

*Б.Б. Поспелов, д.т.н., проф., вед. научн. сотр., НУГЗУ,  
Р.И. Шевченко, к.т.н., с.н.с., нач. лаборатории, НУГЗУ,  
А.Н. Коленов, ст. преподаватель, НУГЗУ*

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРА В НЕГЕРМЕТИЧНОМ ПОМЕЩЕНИИ**

(представлено д-ром техн. наук Тарасенко А.А.)

Рассмотрена базовая системная модель начальной стадии пожара в негерметичном помещении. Приведены результаты системного анализа динамики среднеобъемной температуры газовой среды.

**Ключевые слова:** базовая системная модель пожара, системный анализ среднеобъемной температуры газовой среды, негерметичное помещение.

**Постановка проблемы.** Эффективность противопожарной защиты неразрывно связана с надежностью раннего обнаружения пожара. Поскольку пожары относятся к сложным системам, адекватное их моделирование возможно только на основе системного подхода. В этой связи актуальной является проблема системного анализа динамики опасных факторов пожара на его начальной стадии для различных типов объектов. Одним из опасных факторов пожара в помещениях является температура. Поэтому в рамках указанной общей проблемы одной из актуальных частных проблем является системный анализ моделей динамики среднеобъемной температуры пожара в помещении в процессе его возникновения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В [1-7] рассмотрены различные модели динамики температуры в помещениях на начальной стадии пожара. Многообразие моделей обусловлено различными типами ограничений и допущений, накладываемых при их разработке. При этом в литературе отсутствуют результаты системного анализа опасных факторов пожара для базовых системных моделей. Так, например, для интегральных и зонных моделей, как правило, постулируется стационарность условий горения. В [5] рассматривается интегральная модель динамики температуры в помещении на начальной стадии пожара в предположении, что удельная массовая скорость выгорания является постоянной величиной. Однако в [6] отмечается, что величина удельной массовой скорости выгорания, например, для дизельного топлива изменяется примерно вдвое на начальном этапе пожара. При этом исследования ряда авторов свидетельствуют о нестационарном характере всех физико-химических процессов в начальной стадии пожара в помещении [6].

**Постановка задачи и ее решение.** Целью настоящей работы является системный анализ динамики среднеобъемной температуры газовой среды в негерметичном помещении на начальной стадии пожара с использованием базовой системной модели пожара.

В начальной стадии пожара в негерметичном помещении с малым значением проемности поступление воздуха в помещение из окружающей среды отсутствует [5], а среднее значение давления газовой среды является практически неизменным и его можно положить равным давлению наружного воздуха. Поэтому для среднеобъемных факторов пожара

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

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

где  $p_m(t)$  – среднеобъемное давление газовой среды в помещении в момент времени  $t$ ;  $T_0, \rho_0$  – температура и плотность газовой среды в помещении до начала пожара;  $\rho_m(t), T_m(t)$  – среднеобъемные плотность и температура среды в помещении в момент времени  $t$ . Пожар в помещении на начальной стадии будем рассматривать в виде некоторой термодинамической системы, границы которой определяются внутренней поверхностью помещения. В общем случае параметры такой системы будут определяться среднеобъемными значениями основных факторов пожара в виде температуры, плотности и суммарной массы газа в помещении, которые изменяются во времени  $t$ . В случае фиксированного объема помещения  $V = const$  дифференциальное уравнение материального баланса на начальной стадии пожара для рассматриваемой системы

$$d\rho_m/dt = \Psi(t)/V - G(t)/V, \quad (3)$$

где  $\Psi(t)$  и  $G(t)$  – массовая скорость выгорания горючего материала и расход массы газа, покидающего помещение через проемы и щели. Аналогичные уравнения баланса можно получить для кислорода, продуктов горения и оптического количества дыма [5]. При этом их анализ в случае заданных  $\Psi(t)$  и  $G(t)$  может производиться независимо. Поэтому (1), (2) и (3) будем рассматривать в качестве базовой системной модели начальной стадии пожара в негерметичном помещении.

