных параметров  $r\{*\}$  и  $b\{*\}$ .

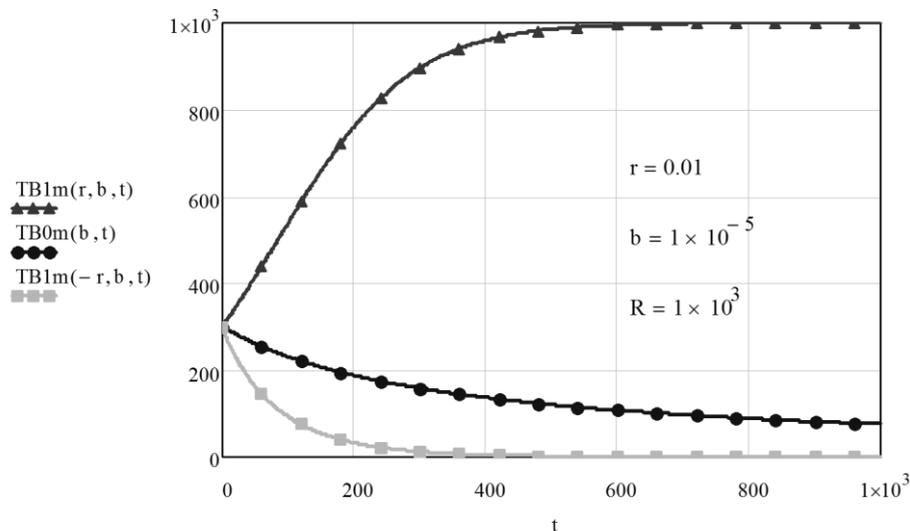


Рисунок 3 – Динамика среднеобъемной температуры при ограниченном ресурсе пожара  $R\{*\}$

Таким образом, при ограниченном ресурсе пожара возможны различные сценарии динамики

среднеобъемной температуры, зависящие от величины системного параметра  $r\{*\}$ .

Например, в случае  $r\{*\} \leq 0$  среднеобъемная температура  $Tm(t) \rightarrow 0$  для любых начальных условий. В случае  $r\{*\} > 0$  при условии  $t \rightarrow \infty$  среднеобъемная температура стремится к значению  $\lim_{t \rightarrow \infty} Tm(t) = r\{*\} / b\{*\} = R\{*\} > 0$ ,

определяемому значениями  $Q_p, \eta, c_p, Q_w, \Psi$  вне зависимости от начальной температуры среды в помещении.

**7. Обсуждение результатов анализа известных моделей динамики среднеобъемной температуры при пожаре в помещении на основе базовой системной модели**

В рамках предложенной базовой системной модели пожара сравним известные модели динамики среднеобъемной температуры при пожаре в помещении. Экспериментальное исследование различных типов пожаров показывает, что доля поглощаемого ограждением тепла от выделяемого источником загорания составляет от 20% до 75% [10]. Определение динамики тепловых потоков в ограждение обычно основывается на результатах экспериментальных исследований и выполняется в соответствии с известными эмпирическими, а также полуэмпирическими моделями и методами. Эти методы и модели обычно описывают зависимость теплового потока от среднеобъемной температуры газовой среды в помещении или от времени.

Для иллюстрации возможностей предлагаемой базовой системной модели пожара (8) рассмотрим три системных параметра, характеризующие выделение тепла очагом, отвод тепла ограждением и стесненность развития пожара соответственно:

$$k1 = Qp \eta / Cp, \quad (16) \quad k2 = Qw / (Cp VT_0 \rho_0), \quad (17)$$

$$g1 = b\{*\} = \Psi / (VT_0 \rho_0). \quad (18)$$

Следуя (16) – (18), системные параметры  $R\{*\}$  и  $r\{*\}$  базовой модели будут определяться следующими соотношениями:

$$R\{*\} \Rightarrow RES(g1, k1, k2) = k1 - k2 / g1, \quad (19)$$

$$r\{*\} \Rightarrow r1(g1, k1, k2) = g1 k1 - k2. \quad (20)$$

В этом случае решения (14) и (15) будут определяться соответственно

$$Tm(T) \Rightarrow TB2m(g1, k1, k2, t) = \frac{(g1 k1 - k2) \exp[(g1 k1 - k2)t]}{g1 \{ \exp[(g1 k1 - k2)t] - 1 \} + (g1 k1 - k2) / To}, \quad (21)$$

$$Tm(T) \Rightarrow TB20m(g1, t) = \frac{1}{g1 t + 1 / To}. \quad (22)$$

На рис. 4 приведены зависимости (21) и (22) для различных системных параметров для ресурса пожара  $RES(g1, k1, k2) = 666,667$ . Фазовый портрет для этих условий, описываемый функцией  $F1(g1, k1, k2, Tm) = r1(g1, k1, k2) Tm - g1 Tm^2$  представлен на рис. 5.

