

*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, ρ_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 η 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 Δt 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 $fs(T_m(t)) = -r\{*\}T_m^2(t) / R\{*\}$ 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.

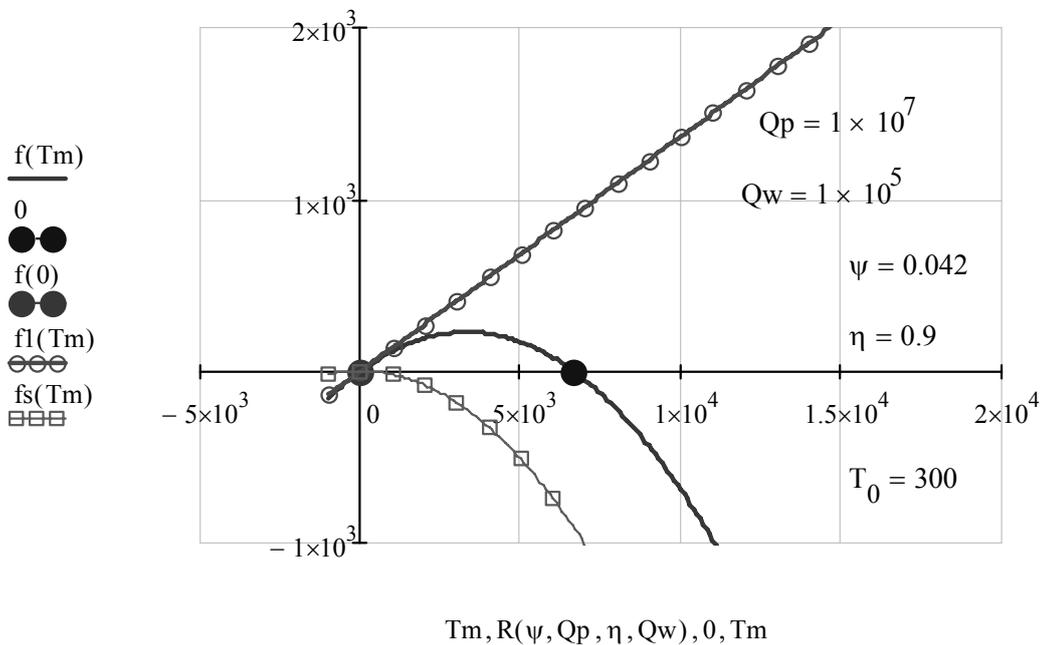


Рис. 1. Фазовый портрет для базовой системной модели пожара (4)

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, η, c_p, Q_w и Ψ .

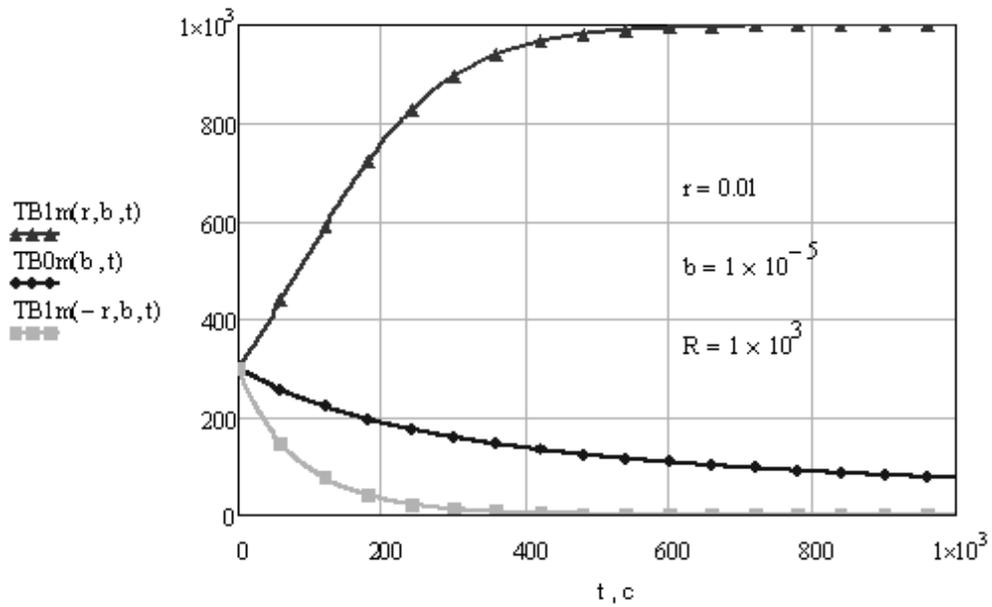


Рис. 2. Динамика среднеобъемной температуры при ограниченном ресурсе пожара $R\{*\}$

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.