Для заданных значений теплоты  $Q_p$  сгорания горючего материала, коэффициента  $\eta$  полноты сгорания, теплоемкости  $c_p$  газовой среды в помещении и теплового потока  $Q_w(t)$ , поглощаемого ограждающими конструкциями и излучаемого через проемы и щели, случае

$\Psi(t) = \Psi$  и  $Q_w(t) = Q_w$  на конечном интервале  $\Delta t$  для любого  $t$  справедливо уравнение

$$dT_m / dt = r\{*\}T_m(t)[1 - T_m(t) / R\{*\}], \quad (4)$$

где  $r\{*\} = r\{\Psi(t), Q_p, \eta, Q_w(t), V, c_p, T_0, \rho_0\} = [\Psi(t)Q_p\eta - Q_w(t)] / Vc_pT_0\rho_0$  и  $R\{*\} = R\{\Psi(t), Q_p, \eta, Q_w(t)\} = r\{\Psi(t), Q_p, \eta, Q_w(t), V, c_p, T_0, \rho_0\}VT_0\rho_0 / \Psi(t)$  будут определять интегральные системные параметры базовой системной модели пожара. При этом  $r\{*\}$  и  $R\{*\}$  зависят от общих параметров  $\{\Psi, Q_p, \eta, Q_w, V, c_p, T_0, \rho_0\}$  и являются взаимно зависимыми. Интегральный системный параметр  $R\{*\}$  определяет максимальную среднеобъемную температуру 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, который в дальнейшем будем называть ресурсом пожара. Интегральный системный параметр  $r\{*\}$  характеризует скоростные свойства динамики среднеобъемной температуры газовой среды в помещении при условии  $R\{*\} \rightarrow \infty$ .

Для построения фазового портрета рассматриваемой системы пожара определим наличие и характер особых точек решения уравнения (4). Особые точки будут определяться решениями уравнения

$$r\{*\}c[1 - c / R\{*\}] = 0. \quad (5)$$

Найденные решения  $T_m(t) \equiv c$  (5) будут отображаться в фазовом пространстве точками  $T_m = c$  для всех моментов времени  $t$  и определять соответствующие неподвижные решения. Следуя (5), когда параметры  $r\{*\}$  и  $R\{*\}$  не зависят от времени, неподвижными решениями (4) являются точки  $c = c1 = 0$  и  $c = c2 = R\{*\}$ . При этом первая особая точка  $c1 = 0$  является репеллером, а вторая  $c2 = R\{*\}$  – аттрактором. В качестве иллюстрации на рис.1 представлен фазовый портрет для модели (4) в случае помещения объемом  $V = 6\text{ м}^3$  при заданных параметрах пожара. Для сравнения на рис.1 представлены также 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 стесненности развития пожара  $b\{\Psi(t), V, T_0, \rho_0\} = \Psi(t) / VT_0\rho_0$ . Выделенными точками на фазовой оси обозначены неподвижные решения (4), соответствующие нулевой скорости изменения среднеобъемной температуры. Из анализа рис.1 видно,