Для заданных параметров (16) – (18) при любой начальной температуре газовой среды фазовые траектории проходят через нулевую особую точку, являющуюся неустойчивой (репеллер). Это означает, что температура среды в начальный момент в помещении является неустойчивой и ее динамика может быть различной (рис.4). Вторая особая точка, соответствующая ресурсу пожара, является устойчивой (аттрактор). К этому значению стремятся все траектории среднеобъемной температуры газовой среды при любых начальных условиях. Для положительного ресурса пожара эта точка «притягивает» к себе все траектории среднеобъемной температуры. Это значение температуры не может быть превышено для заданных системных параметров пожара. Если выделение тепла очагом  $k1 = Qp \eta / Cp$  и стесненность пожара  $g1 = b\{*\} = \Psi / (VT_0 \rho_0)$  заданы, то единственная возможность снижения среднеобъемной температуры в помещении сводится к увеличению системного параметра  $k2 = Qw / (Cp VT_0 \rho_0)$  за счет возрастания потока тепла, отводимого из помещения.

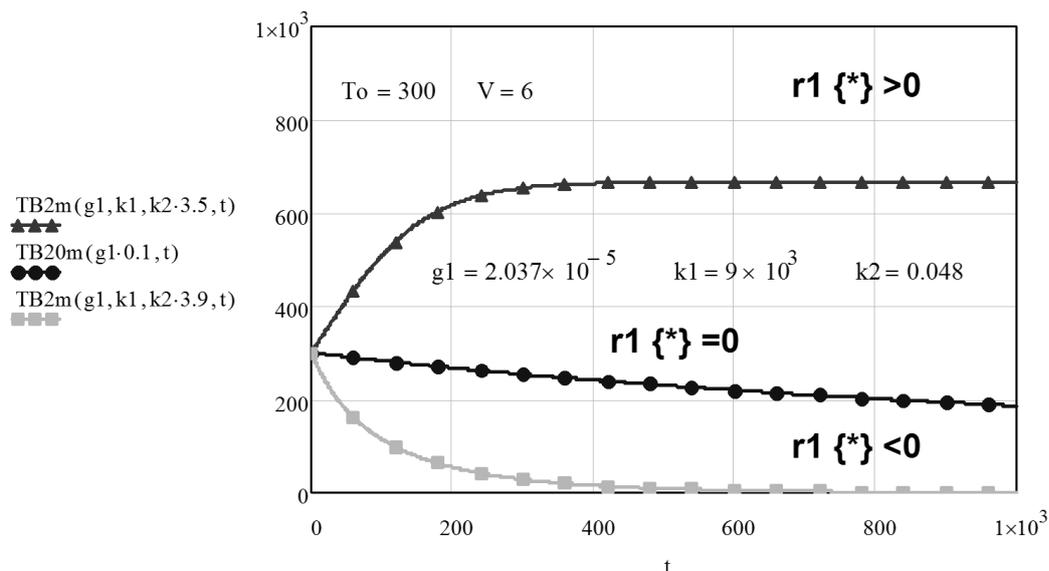


Рисунок 4 – Динамика среднеобъемной температуры для различных значений системных параметров пожара

