

*Поспелов Б.Б., д-р техн. наук, вед. науч. сотр., НУГЗУ,
Шевченко Р.И., канд. техн. наук, нач. лаб., НУГЗУ,
Коленов А.Н., ст. преп., НУГЗУ*

СИСТЕМНЫЕ МОДЕЛИ СОСТОЯНИЯ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЕХНОГЕННОГО И ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА

(представлено д-ром техн. наук Басмановым А.Е.)

Предложены системные модели для описания различных типов опасных объектов природного и техногенного характера в переменных состояниях

Ключевые слова: системная модель, опасные объекты, переменные состояния

Постановка проблемы. В последние годы в теории и практике предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС) начинают применяться современные кибернетические подходы. Важное место указанным подходам отводится при изучении свойств различных опасных объектов (ОО). Здесь термин «опасные объекты» применяется в самом широком смысле: как некоторая часть окружающего мира, в которой могут возникать различные по характеру опасные ситуации, рассматриваемые в качестве возможных источников возникновения различных угроз и ЧС. В зависимости от характера опасных ситуаций различают ОО техногенные, природные и социальные. При этом ОО, где используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют радиоактивные, пожаровзрывоопасные, опасные химические и биологические вещества принято называть потенциально ОО. С учетом реальной статистики наиболее частыми и создающими наибольшую реальную угрозу возникновения различных ЧС являются опасные ситуации техногенного и природного характера. Большинство существующих ОО техногенного и природного характера представляют собой достаточно сложные по структуре и функциональному взаимодействию между элементами объекты. Поэтому их можно отнести к классу сложных объектов, для всестороннего изучения которых необходимо использовать современный системный подход и методы теории систем. Для реализации системного подхода необходимо представить ОО в виде некоторой системы и описать ее на языке

математики или, как принято говорить, создать математическую модель ОО. В теоретическом плане для описания таких систем и изучения их динамики с целью выяснения условий возникновения возможных критических ситуаций, являющихся потенциальными источниками возможных ЧС, необходимо знать их состояние в текущий и последующий моменты времени. Создание системных моделей ОО и исследование на их основе режимов работы реальных ОО является эффективным инструментом выявления различных особых и критических режимов их функционирования, а также поиска возможных оптимальных управлений такими объектами. Поэтому одной из актуальных проблем современной теории и практики предупреждения ЧС следует считать развитие системных моделей ОО техногенного и природного характера.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблеме изучения различных типов ОО техногенного и природного характера посвящено значительное число работ. При этом основным принят подход, базирующийся на рассмотрении физико-химических законов, описывающих реальные процессы внутри объектов и при взаимодействии их с внешней средой. Основной упор делается на использовании моделей детерминированных процессов. Получаемые при этом физические модели оказываются довольно громоздкими и представляют определенные трудности при их использовании на практике. Попытки приблизить такие модели к реальным объектам и процессам приводят к существенному их усложнению. Учет стохастической природы большинства реальных ОО при использовании детерминированных моделей встречает определенные трудности. Поэтому изучение стохастических свойств большинства ОО ограничивается рамками гауссовых приближений и статистиками, порядок которых не превышает двух. Однако процессы, протекающие внутри реальных ОО и при взаимодействии их со средой, как правило, оказываются более сложными и негауссовыми. Учет в детерминированных моделях негауссовости процессов при этом встречает еще большие трудности. В этой связи более конструктивным оказывается подход, базирующийся на моделях процессов и систем в виде дифференциальных уравнений на основе метода переменных состояния [1-4]. Такие модели обладают рядом известных положительных для практики свойств [2,4]. Создаваемые модели процессов и систем при этом относятся к классу феноменологических и отражают не реальный физический механизм их формирования и функциони-

рования, а лишь наиболее важные их свойства для рассматриваемых задач. В последнее время отмечается интенсивное развитие метода переменных состояния в направлении обобщения на новые области применения. Однако использование данного метода при изучении ОО техногенного и природного характера пока остается ограниченным и явно не отвечает его широким возможностям для конструктивного развития современной теории предупреждения ЧС. В особенности это касается разработки системных моделей различных типов реальных ОО техногенного и природного характера.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является разработка системных моделей для класса ОО техногенного и природного характера на основе метода переменных состояния.