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

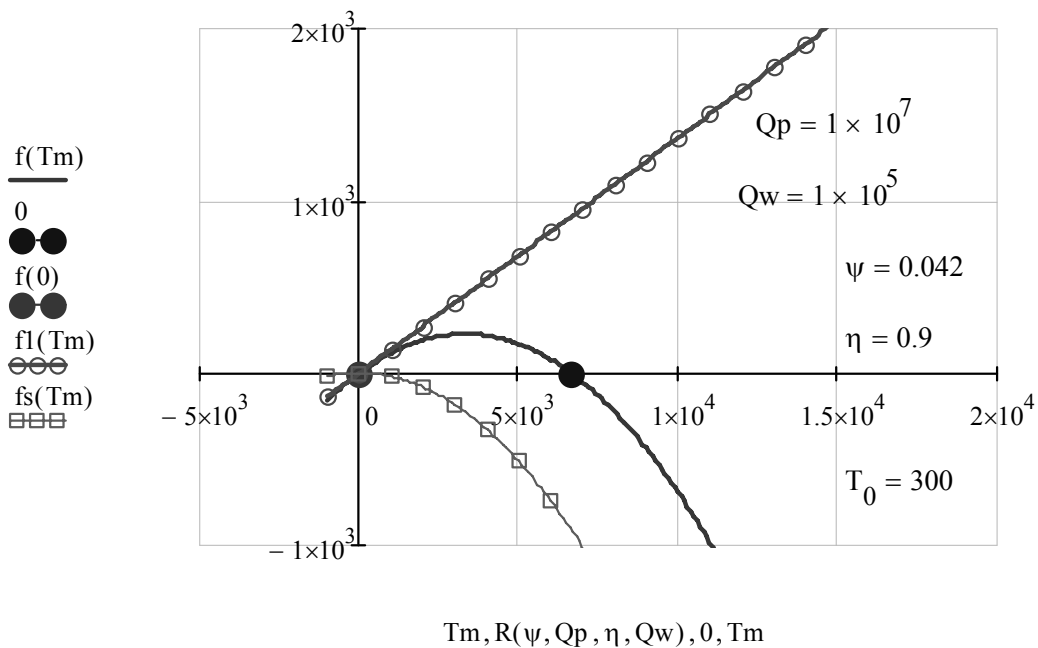


Рис. 1. Фазовый портрет для базовой системной модели пожара (4)

Из данного качественного анализа следует, что соответствующее решение  $Tm(t)$  для произвольного  $Tm(0) = T_0 > 0$  останется положительным. Уравнение (4) имеет решение

$$Tm(t) = r\{*\}T_0 / [b\{*\}T_0 + (r\{*\} - b\{*\}T_0)e^{-r\{*\}t}]. \tag{6}$$

Выражение (6) определяет уравнение интегральных кривых для всех  $T_0 > 0$ . При условии  $t \rightarrow \infty$  величина  $Tm(t) \rightarrow T^*m = R\{*\} = r\{*\} / b\{*\}$ . Если  $T_0 \neq 0$  и  $T_0 \neq R\{*\}$ , то (6) можно представить в виде

$$Tm(t) = T_0 e^{r\{*\}t} / [1 + T_0 (e^{r\{*\}t} - 1) / R\{*\}]. \tag{7}$$

Из (7) следует, что в случае  $R\{*\} \rightarrow \infty$   $Tm(t) = T_0 e^{r\{*\}t} = TB1m(r\{*\}, t)$ .

В случае неограниченного ресурса пожара  $R\{*\} \rightarrow \infty$   $r\{*\} \neq 0$  и стесненность пожара  $b\{\Psi, V, T_0, \rho_0\} = \Psi / VT_0 \rho_0 \rightarrow 0$ . Обычно это характерно для реальных пожаров в больших по объему помещениях и при очень малых скоростях сгорания горючего материала. Если  $r\{*\} = 0$ , то  $Tm(t) = T_0$ . При условии  $r\{*\} > 0$  величина  $Tm(t)$  неограниченно растет по закону  $T_0 e^{r\{*\}t}$ . Если величина  $r\{*\} < 0$ , то  $Tm(t)$  убывает по закону  $T_0 e^{-r\{*\}t}$ . Это означает, что при условии  $t \rightarrow \infty$  значение  $Tm(t) \rightarrow 0$ . Отсюда следует, что при неограниченном ресурсе пожара для его прекращения (снижения среднеобъемной температуры) необходимо обеспечивать выполнение условия  $r\{*\} < 0$  или  $\Psi Q_p \eta / c_p VT_0 \rho_0 < Q_w / c_p VT_0 \rho_0$ .

В случае ограниченного ресурса пожара, когда  $0 < R\{*\} < \infty$ , и  $b\{\Psi, V, T_0, \rho_0\} = \Psi / VT_0 \rho_0 > 0$  при условии  $r\{*\} \neq 0$ , а также с учетом  $R\{*\} = r\{*\} / b\{*\}$  выражение (7) можно представить в виде

$$Tm(t) = r\{*\} e^{r\{*\}t} / [b\{*\} (e^{r\{*\}t} - 1) + r\{*\} / T_0] \Rightarrow TB1m(r\{*\}, b\{*\}, t). \quad (8)$$