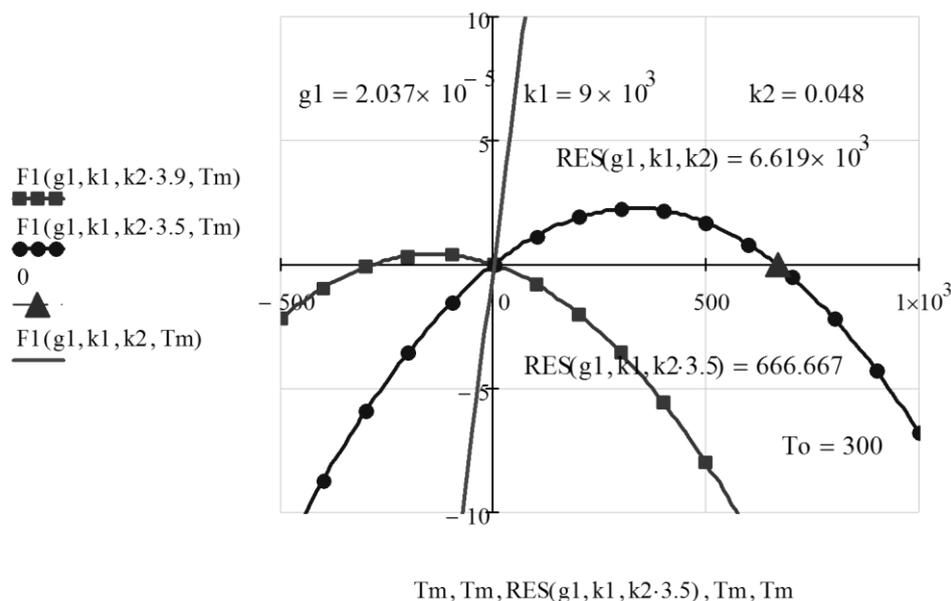


Рисунок 5 – Фазовый портрет для различных системных параметров пожара

В рамках предлагаемой базовой системной модели пожара (9) можно рассмотреть фазовые портреты для различных известных моделей потока тепла в ограждение. Реальные тепловые потоки в различные элементы ограждения при пожарах существенно отличаются. Принято различать потоки тепла через поверхности стен, пола и потолка, а также радиационный поток тепла в окружающую среду через открытые проемы и щели, по которым поступает наружный воздух в помещение. Одна из наиболее общих моделей [14,15] учитывает поток тепла, излучаемого из помещения через проемы и тепловые потоки в стены, потолок и пол. Для

этой модели системный параметр (17) зависит от среднеобъемной температуры, и определяется

$$k2T(x) = \frac{5,67Fo[x^4 - To^4]10^{-8} + aF}{VT\rho_0Cp} \exp\{n(x-To)\} \quad (23)$$

где  $Fo$  – площадь проема [ $m^2$ ];  $F$  – суммарная площадь поверхности ограждений [ $m^2$ ];  $a = 0,8K^{-1}$ ,  $b = 0,00065K^{-2}$ ,  $\alpha = 11,6Bm \cdot m^{-2}$ ,  $n = 0,0023K^{-1}$ .

Для модели потока тепла, излучаемого из помещения через проемы и на поверхность произвольного элемента ограждения при условии внутренней температуры поверхности, равной начальной температуре среды, системный параметр (17) будет определяться

$$k3T(x) = \frac{5,67 Fo[x^4 - To^4]10^{-8} + \alpha i Fi(x - To)}{VTo\rho_0 Cp}, \quad (24)$$

где  $\alpha i$  – коэффициент теплоотдачи элемента поверхности;  $Fi$  – площадь поверхности элемента ограждения. Для модели потока тепла, излучаемого из помещения через проемы и тепловые потоки в стены, потолок и пол на начальной стадии пожара характерный системный параметр (17) будет определяться

$$k2T(x) = \frac{5,67 Fo[x^4 - To^4]10^{-8} + 4,07 F [a(x - To) - b(x - To)^2]^{4/3}}{VTo\rho_0 Cp}. \quad (25)$$

На рис. 6 изображены фазовые портреты базовой системной модели и выше указанных трех моделей развития пожара для принятых значений системных параметров учета общего теплового потока, отводимого из помещения. Для сравнения на рис. 6 представлен фазовый

портрет, описываемый функцией  $F1(g1, k1, k2, Tm)$ , в случае модели фиксированного теплового потока, отводимого из помещения.