Описание любого физического объекта неизбежно связано с его некоторой идеализацией, отражением лишь наиболее существенных его свойств, определением модели подобия реальному объекту. Однако для большинства ОО внутренние процессы и процессы взаимодействия их со средой в реальных условиях оказываются достаточно сложными и многообразными. Учесть каждое из них в отдельности не представляется возможным.

В силу естественного взаимодействия реальных ОО со средой представляется возможным условно выделить их из общей среды и рассматривать их взаимодействие с оставшейся частью среды в виде множества возможных входных $\{x(t,r)\} \in X$ и выходных $\{y(t,r)\} \in Y$ воздействий. Совокупность рассматриваемых величин (t,r) в общем случае характеризует зависимость (например, от времени и пространства) соответствующих воздействий. При этом соответствующие типы ОО могут рассматриваться в виде некоторых эквивалентных информационных систем, взаимодействующих со средой путем преобразования (передачи) входных воздействий $\{x(t,r)\} \in X$ в выходные $\{y(t,r)\} \in Y$, и описываться в общем случае некоторым оператором S , зависящим от свойств объекта,

$$y(t,r) = S[x(t,r)], (t,r) \in TR. \quad (1)$$

Следует заметить, что если границы объекта в общей среде не определены изначально, то выделение его из среды может быть произвольным. В общем случае оператор S системы (1) может быть детерминированным или случайным. Для некоторых типов

объектов оператор S может зависеть дополнительно от параметров $\theta(t, r)$, которые в общем случае могут зависеть также и от параметров (t, r) . Для таких типов ОО оператор S является параметрическим и

$$y(t, r) = S[x(t, r), \theta(t, r)], \quad (t, r) \in TR. \quad (2)$$

Относительно параметров $\theta(t, r)$ в (2) возможны два случая: параметры - детерминированные, параметры - случайные. При отображении (2), описывающем модель ОО в виде системы «вход – выход» на основе использования традиционных интегральных преобразований, системная характеристика ОО определяется импульсной переходной характеристикой. Указанная характеристика отличается простотой и удобством идентификации модели по результатам реальных наблюдений, а также позволяет определять выходное воздействие в явном виде. Вследствие этого такие модели нашли наибольшее распространение [5,6].

Системные характеристики стохастических ОО следует рассматривать в виде некоторых случайных функций. Для них можно использовать различные модели. Особенно широкими возможностями обладают модели в форме стохастических дифференциальных уравнений. Модель ОО в виде (1) или (2) с учетом физической реализуемости можно представить соответствующей системой, описываемой семейством функционалов F_t

$$y(t, r) = F_t[x_{-\infty}^t(r)], \quad (t, r) \in TR, \quad (3)$$

где $x_{-\infty}^t(r)$ - отрезок входного воздействия на интервале $[-\infty, t]$ времени. При этом для ОО под входным воздействием $x_{-\infty}^t(r)$ в общем случае будем понимать совокупность воздействий $\{\gamma_{-\infty}^t(r), U_{-\infty}^t(r), w_{-\infty}^t(r)\}$, каждое из которых характеризует соответственно опасное воздействие, являющееся возможным источником критических и ЧС, управляющее воздействие, в случае, если ОО является управляемым (существует обратная связь с активным воздействием), и шумовое воздействие, учитывающее различные случайные факторы. В свою очередь опасное воздействие $\gamma_{-\infty}^t(r)$ может рассматриваться в виде некоторого агрегированного воздействия $\gamma_{-\infty}^t(r) = \gamma_{-\infty}^t(r, \mathcal{Q}_1(t_1), \mathcal{Q}_2(t_2), \dots, \mathcal{Q}_N(t_N))$, определяемого N из-

меняющимися во времени опасными воздействиями, например, скачкообразно. При этом величина i -го опасного воздействия \mathcal{G}_i и время его появления t_i для всех $i = \overline{1, N}$ являются неизвестными величинами.