Выражение (8) определяет динамику среднеобъемной температуры на начальной стадии пожара в негерметичном помещении, когда скоростные свойства динамики среднеобъемной температуры за счет очага горения и отвода тепла в ограждающие конструкции и проемы отличаются. Если скоростные свойства одинаковы, то  $r\{*\} = 0$  и согласно (8)

$$Tm(t) = 1 / [b\{*\}t + 1 / T_0] \Rightarrow TB0m(b\{*\}, t). \quad (9)$$

Из анализа (8) и (9) следует, что интегральный системный параметр  $r\{*\} = 0$  является точкой бифуркации для рассматриваемой базовой системной модели пожара. На рис. 2 представлены искомые решения для интервала времени [0-1000с] при различных фиксированных значениях  $r\{*\}$  и  $b\{*\}$  на данном интервале времени. Следовательно, при ограниченном ресурсе пожара возможны различные сценарии динамики среднеобъемной температуры, зависящие от интегрального системного параметра  $r\{*\}$ . В случае  $r\{*\} \leq 0$   $Tm(t) \rightarrow 0$  для любых начальных условий. В случае  $r\{*\} > 0$  и вне зависимости от начальной температуры среды в помещении при условии  $t \rightarrow \infty$  среднеобъемная температура стремится к величине  $\lim_{t \rightarrow \infty} Tm(t) = r\{*\} / b\{*\} = R\{*\} > 0$ , определяемой  $Q_p, \eta, c_p, Q_w$  и  $\Psi$ .

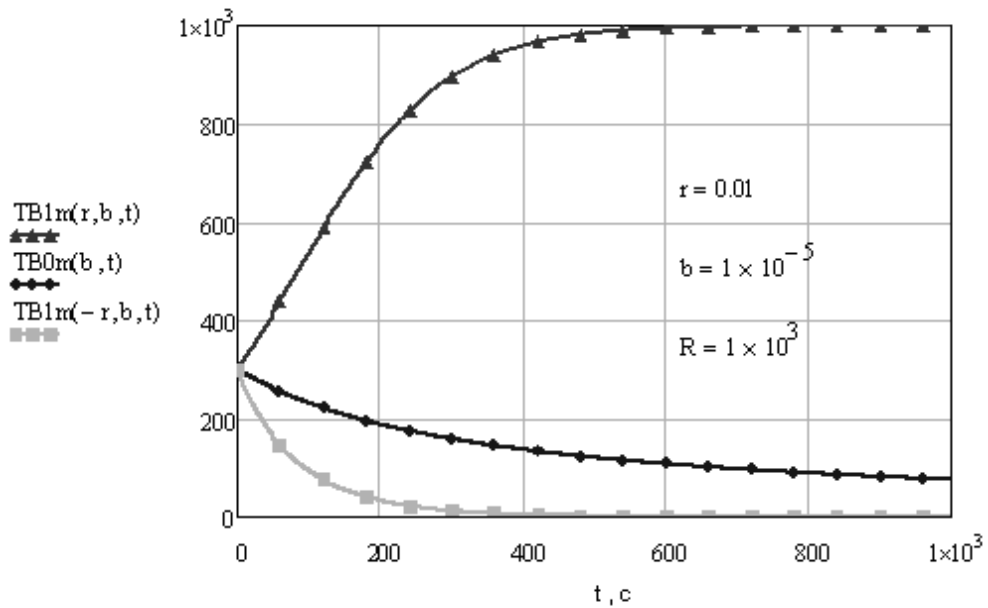


Рис. 2. Динамика среднеобъемной температуры при ограниченном ресурсе пожара  $R\{*\}$

Экспериментальные исследования различных реальных пожаров и стадий их развития показывают, что доля поглощенного конструкциями ограждения тепла от выделяемого источником горения может составлять от 20% до 75% [2]. При этом определение тепловых потоков и их динамики основывается обычно на результатах экспериментальных исследований и выполняется в соответствии с известными эмпирическими и полуэмпирическими моделями и методами, описывающими зависимость теплового потока от среднеобъемной температуры газовой среды в помещении или от времени [2-5].