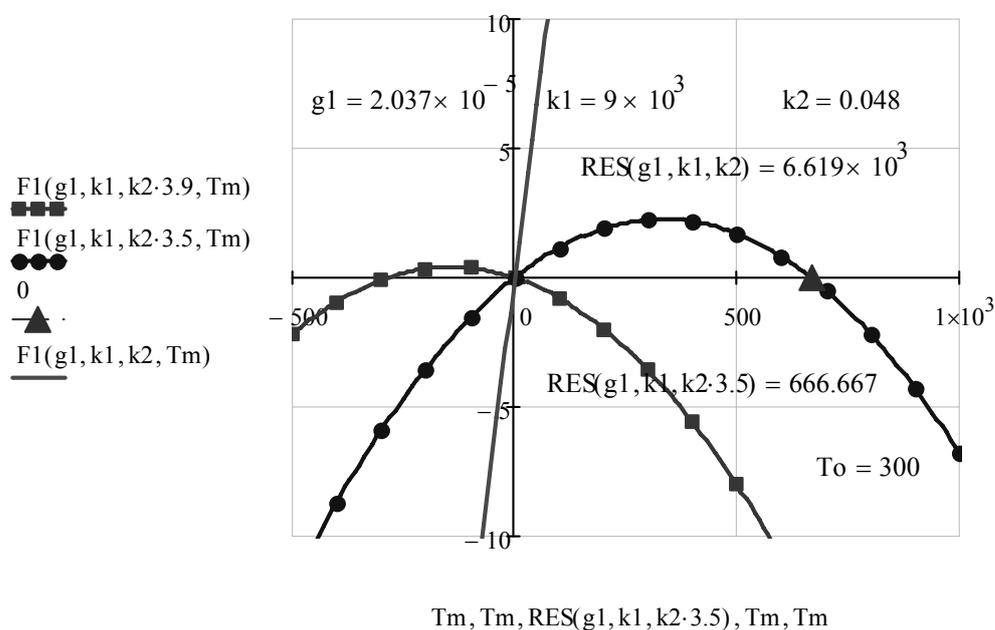


Рис. 3. Фазовый портрет для конкретных значений характерных системных параметров пожара

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 $T_m(t)$.

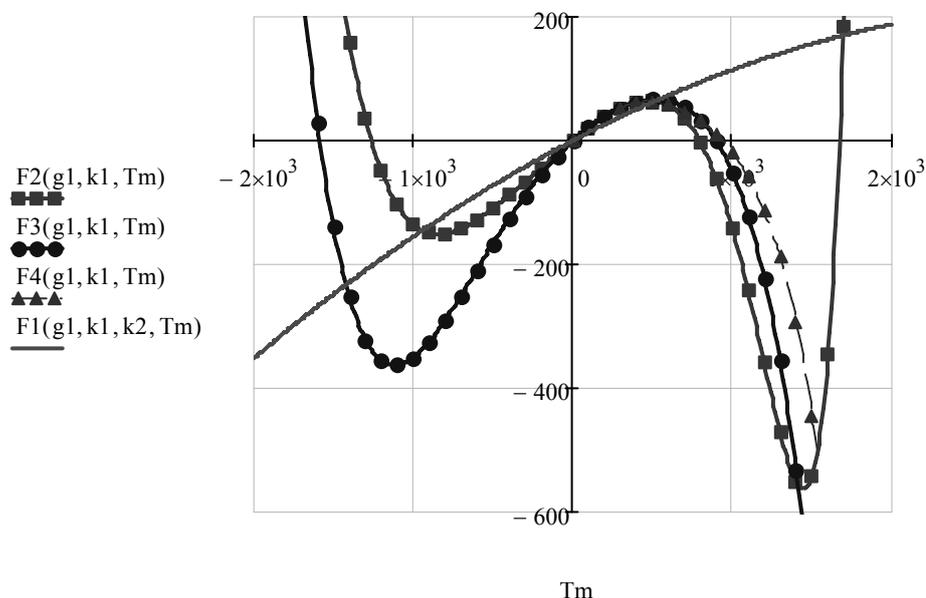


Рис. 4. Фазовые портреты развития пожара для различных моделей потока отводимого тепла и принятых значений характерных системных параметров

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. Коленов

Системний аналіз моделей виникнення пожежі у негерметичному приміщенні

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

Ключові слова: базова системна модель пожежі, системний аналіз осереднень 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.