

*Б.Б. Поспелов, д.т.н., профессор, вед. научн. сотр., НУГЗУ,
В.А. Андронов, д.т.н., профессор, проректор, НУГЗУ*

АНАЛИЗ СЛУЧАЙНОЙ ДИНАМИКИ СРЕДНЕОБЪЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И РЕСУРСА ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Представлены результаты анализа динамики среднеобъемной температуры и ресурса пожара для случайных и неслучайных моделей скорости выгорания горючего материала в негерметичном помещении.

Ключевые слова: случайная среднеобъемная температура газовой среды, фазовый портрет, случайный ресурс пожара, случайные и неслучайные модели скорости выгорания горючего материала, негерметичное помещение.

Постановка проблемы. Последняя официальная статистика пожаров и наносимого ими ущерба свидетельствует о преобладании среди них пожаров в помещениях. Эффективность противопожарной защиты неразрывно связана с совершенствованием систем раннего обнаружения возгораний в помещениях. Важное место при этом отводится моделям пожара в помещении на его начальной стадии с учетом особенностей защищаемых объектов. Наиболее опасным фактором возгорания является температура газовой среды в помещениях. В настоящее время известно огромное число различных типов моделей динамики среднеобъемной температуры для различных стадий пожара в помещении. При этом в основе формирования эффективного комплекса противопожарных мероприятий на любом объекте лежат системные исследования процессов возникновения и развития загорания с учетом многообразия реальных условий. Отличительной чертой современных реальных условий возникновения возгораний являются их неопределенность и случайный характер, которые зависят от множества внешних и внутренних факторов. Неопределенность и случайный характер может существенно влиять на динамику загораний в помещениях, имеющих нелинейную природу. Это порождает проблему системного анализа загораний с учетом случайных факторов их возникновения и развития с целью принятия эффективных и адекватных решений по противопожарной защите различных помещений и объектов.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализу динамики среднеобъемной температуры в помещениях на начальной стадии пожара посвящено достаточное число публикаций. Наиболее полный их перечень можно найти в списках литературы учебного пособия Ю.А. Кошмарова и монографии Ф.И. Шаровара. Однако для известных интегральных и зонных моделей, лежащих в основе такого анализа, как правило, постулируется стационарность условий горения. В частности, в [1] рассматривается интегральная модель динамики температуры в помещении на начальной стадии пожара в предположении, что удельная массовая скорость выгорания является постоянной величиной. При этом в [2] от-

мечается, что величина удельной массовой скорости выгорания, например, для дизельного топлива в течение первых 300с изменяется примерно вдвое. Отмечается, что результаты исследований, проводимых рядом авторов, свидетельствуют о нестационарном характере всех физико-химических процессов в начальной стадии пожара в помещении [2]. В последнее время актуальными становятся системные исследования пожаров [3-5]. Системный подход позволяет выявлять особые системные свойства сложных физических процессов, протекающих в помещениях при возникновении возгораний. Системной классификации моделей динамики среднеобъемной температуры газовой среды в помещении посвящена работа [6]. В ней впервые предложено в качестве интегральной системной функции очага загорания в помещении рассматривать ресурс пожара. Для известных моделей ресурс пожара является неслучайной функцией времени и температуры. При этом реальные очаги загорания представляют собой нестационарные и случайные «генераторы» большого количества тепла. Однако в указанных выше работах отсутствует анализ динамики среднеобъемной температуры и ресурса пожара в помещении с учетом случайных факторов процесса возгорания. Поэтому представляется актуальным анализ случайной динамики среднеобъемной температуры и ресурса пожара в помещениях различного типа.

Постановка задачи и ее решение. Целью настоящей работы является анализ динамики среднеобъемной температуры и ресурса пожара в помещении с учетом случайных условий возгорания.

Будем рассматривать возгорание в негерметичном помещении с малой проемностью, для которого процесс газообмена на ранней стадии пожара осуществляется преимущественно в одном направлении. Поступление воздуха в помещение из окружающей среды на этой стадии развития пожара отсутствует [3], а среднее значение давления газовой среды является неизменным и приближенно равным давлению наружного воздуха.