Для иллюстрации возможностей обобщения известных моделей в рамках рассматриваемой базовой системной модели пожара (4) рассмотрим три ее характерных системных параметра, характеризующих системные свойства очага горения, общего отвода тепла из помещения и стесненности развития пожара:

$$k1 = Qp\eta / Cp, \tag{10}$$

$$k2 = Qw / (CpVT_0\rho_0), \tag{11}$$

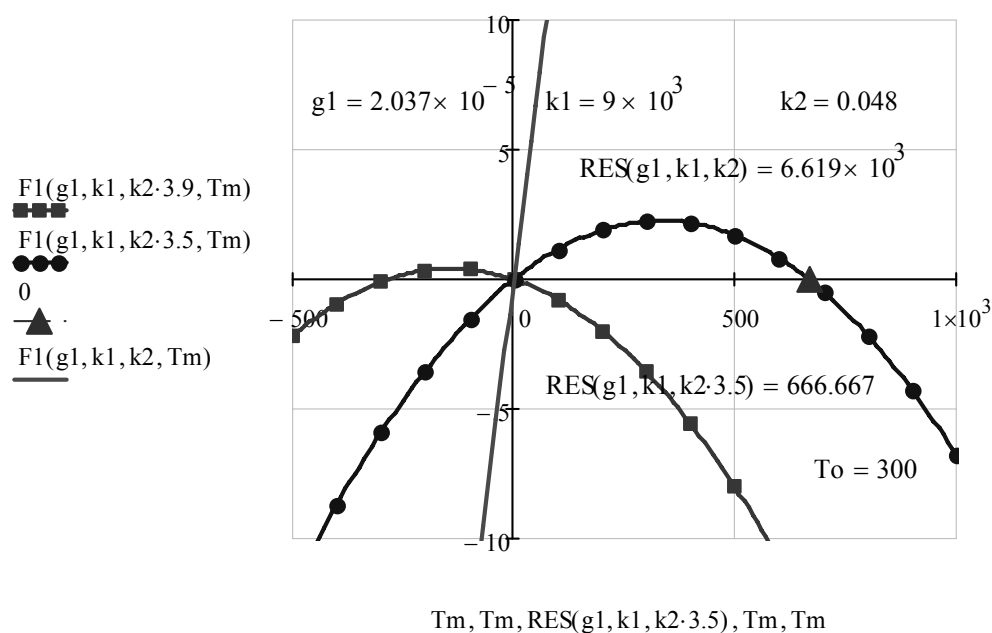
$$g1 = b\{*\} = \Psi / (VT_0\rho_0). \tag{12}$$

С учетом этого искомые решения будут определяться

$$Tm(T) \Rightarrow TB2m(g1,k1,k2,t) = \frac{(g1k1 - k2) \exp[(g1k1 - k2)t]}{g1\{\exp[(g1k1 - k2)t] - 1\} + (g1k1 - k2)/To}, \tag{13}$$

$$Tm(T) \Rightarrow TB20m(g1,t) = \frac{1}{g1t + 1/To}. \tag{14}$$

Фазовый портрет для (13) и (14) при конкретных значениях характерных системных параметров пожара и заданном ресурсе пожара  $RES(g_1, k_1, k_2) = 666,667$  представлен на рис. 3.



**Рис. 3. Фазовый портрет для конкретных значений характерных системных параметров пожара**

Для заданных параметров (10) – (12) пожара при любой начальной температуре газовой среды фазовые траектории проходят через нулевую особую точку, которая является неустойчивой (репеллер). Это означает, что температура газовой среды в начальный момент является неустойчивой и ее дальнейшая динамика может быть различной (рис. 2). Вторая особая точка определяется ресурсом пожара и является устойчивой (аттрактор). К этому значению стремятся все траектории среднеобъемной температуры газовой среды в помещении при любых начальных условиях. При положительном ресурсе пожара эта точка «притягивает» к себе все траектории среднеобъемной температуры газовой среды в помещении. Это значение температуры не может быть превышено для заданных характерных системных параметров пожара. Если источник горения  $k_1 = Qp\eta / Cp$  и стесненность пожара  $g_1 = b\{*\} = \Psi / (VT_0\rho_0)$  заданы, то единственная возможность снижения среднеобъемной температуры газовой среды в помещении с целью прекращения пожара состоит в увеличении характерного параметра  $k_2 = Qw / (CpVT_0\rho_0)$  за счет возрастания потока отводимого из помещения тепла – приближение точки аттрактора к репеллеру.