Моделям (23) – (25) на рис. 6 соответствуют фазовые портреты, описываемые  $F2(g1, k1, x) = r1[g1, k1, k2T(x)]x - g1x^2$ ,  $F3(g1, k1, x) = r1[g1, k1, k3T(x)]x - g1x^2$ ,  $F4(g1, k1, x) = r1[g1, k1, k4T(x)]x - g1x^2$ . Из анализа приведенных данных следует, что для указанных типов моделей отвода тепла из помещения динамика среднеобъемной температуры для значений  $Tm(t) < 400K$  оказывается схожей, а для значений  $Tm(t) > 400K$  динамика отличается. При этом сохраняется общая тенденция роста температуры  $Tm(t)$  газовой среды к установившемуся состоянию, определяемому ресурсом пожара. Рост температуры происходит с переменной скоростью, которая определяется текущей среднеобъемной температурой  $Tm(t)$ . На начальном этапе с ростом температуры увеличивается скорость ее изменения, достигая максимальной величины в точке  $R\{*\} = r\{*\} / 2b\{*\}$ . При дальнейшем росте температуры скорость ее изменения уменьшается и в точке  $R\{*\}$  оказывается равной нулю.

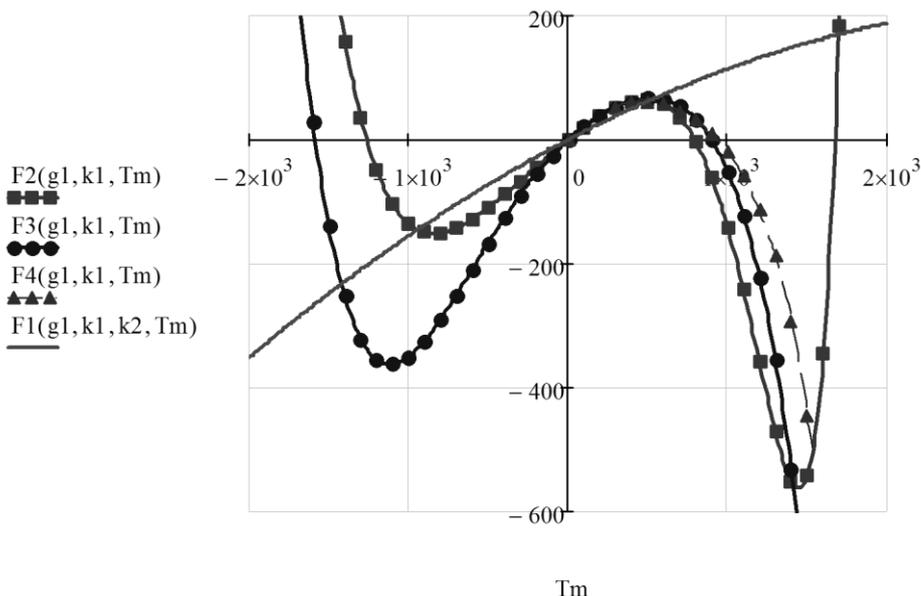


Рисунок 6 – Фазовые портреты пожара для различных моделей потока отводимого тепла при заданных значениях системных параметров

Это состояние температуры газовой среды стабилизируется свойствами данной особой точки в виде аттрактора. Положение аттрактора

для рассмотренных известных моделей оказывается различным. Наибольшие различия имеют место для простейшей модели с

фиксированными потоками тепла, поступающими от очага и отводимого из помещения. Фазовый портрет для данной модели пересекает фазовые портреты других моделей в одной фазовой точке, соответствующей фиксированному моменту времени и параметрам пожара. При этом для модели (23) отвода тепла характерно наличие дополнительной точки равновесия, в которой температура  $Tm(t)$  оказывается неустойчивой и имеет тенденцию роста с неограниченной скоростью.