В начальной стадии развитие пожара в помещении может рассматриваться в виде некоторой термодинамической системы, границы которой определяются внутренней поверхностью помещения, а ее системные параметры характеризуются соответствующими среднеобъемными параметрами. При этом среднеобъемные параметры пожара (температура, плотность и суммарная масса газа) в помещении являются функциями времени t . В реальных условиях объем помещения $V = \text{const}$. В процессе возгорания расход массы газа, покидающего помещение через проемы и щели в момент времени t , определяется величиной $G(t)$. При этом твердые и жидкие горючие материалы переходят в газообразное состояние. Будем полагать, что массовая скорость выгорания горючего материала в момент времени t определяется $\Psi(t)$. Тогда уравнение материального баланса для начальной стадии пожара в негерметичном помещении запишется в виде

$$d\rho_m/dt = \Psi(t)/V - G(t)/V, \quad (1)$$

$\rho_m(t)$ – среднеобъемная плотность газовой среды в помещении в момент

времени t . Аналогичные по форме уравнения материального баланса справедливы для кислорода, продуктов горения и оптического количества дыма в начальной стадии пожара [3]. В силу независимости этих уравнений, их решение и анализ может производиться раздельно при условии, что известны $\Psi(t)$ и $G(t)$.

В практике противопожарной защиты чаще вместо среднеобъемной плотности газовой среды в помещении используется ее среднеобъемная температура. С учетом (1) уравнение энергии пожара в помещении на начальной его стадии для текущего времени t будет определяться в виде

$$\Psi(t)Q_p\eta - c_p T_m(t)G(t) - Q_w(t) = 0, \quad (2)$$

где Q_p – теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; η – коэффициент полноты сгорания горючего материала ($0 < \eta \leq 1$); c_p – теплоемкость газовой среды в помещении, Дж/(кг К); $T_m(t)$ – среднеобъемная температура газовой среды в помещении; $Q_w(t)$ – тепловой поток в ограждающие конструкции и излучаемый через проемы и щели, Дж/с (Вт). Следуя (2), базовая системная модель динамики среднеобъемной температуры газовой среды в помещении на начальной стадии возгорания будет определяться уравнением

$$dT_m/dt = [\Psi(t)Q_p\eta - Q_w(t)]T_m(t)/Vc_p T_0\rho_0 - \Psi(t)T_m^2(t)/VT_0\rho_0, \quad (3)$$

где T_0, ρ_0 – температура и плотность газовой среды до начала возгорания.

В реальных условиях массовая скорость выгорания горючего материала $\Psi(t)$ является функцией времени и зависит от множества факторов Ψ_n , которые являются случайными. Тепловой поток $Q_w(t)$, поглощаемый ограждающими конструкциями и излучаемый через проемы и щели, в реальных условиях является функцией времени, текущего значения среднеобъемной температуры T_m газовой среды в помещении и ряда Q_n случайных факторов. Преобразуем (3) и представим его в виде

$$dT_m/dt = r\{T_m, \Psi_n, Q_n, t\}T_m(t) - b\{\Psi_n, t\}T_m^2(t). \quad (4)$$

В (4) функции $r\{T_m, \Psi_n, Q_n, t\} = [\Psi(\Psi_n, t)Q_p\eta - Q_w(T_m, Q_n, t)]/Vc_p T_0\rho_0$ и $b\{\Psi_n, t\} = \Psi(\Psi_n, t)/VT_0\rho_0$ характеризуют стохастические системные свойства очага загорания. При этом (4) описывает класс стохастических автономных систем, для которых случайная динамика среднеобъемной температуры газовой среды в начальной стадии пожара управляется самой среднеобъемной температурой. Качественная оценка стохастической динамики среднеобъемной температуры пожара, следуя (9), может быть произведена на основе анализа фазовых портретов [5]. Системная функция $b\{\Psi_n, t\} = \Psi(\Psi_n, t)/VT_0\rho_0$ характеризует стохастические свойства горючего материала в виде массо-