В рамках рассматриваемой базовой системной модели начальной стадии пожара в негерметичном помещении можно построить фазовые портреты для различных известных моделей потока тепла в ог-

раждающие конструкции.

Одна из наиболее общих [6,7] учитывает поток тепла, излучаемого из объема помещения через проемы и тепловые потоки в стены, потолок и пол. Для этой модели характерный системный параметр (11) будет зависеть от среднеобъемной температуры газовой среды в помещении и определяться

$$k_2T(x) = \frac{5,67Fo[x^4 - To^4]10^{-8} + \alpha F[a(x - To) - b(x - To)^2] \exp\{n(x - To)\}}{VTo\rho_0Cp}, \quad (15)$$

где  $Fo$  – площадь проема [ $m^2$ ];  $F$  – суммарная площадь поверхности ограждений [ $m^2$ ];  $a = 0,8K^{-1}$ ,  $b = 0,00065K^{-2}$ ,  $\alpha = 11,6Вт \cdot m^{-2}$ ,  $n = 0,0023K^{-1}$ . Для модели потока тепла, излучаемого из объема помещения через проемы и на поверхность произвольного элемента ограждения при условии температуры внутренней его поверхности, равной начальной температуре среды, характерный системный параметр (11)

$$k_3T(x) = \frac{5,67Fo[x^4 - To^4]10^{-8} + ai Fi(x - To)}{VTo\rho_0Cp}, \quad (16)$$

где  $ai$  – коэффициент теплоотдачи элемента поверхности;  $Fi$  – площадь поверхности элемента ограждения. Для модели потока тепла, излучаемого в частном случае из объема помещения через проемы и тепловые потоки в стены, потолок и пол характерный системный параметр (11) будет определяться

$$k_2T(x) = \frac{5,67Fo[x^4 - To^4]10^{-8} + 4,07F[a(x - To) - b(x - To)^2]^{4/3}}{VTo\rho_0Cp}. \quad (17)$$

На рис. 4 представлены фазовые портреты рассматриваемой базовой системной модели развития пожара, для которой значения характерных системных параметров пожара соответствовали трем выше упомянутым моделям учета отводимого теплового потока. Для сравнения на рис. 4 представлен портрет для фазовой функции  $F1(g1, k1, k2, Tm)$  в случае фиксированного отводимого теплового потока.

На рис. 4 известным моделям (15) – (17) соответствуют фазовые портреты, описываемые функциями:  $F2(g1, k1, x) = r1[g1, k1, k_2T(x)]x - g1x^2$ ,  $F3(g1, k1, x) = r1[g1, k1, k_3T(x)]x - g1x^2$ , и  $F4(g1, k1, x) = r1[g1, k1, k_4T(x)]x - g1x^2$ . Из анализа данных следует, что для указанных моделей отвода тепла из помещения динамика среднеобъемной температуры при условии  $Tm(t) < 400K$  оказывается схожей, а для значений  $Tm(t) > 400K$  оказывается различной. При этом сохраняется общая тенденция роста темпе-



ратуры  $T_m(t)$  газовой среды к установившемуся значению, определяемому ресурсом пожара. Характерно, что рост температуры осуществляется с переменной скоростью, определяемой текущей среднеобъемной температурой  $T_m(t)$ .