Обозначение F_t в (3) указывает на возможную зависимость вида функционала или его параметров от времени. Оператор S , или семейство функционалов F_t , характеризуют так называемую модель ОО в виде системы «вход – выход». Такие системные модели описывают только связь между воздействиями на входе и выходе и не отображают внутренне состояние ОО. Однако в практике прогноза и предотвращения ЧС возникает несколько иная ситуация, когда входные воздействия либо неизвестны, либо могут быть известными, лишь на конечном интервале $[t_0, t]$ времени. В этом случае выходное воздействие зависит не только от заданного отрезка входного воздействия, но и состояния $z(t_0)$ ОО для момента времени t_0 , в котором заключены все сведения о прошлом объекта. Таким образом, состоянием ОО в момент времени t_0 будем называть набор сведений о его прошлом, который совместно с входными воздействиями, заданными на интервале времени $[t_0, t]$, необходим и достаточен для однозначного определения выходного воздействия. В этом случае системная модель ОО будет определяться в виде

$$y(t, r) = D_t[z(t_0, r), x_{t_0}^t(r)], \quad (4)$$

где D_t - некоторый функционал, зависящий от входных воздействий на интервале $[t_0, t]$, параметров r и состояния $z(t_0, r)$ ОО. При этом состояние системы, описывающей ОО, будет изменяться во времени и определяться уравнением перехода

$$z(t, r) = \Phi_t[z(t_0, r), x_{t_0}^t(r)], \quad (5)$$

где Φ_t - некоторый функционал, зависящий от входных воздействий на интервале $[t_0, t]$, параметров r и состояния $z(t_0, r)$ ОО. Соотношения (4) и (5), учитывая внутреннее состояние ОО, характеризуют модель ОО в виде соответствующей системы «вход - состоя-

ние - выход». Такую модель в дальнейшем будем называть системной моделью состояния ОО [2].

Пусть известны состояния в дискретные моменты времени t и $t + \Delta t$. Тогда для малого промежутка времени Δt справедливо записать, что

$$z(t + \Delta t, r) - z(t, r) = \lambda[z(t, r), x(t, r)]\Delta t + O(\Delta t), \quad (6)$$

где λ - соответствующая переходная функция. При условии $\Delta t \rightarrow 0$ выражение (6) переходит в дифференциальное уравнение

$$dz(t, r) / dt = \lambda[z(t, r), x(t, r)] \quad (7)$$

с начальным условием $z(t_0, r) = z_0$. Тогда уравнение наблюдения, аналогичное (4), определяющее выходное воздействие, запишется в виде

$$y(t, r) = \delta[z(t, r), x(t, r)]. \quad (8)$$

Соотношения (7) и (8) будут определять локальное представление системной модели состояния ОО в виде соответствующей динамической системы с непрерывным временем. Решение дифференциального уравнения (7)

$$z(t, r) = \Phi_t[z(t_0, r), x_{t_0}^t(r)] \quad (9)$$

и подстановка (9) в (8) будут определять выходное воздействие

$$y(t, r) = \delta[\Phi_t[z(t_0, r), x_{t_0}^t(r)], x(t, r)], \quad y(t, r) = D_t[z(t_0, r), x_{t_0}^t(r)] \quad (10)$$

и смысл функций Φ_t и D_t в (4) и (5) соответственно. Полученные соотношения (9) и (10) определяют глобальное представление системной модели состояния ОО в виде соответствующей динамической системы с непрерывным временем. На рис.1 приведена обобщенная структурная схема системной модели состояния ОО в виде динамической системы, определяемой уравнениями (7) и (8).

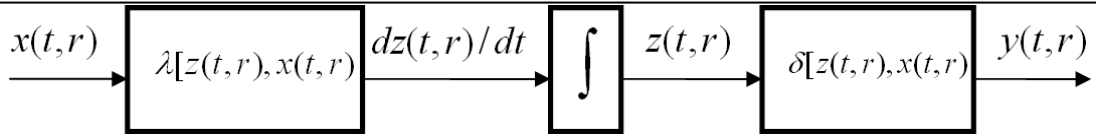


Рис. 1 – Обобщенная структурная схема системной модели состояния ОО

Использование понятия состояния позволило четко разделить влияние на выходное воздействие входного воздействия и внутреннего состояния ОО, играющего важную роль в решении задач мониторинга, прогноза и предотвращения возникновения возможных опасных и ЧС.