вой производительности выгорания, приходящейся на единицу среднеобъемной температуры газовой среды при пожаре. Вместо рассмотренных стохастических системных функций будем рассматривать некоторую интегральную стохастическую системную функцию в виде случайного ресурса очага возгорания (пожара) в помещении, определяемую

$$RES\{T_m, \Psi_n, Q_n, t\} = r\{T_m, \Psi_n, Q_n, t\} / b\{\Psi_n, t\} \text{ или}$$

$$RES\{T_m, \Psi_n, Q_n, t\} = b\{\Psi_n, t\} Q_p \eta / c_p - Q_w(T_m, Q_n, t) / c_p \Psi(\Psi_n, t).$$

Случайный *ресурс пожара* определяет величину той случайной 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 с учетом случайных параметров. В общем случае ресурс $RES\{*\}$ характеризует потенциальные возможности воздействия очага возгорания на температуру газовой среды помещения и определяет особую точку случайной динамики среднеобъемной температуры газовой среды на фазовой траектории в виде аттрактора.

С точки зрения обнаружения загорания представляет практический интерес начальная его фаза после задымления, когда отвод тепла осуществляется преимущественно ограждением помещения. На рис. 1 в качестве примера представлены реализации среднеобъемной температуры в помещении объемом 500 м^3 с ограждающими конструкциями из кирпича и бетона в интервале температур от 290^0К до 330^0К для различных случайных моделей скорости выгорания горючего материала. Рассматривались модели случайного кругового (R) и линейного (L) распространения пожара по поверхности твердых горючих материалов и модель случайного нестационарного (N) выгорания горючих жидкостей. Случайный характер скорости выгорания описывался гауссовой статистикой, среднее значение которой определялось удельной массовой скоростью выгорания для соответствующего горючего материала и заданной величиной среднего отклонения. На рис. 1 пунктирной линией показана минимальная температура срабатывания для извещателей класса А1. Представленные результаты соответствуют эквивалентной для рассматриваемых случайных моделей выгорания величине теплоты сгорания горючего материала. Для сравнения на рис. 2 представлены реализации среднеобъемной температуры в случае отсутствия случайных отклонений в моделях скорости выгорания [3].

Из анализа представленных зависимостей следует, что учет случайных флуктуаций удельной массовой скорости выгорания в большей степени проявляется для круговой модели распространения пожара по поверхности твердых горючих материалов. При этом флуктуации удельной массовой скорости выгорания приводят к возрастанию быстроты действия процесса нарастания среднеобъемной температуры в помещении на ранней стадии развития пожара. Этот эффект может использо-

ваться для раннего обнаружения пожара по температуре в тепловых пожарных извещателях максимального типа.