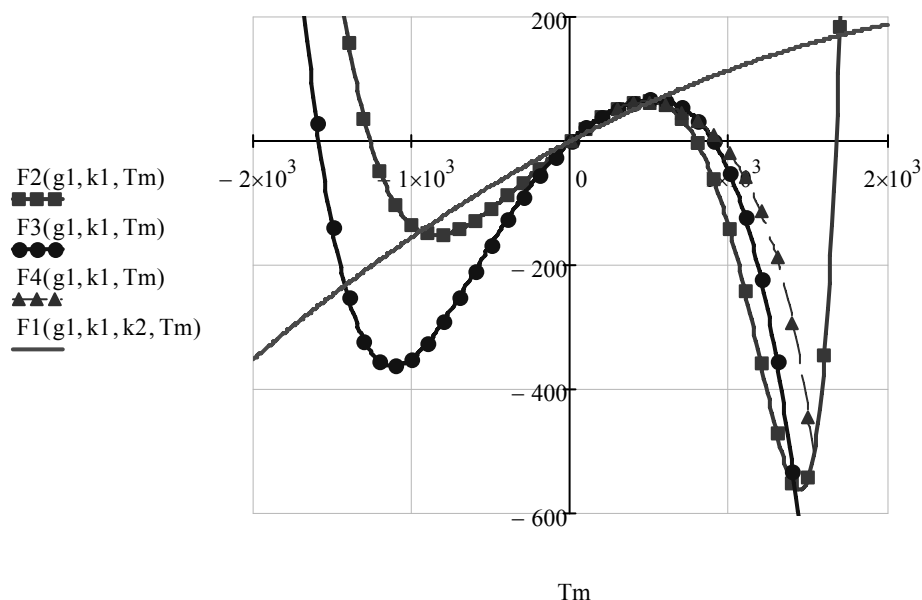


Рис. 4. Фазовые портреты развития пожара для различных моделей потока отводимого тепла и принятых значений характерных системных параметров

На начальном этапе с ростом температуры увеличивается и 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. Это состояние температуры газовой среды стабилизируется свойствами данной особой точки в виде аттрактора. Положение точки аттрактора для рассмотренных моделей оказывается различным. Наибольшие различия имеют место для простейшей модели с фиксированными потоками тепла, поступающими от очага горения и отводимого из помещения. Фазовый портрет для данной модели пересекает фазовые портреты для других моделей в одной фазовой точке, соответствующей фиксированному моменту времени и параметрам пожара. При этом для модели (15) отвода тепла характерно наличие дополнительной точки равновесия, в которой температура  $T_m(t)$  оказывается неустойчивой и имеет тенденцию дальнейшего роста с неограниченной скоростью.

**Выводы.** Предложена базовая системная модель пожара в негерметичном помещении и представлены результаты системного анализа динамики среднеобъемной температуры газовой среды в помещении на начальной стадии пожара для различных моделей отвода тепла и стес-

ненности развития пожара. Определены частные системные параметры пожара и введены впервые интегральные системные параметры, характеризующие скоростные свойства динамики среднеобъемной температуры и ресурс пожара, а также три его характерных системных параметра. Установлены особые точки, их характер, а также условия возникновения бифуркации динамики среднеобъемной температуры при пожаре. Оценены системные возможности управления системными параметрами пожара в негерметичном помещении на начальной его стадии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 421 с.
2. Кошмаров Ю.А. Термогазодинамика пожаров в помещениях / Ю.А. Кошмаров. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
3. Брушлинский Н.Н. Моделирование пожаров и взрывов / Н.Н. Брушлинский, 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 / С.В. Пузач. – М.: АГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
5. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Ю.А. Кошмаров. – 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. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле / П.Н. Романенко, Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1977. – 405 с.

nuczu.edu.ua

В.Б. Поспелов, Р.І.Шевченко, О.М. Колєнов

### **Системний аналіз моделей виникнення пожежі у негерметичному приміщенні**

Розглянуто базова системна модель початкової стадії пожежі в негерметичному приміщенні. Наведено результати системного аналізу динаміки осереднєній за об'ємом температури газового середовища.

**Ключові слова:** базова системна модель пожежі, системний аналіз осереднєній за об'ємом температури газового середовища, негерметичне приміщення.

V.B. Pospelov, R.I. Shevchenko, A.N. Kolenov

### **System analysis models of fire in permeable room**

We consider the basic system model of the initial stage of a fire in a non-pressurized environment. Givens the results system analysis of the dynamics mean bulk temperature of the gas medium.

**Keywords:** base system model of fire, system analysis mean bulk temperature of the gaseous medium, unsealed room.