Уравнение системной модели (7) можно обобщить и на случай векторного воздействия среды $X(t,r)$ и векторного $Z(t,r)$ состояния

$$dZ(t,r) / dt = \lambda[Z(t,r), X(t,r)]. \quad (11)$$

Используя полиномиальную аппроксимацию для нелинейного преобразования $\lambda[Z(t,r), X(t,r)]$ в уравнении (11) можно получить приближенную линейную модель состояния системы, описывающую ОО, в виде

$$dZ(t,r) / dt = AZ(t,r) + BX(t,r), \quad (12)$$

где A и B - матрицы коэффициентов модели соответствующего размера, или приближенную билинейную модель состояния вида

$$dZ(t,r) / dt = AZ(t,r) + BX(t,r) + \sum_{i=1}^n x_i(t,r) B_i Z(t,r), \quad (13)$$

где $x_i(t,r)$, $i = \overline{1, n}$ - компоненты вектора входного воздействия и B_i - матрицы размера $n \times n$ с элементами b_{ijk} , $i, j, k = \overline{1, n}$. Модель (13) соответствует нелинейной динамической системе, описывающей ОО, например, с переменными или управляемыми параметрами. Кроме того уравнение (7) можно обобщить и на случай континуального множества компонент входного воздействия и состояния путем представления в (12) векторных величин функциями непрерывных переменных. Это позволяет рассматривать системные

модели состояния ОО в виде соответствующих моделей состояния систем с распределенными параметрами.

В качестве иллюстрации возможности применения описанных выше системных моделей состояния ОО для их анализа рассмотрим частный пример ОО, определяемого заданной частью среды, где может возникнуть опасная ситуация в виде горения. Под горением будем понимать сложный физико-химический процесс превращения горючих веществ и материалов в продукты горения, сопровождающийся выделением значительного тепла и света. Такой процесс способен привести к возникновению пожара, характеризуемого неконтролируемым процессом горения, наносящим материальный ущерб рассматриваемому ОО [7]. Процесс горения зависит от условий образования горючей смеси, теплообмена с окружающей средой, отвода продуктов сгорания и многих других факторов. Этим объясняется многообразие различных видов горения.

Однако пожары, как правило, характеризуются диффузионным турбулентным горением. Общей чертой всех видов горения является высокий экзотермический уровень химических превращений, приводящий к самопроизвольному воспламенению. Тепловая теория самовоспламенения (называемая также теорией теплового взрыва) основана на сопоставлении скоростей процессов тепловыделения при экзотермическом окислении и отвода тепла от реагирующей смеси в окружающее пространство. Условие самовоспламенения определяется равенством этих скоростей. Температуру, при которой достигается это равенство, принято называть температурой самовоспламенения. Начиная с этой температуры (характерной в каждом случае для конкретных условий, поскольку отвод тепла зависит от размера и формы объекта, теплофизических свойств газа) происходит самопроизвольный разогрев, который может привести к самовоспламенению. В рассматриваемом примере ОО процесс самостоятельного разогрева можно описать уравнением динамики для средней температуры $T(t)$ с учетом заданного объема и площади поверхности объекта, а также характеристик опасного внутреннего источника тепла в виде

$$\tau dT(t) / dt + T(t) = T_H + T_{CP}, T(0) = T_0 \quad (14)$$

где τ - постоянная времени процесса с учетом теплоотдачи, плотности газа и теплоемкости, а также объема и площади поверхно-

сти объекта; T_H - температура опасного источника тепла с учетом его тепловой производительности, теплоотдачи и площади поверхности объекта; T_{CP} - значение температуры источника тепла в отсутствие опасной ситуации; T_0 - начальное значение температуры в нулевой момент времени.

Пусть выполняется условие, что $T(0) = T_0 = T_{CP}$. Тогда в качестве возможного состояния $Z(t,r)$ объекта, следуя (7), можно рассматривать его внутреннюю среднеобъемную температуру $T(t)$, определяемую (14). Полагая, что входное воздействие $x(t,r)$ в (7) определяется единственным опасным воздействием $\mathcal{Q}_1(t_1)$ в виде температуры T_H опасного источника тепла, системную модель состояния объекта в виде соответствующей динамической системы можно представить с учетом (14) в виде следующего уравнения состояния

$$dT(t) / dt = f[T_H + T_{CP} - T(t)], \quad (15)$$

где f - величина, обратная величине τ , характеризующая спектральные свойства процесса, описывающего динамику средней температуры внутри объекта. Тогда уравнение (8), определяющее выходное воздействие объекта, запишется в виде

$$y(t) = T(t). \quad (16)$$

Структурная схема системной модели состояния рассматриваемого ОО с учетом (15) и (16) может быть представлена в виде, изображенном на рис.2.