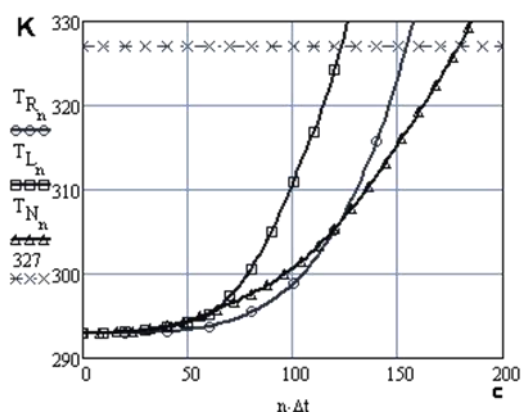


Рис. 1. Динамика температуры для случайных моделей скорости выгорания

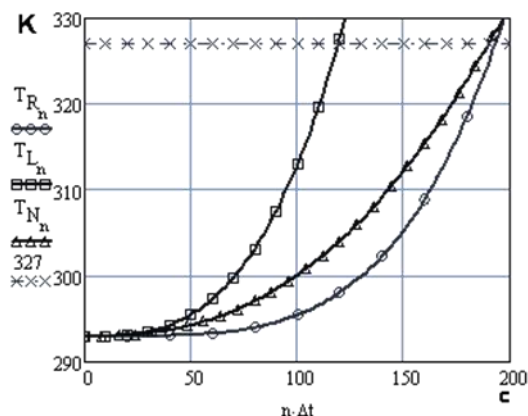


Рис. 2. Динамика температуры для неслучайных моделей скорости выгорания

В связи с использованием для раннего обнаружения пожаров тепловых пожарных извещателей дифференциального типа представлялось интересным исследовать влияние случайной скорости выгорания на скорость изменения среднеобъемной температуры в помещении. На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты такого исследования для случайных и неслучайных моделей выгорания соответственно.

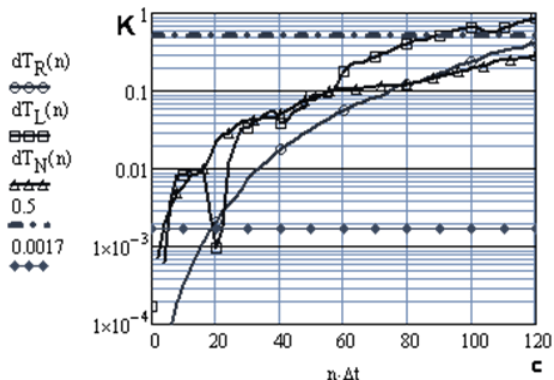


Рис. 3. Скорость изменения температуры для случайных моделей выгорания

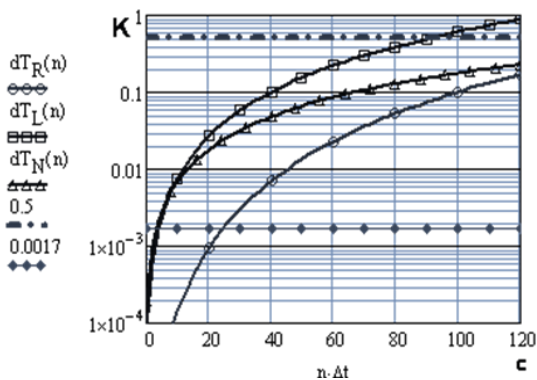


Рис. 4. Скорость изменения температуры для неслучайных моделей выгорания

На указанных рисунках пунктирной и штриховой линией обозначены минимальная и максимальная нормируемая скорость возрастания температуры для пожарных тепловых извещателей. Представленные на рис. 3 и рис. 4 данные свидетельствуют о преимуществах применения тепловых пожарных извещателей дифференциального типа для раннего обнаружения загорания. Однако их использование для раннего обнаружения нестационарного загорания горючих жидкостей ограничивается наличием значительных случайных колебаний скорости изменения температуры на начальном этапе развития пожара. Для случайных моделей выгорания твер-

дых материалов обнаружение загораний тепловыми пожарными извещателями дифференциального типа сопровождается мешающими флуктуациями, которые затрудняют их эффективное обнаружение. Для подтверждения этого факта на рис. 5 представлена зависимость скорости изменения температуры в экспериментальной камере при поджоге и сгорании древесины. На рис. 6 приведен фазовый портрет для температуры, соответствующей данному экспериментальному очагу загорания.