### 8. Выводы

В работе предложена базовая системная модель пожара в негерметичном помещении в виде нелинейной автономной системы. Представлены результаты системного анализа динамики среднеобъемной температуры газовой среды в помещении на начальной стадии пожара для известных моделей отвода тепла и стесненности пожара. Предложены общие системные параметры пожара. Определены системные параметры пожара, характеризующие скоростные свойства динамики среднеобъемной температуры и ресурс пожара. Установлены особые точки, их характер и условия возникновения бифуркации динамики среднеобъемной температуры при пожаре в помещении, а также рассмотрены системные возможности по управлению системными параметрами пожара на начальной его стадии в негерметичном помещении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beard, A. N. A model of instability and fashover [Text] / A. N. Beard, D. D. Draysdale, P. G. Holborn, S. R. Bishop // *Journal of Applied Fire Science*. 1994. – V. 4. – № 1. – P. 3-16.
2. Jahn, W. The effect of model parameters on the simulation of free dynamics [Text] / W. Jahn, G. Rein, J. L. Torero // *Fire Safety Science*. 2008. – V. 9. – P. 1341-1352.
3. Novozhilov, V. Non-linear dynamical model of compartment fire flashover [Text] / V. Novozhilov // *Journal of Engineering Mathematics*. 2010. – V. 67. – № 4. – P. 387-400.
4. Nevdakh, V. V. Initial stage simulation of stationary faming fire in the closed compartment [Text] / V. V. Nevdakh, A. A. Antoshin, I.E. Zuikov // *Nauka i Tekhnika*. 2014. – № 3. – P. 28-35 (in Russian).
5. Holborn, P. G. Experimental and theoretical model of fashover [Text] / P. G. Holborn, S. R. Bishop, D. D. Draysdale, A. N. Beard // *Fire Safety Journal*. 1993. – V. 21. – № 3. – P. 257-266.
6. Thomas, I. R. The effect of fuel quantity and location on small enclosure fires [Text] / I. R. Thomas, K. A. M. Moinuddin, I. D. Bennets // *Journal of Fire Protection Engineering*. 2007. – V. 17. – № 2. – P. 85-102.
7. Beard, A. N. Flashover and boundary properties [Text] / A. N. Beard // *Fire Safety Journal*. 2010. – V. 45. – № 2. – P. 116-121.
8. Poulsen, A. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings [Text] / A. Poulsen, G. Jomaas // *Fire Technology*. 2012. – V. 48. – № 2. – P. 419-439.
9. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров [Текст] / Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 421 с.
10. Термогазодинамика пожаров в помещениях / Под ред. Ю. А. Кошмарова. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
11. Моделирование пожаров и взрывов / Под ред. Н. Н. Брушлинского, А. Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – 482 с.
12. Пузач, С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности [Текст] / С. В. Пузач. – М.: АГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
13. Кошмаров, Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении [Текст] / Ю. А. Кошмаров. – М.: АГПС МВД России, 2000. – 118 с.
14. Башкирцев М. П. Исследование температурного режима при горении жидкостей в помещении: Дисс. канд. техн. наук. – М.: МИСИ им. В. Куйбышева, 1967. – 226 с.
15. Романенко, П. Н. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле [Текст] / П. Н. Романенко, Ю. А. Кошмаров, М. П. Башкирцев. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1977. – 405 с.

## СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ПОЖЕЖІ В ПРИМІЩЕННІ ЯК НЕЛІНІЙНА ДИНАМІЧНА СИСТЕМА

*Б. Б. Поспелов*

*Національний університет цивільного захисту, Україна*

---

### КЛЮЧОВІ СЛОВА

базова системна модель пожежі, системний аналіз середньооб'ємної температури газового середовища, негерметичне приміщення

### АНОТАЦІЯ

Запропонована базова системна модель пожежі в негерметичному приміщенні у вигляді нелінійної системи і надані результати системного аналізу динаміки середньооб'ємної температури газового середовища в приміщенні на початковій стадії пожежі для різних відомих моделей відводу тепла і обмеженості розвитку пожежі. Визначено окремі системні параметри пожежі. Введено інтегральні системні параметри, що характеризують швидкісні властивості динаміки середньооб'ємної температури і ресурс пожежі, а також три її характерних системних параметра. Встановлено особливі точки, їх характер і умови виникнення біфуркації динаміки середньооб'ємної температури при пожежі, а також оцінені системні можливості по управлінню системними параметрами пожежі в негерметичному приміщенні на початковій її стадії

## THE SYSTEM MODEL OF THE INDOOR FIRE AS A NONLINEAR DYNAMIC SYSTEM

*B. Pospelov*

*National university of civil protection, Ukraine*

---

### KEYWORDS

basic system fire model, system analysis of the gas environment medium-volume temperature, leaking room

### ANNOTATION

The basic system model of the fire in the leaking room in a nonlinear system form is offered in the work and also the results of the system analysis of dynamics of medium-volume temperature of gas indoor environment at an initial stage of the fire for various known models of heat removal and constraint of the fire extension are presented. The private system fire parameters are determined. The integrated system parameters characterizing high-speed properties of medium-volume temperature dynamics and the fire resource, and also three typical system parameters are suggested. The special points, their character and conditions of bifurcation of medium-volume temperature dynamics appearance at the fire are established, and also the system opportunities for system parameters' management of the fire in the leaking room at its initial stage are estimated