В случае, когда на объект возможно воздействие в виде активного отвода тепла (например, при использовании подсистемы тушения), то его системная модель состояния будет описываться, согласно (15), уравнением

$$dTU(t) / dt = f[T_H + T_{CP} - TU(t) - U(t)], \quad (17)$$

где $U(t)$ - активное воздействие в виде эффективной температуры

$U(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_U \\ U_0, & t > t_U \end{cases}$ с учетом тепловой производительности подсистемы отвода тепла, теплоотдачи и площади поверхности объекта,

Системные модели состояния опасных объектов техногенного и природного характера

которая отводится от опасного источника тепла. Здесь время t_U определяет момент начала активного воздействия на объект (при условии превышения температурой $TU(t)$ допустимого уровня Tt). В этом случае с учетом (17) структурная схема системной модели состояния рассматриваемого объекта с учетом активного воздействия может быть представлена в виде, изображенном на рис.3.

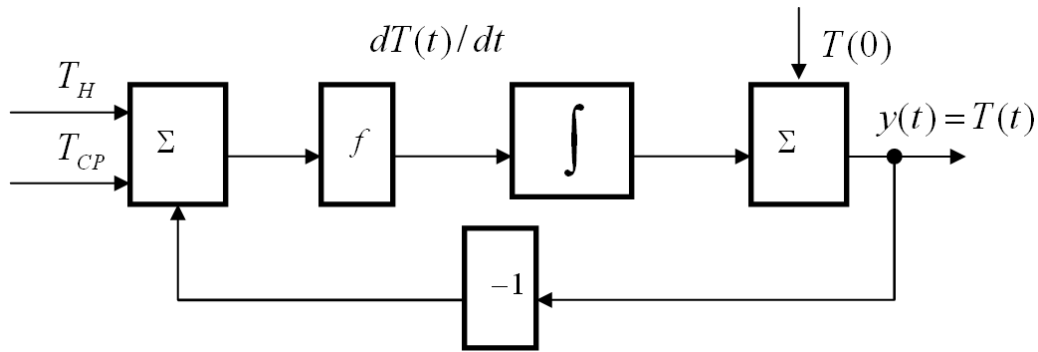


Рис. 2 – Структурная схема системной модели состояния ОО

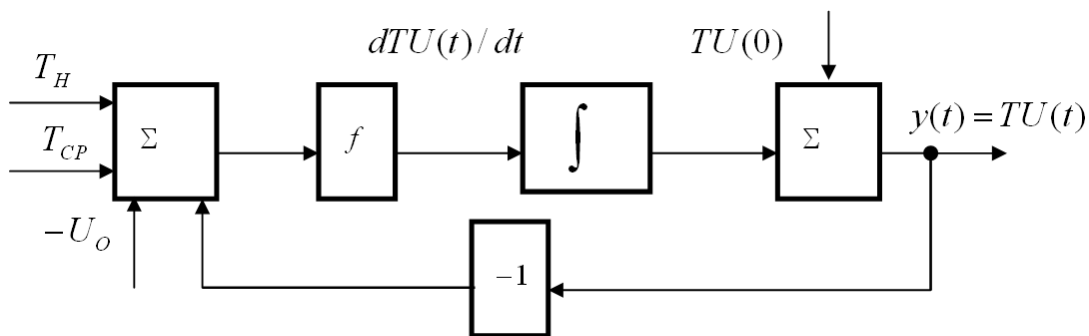


Рис. 3 – Структурная схема системной модели состояния ОО с активным отводом тепла

В качестве иллюстрации на рис. 4 представлены результаты анализа для объектов с учетом уравнений состояния (15) и (17) при воздействии опасного источника тепла, характеризуемого температурой $\mathcal{A}(t=0) = T_H = 1200$ К. При этом постоянная времени $\tau = 50$ с, а начальная температура $T(0) = TU(0) = T_{CP} = 300$ К. Допустимый уровень температуры для объекта определялся величиной $Tt = 1000$ К, а величина управляющего воздействия U_o составляла величину, равную 900 К.