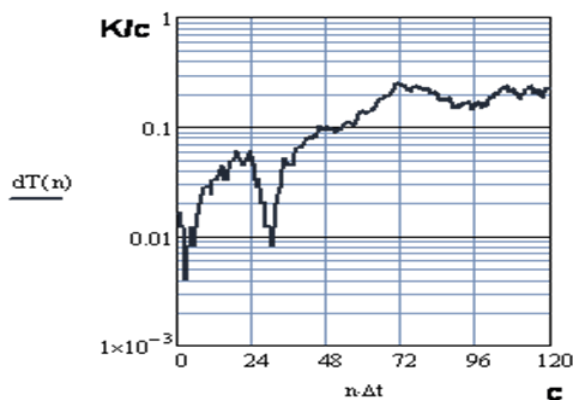


Рис. 5. Скорость изменения температуры при сгорании реальной древесины

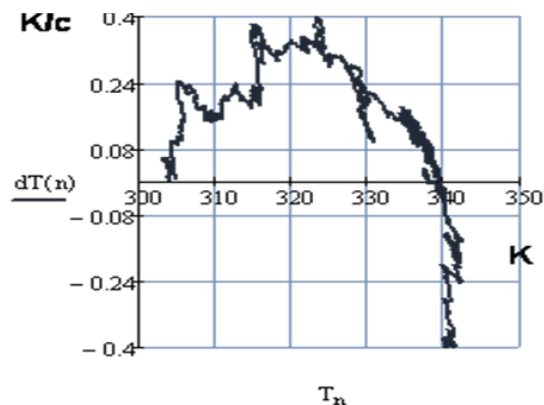


Рис. 6. Фазовый портрет для температуры среды при сгорании реальной древесины

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что реальные очаги загорания в помещениях носят стохастический характер и обладают рядом специфических особенностей, на основе которых они могут быть обнаружены на ранних стадиях загорания горючих материалов и жидкостей в помещениях. Из анализа данных на рис. 6 следует, что для экспериментального очага системный параметр в виде ресурса пожара $RES\{*\}$ характеризует устойчивое состояние пожара (аттрактор), определяемое точкой 340°K . При этом максимальная скорость изменения температуры газовой среды для рассматриваемого очага возгорания в камере составляет 320°K [7].

С целью изучения влияния случайного характера выгорания на потенциальные возможности воздействия очага возгорания в помещении на температуру газовой среды исследовалась динамика ресурса $RES\{*\}$ пожара. На рис. 7 и рис. 8 приведены соответствующие характерные реализации динамики ресурса пожара для рассмотренных случайных и неслучайных моделей выгорания горючего материала.

Из анализа представленных на рис. 7 и рис. 8 данных следует, что для случайной и неслучайной модели скорости выгорания материала $RES\{*\}$ является функцией времени. При этом тенденции динамики ресурса пожара для случайной и неслучайной модели оказываются схожими, но для случайной модели имеют место значительные отличия. Например, в величине максимального значения ресурса, времени его возможной локализации и характере динамики. Для случайной R-модели ресурс пожара может оказаться выше ресурса случайной L-модели. Пренебрежение этими фактами, например, при эвакуации личного состава из помещения может привести к ошибочным решениям на практике.

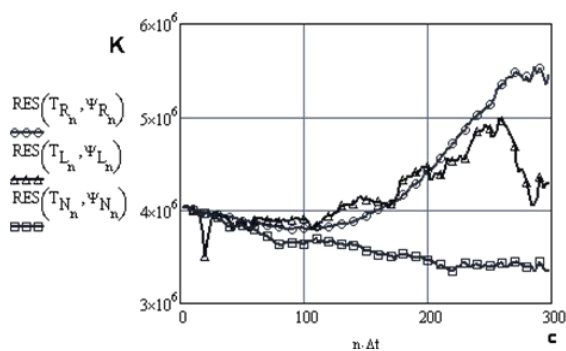


Рис. 7. Динамика ресурса пожара для случайных моделей выгорания

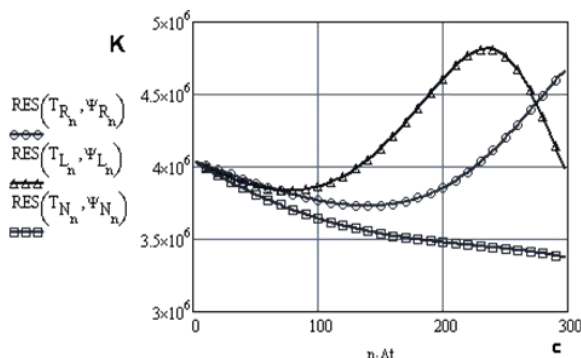


Рис. 8. Динамика ресурса пожара для неслучайных моделей выгорания

Для выявления особых системных состояний пожара в помещении исследовались фазовые портреты для ресурса очага загорания. Результаты этих исследований для рассматриваемых моделей случайных и неслучайных выгораний представлены соответственно на рис. 9 – рис. 14.

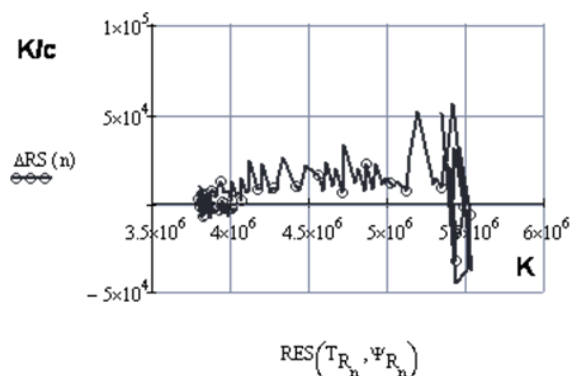


Рис. 9. Случайная R-модель выгорания

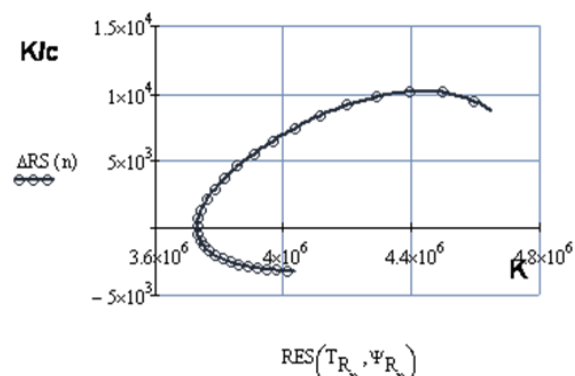


Рис. 10. Неслучайная R-модель выгорания

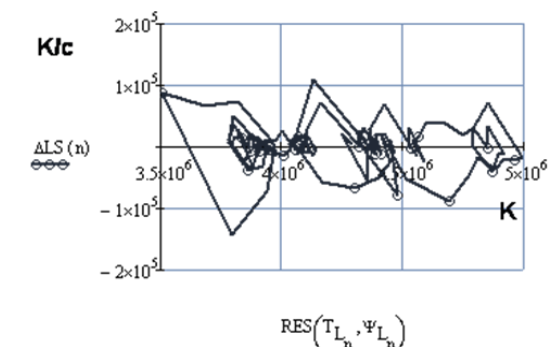


Рис. 11. Случайная L-модель выгорания

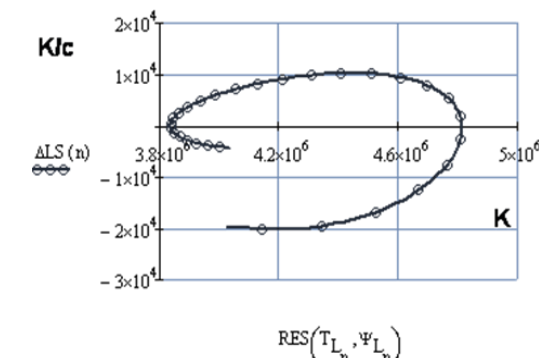


Рис. 12. Неслучайная L-модель выгорания

Анализ фазовой траектории, представленной на рис. 9, свидетельствует о наличии двух особых точек ресурса пожара – неустойчивой в начале фазовой траектории и устойчивой в конце. Устойчивое состояние характеризуется циклическим изменением ресурса. При этом начальный ресурс определяется фиксированными параметрами пожара и фиксированной удельной скоростью выгорания, соответствующей

материалу Изолан-2. Устойчивые состояния температуры газовой среды в помещении (аттракторы), определяемые величиной $RES\{*\}$, имеют различный характер динамики для случайной (рис. 9) и неслучайной (рис. 10) модели очага загорания, а также зависят от конкретного вида модели распространения загорания, например, приведенные на рис. 11 и рис. 12 для L-модели.