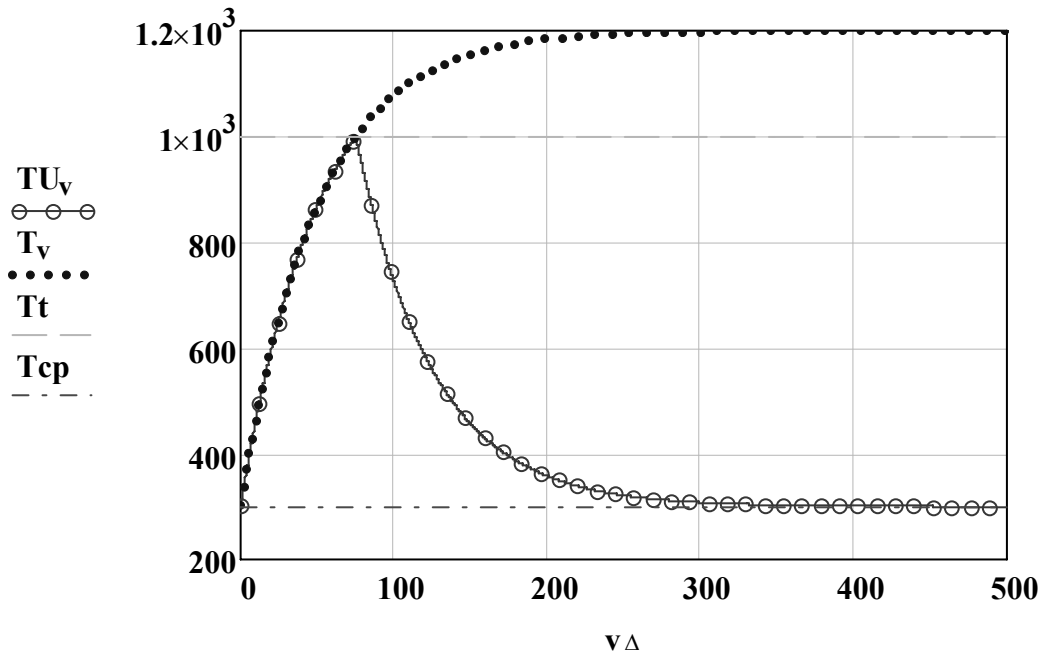


Рис. 4 – Динамика температуры для объектов, описываемых (15) и (17), при условии $Tt = 1000$ К

На рис.5 приведены аналогичные результаты для случая $Tt = 1198$ К. Обозначения T_v и TU_v на рис.4 и рис.5 соответствуют средним значениям температуры $T(v\Delta)$ и $TU(v\Delta)$ в фиксированные моменты времени, характеризующиеся $v = 1,10000$, где Δ - интервал дискретизации, равный $0,05$ с.

Из анализа представленных данных следует, что системные модели состояния (15) и (17) позволяют исследовать рассматриваемые типы ОО (без учета и с учетом активного воздействия) для широкого спектра параметров опасного источника тепла и подсистемы активного воздействия, связанного с отводом тепла, с учетом возможной неопределенности и случайности некоторых из параметров.

Так, например, из рассмотренного примера следует, что для сокращения времени активного воздействия для прекращения развития опасной ситуации на начальном этапе целесообразно использовать максимальную тепловую производительность активного воздействия. В частном случае использования в качестве активного воздействия распыленную воду [5] на начальном этапе целесообразно выбирать достаточно малый диаметр капель воды, обеспечивая при этом максимально возможную интенсивность

оросителя, с целью обеспечения максимальной тепловой производительности отвода тепла.

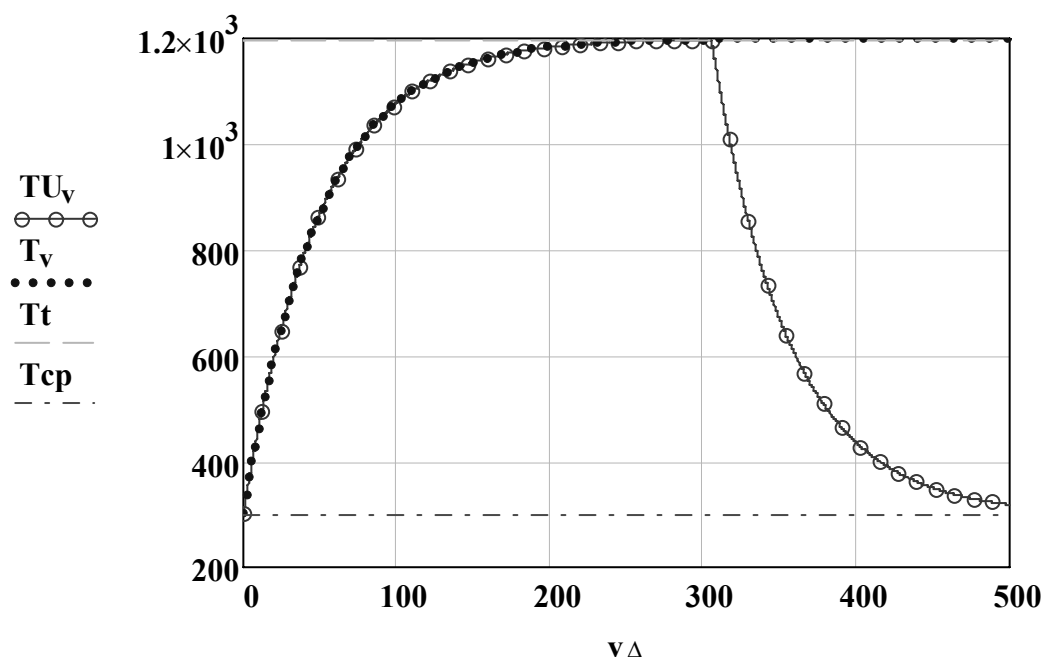


Рис. 5 – Динамика температуры для объектов, описываемых (15) и (17), при условии $Tt = 1198$ К

Рассмотренные частные модели позволяют в рамках данного примера исследовать объекты с различными опасными источниками тепла и их характеристиками, для произвольных размеров объекта и параметров среды, а также способов и систем активного воздействия с целью прекращения развития опасной ситуации в объекте.

Выводы. Таким образом, предложены системные модели состояния ОО техногенного и природного характера. В качестве иллюстрации рассмотрен частный пример ОО, в котором опасная ситуация связана с возможностью возникновения горения. Получены уравнения состояния и наблюдения для такого объекта, приведены структурные схемы соответствующих системных моделей состояния и результаты моделирования. Представленные данные лишь частично иллюстрируют потенциальные возможности системных моделей состояния ОО для решения широкого круга задач, а также их анализа с целью предотвращения возможного возникновения опасных ситуаций, которые могут стать причиной различных ЧС. При этом оказывается возможным оценить и эффективность применения мер по снижению последствий или не-

допущению ЧС, а также определить основные требования к подсистемам автоматического обнаружения и снижения последствий опасных ситуаций, учитывая различные типы наблюдаемых или ненаблюдаемых, управляемых или неуправляемых воздействий на ОО. Системные модели состояния ОО могут также занять важное место в решении общей проблемы обеспечения оптимальной безопасности с учетом их индивидуальных особенностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ван Трис. Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 1. Пер. с англ., под ред. проф. В.И. Тихонова. – М.: Советское радио, 1972. – 744 с.
2. Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем: Пер. с англ./Под ред. В.Н. Бусленко – М.:Мир,1974. – 644 с.
3. Калман Р., Флаб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем: Пер. с англ./Под ред. Я.З. Цыпкина – М.:Мир,1971. – 400 с.
4. Peschel M., Wunsch G. Methoden und Prinzipien der Systemtheorie. – Berlin:Vergal Tecknik, 1982. – 132 с.
5. Садковой В.П. Теоретические основы автоматического тушения пожаров класса В распыленной водой / В.П. Садковой, Ю.А. Абрамов. – Харьков: НУГЗУ, 2010. – 267 с.
6. Рыжов А.М. Моделирование пожаров в помещениях с учетом горения в условиях естественной конвекции / А.М. Рыжов // Физика горения и взрыва. - 1991. - Т. 27, № 3. - С. 40-47.
7. Кимстач И.Ф., Давлишев П.П., Евтюшкин Н.М. Пожарная тактика. — М.: Стройиздат, 1984. — 591 с.

Поспелов Б.Б., Шевченко Р.І., Колонов О.М.

Системні моделі стану небезпечних об'єктів техногенного та природного характеру

Запропоновано системні моделі для опису різних типів реальних небезпечних об'єктів природного та техногенного характеру в змінних стану

Ключові слова: системна модель, небезпечний об'єкт, змінні стану

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

System models of state dangerous objects natural and manmade disasters

Proposed system models to describe the various types of real dangerous objects of natural and manmade disasters in the state variables

Key words: systems model, dangerous object, the state variables