Из анализа представленных выше данных следует, что для неслучайных моделей скорости выгорания горючего материала отмечается регулярный характер динамики ресурса пожара. Это означает, что потенциально достижимая среднеобъемная температура в помещении по мере развития пожара не остается фиксированной, а меняется в зависимости от самой температуры – имеет место саморегулирование в рассматриваемой автономной термодинамической системе. В этом случае в динамике ресурса пожара отсутствуют циклы и случайные колебания, характерные для случайных моделей скорости выгорания (рис. 9 и рис. 10). Поэтому учет фактора случайности только в скорости выгорания материала (рис. 5 и рис. 6) позволяет приблизить известные модели к реальным условиям развития пожара и более адекватно прогнозировать пожарную обстановку.

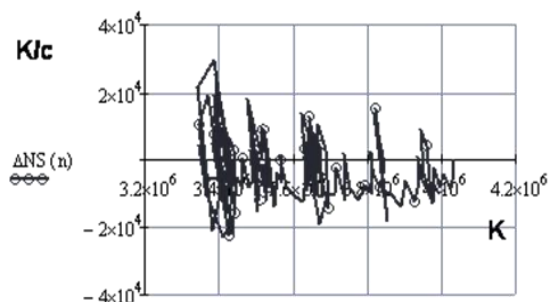
Из анализа представленных выше данных следует, что для неслучайных моделей скорости выгорания горючего материала отмечается регулярный характер динамики ресурса пожара. Это означает, что потенциально достижимая среднеобъемная температура в помещении по мере развития пожара не остается фиксированной, а меняется в зависимости от самой температуры – имеет место саморегулирование в рассматриваемой автономной термодинамической системе. В этом случае в динамике ресурса пожара отсутствуют циклы и случайные колебания, характерные для случайных моделей скорости выгорания (рис. 9 и рис. 10). Поэтому учет фактора случайности только в скорости выгорания материала (рис. 5 и рис. 6) уже позволяет приблизить известные модели к реальным условиям развития пожара и более адекватно прогнозировать пожарную обстановку.

В качестве примера для сравнения на рис. 13 и рис. 14 представлены фазовые траектории ресурса пожара в случае случайной нестационарной модели скорости выгорания горючей жидкости в помещении.

Для неслучайной L-модели (рис. 14) динамика ресурса пожара также является регулярной. При этом для случайной L-модели (рис. 13) характерна стохастическая и циклическая динамика ресурса пожара, характеризующаяся наличием большего числа циклических неустойчивых локальных состояний температуры.

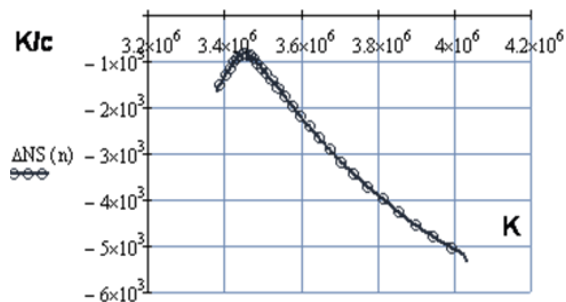
Использование различных классов стохастических моделей развития пожара позволит более глубоко и предметно изучить динамические свойства пожара как объекта регулирования и оптимизировать управляющие воздействия по недопущению развития и локализации пожаров в негерметичных помещениях различного типа. В общем случае могут учитываться случайные параметры, характерные для

пожарной нагрузки очага загорания, системы искусственного и естественного отвода тепла, выгорания горючего материала и других компонентов пожара.



$$RES(T_{N_n}, \Psi_{N_n})$$

Рис. 13. Случайная N-модель выгорания



$$RES(T_{N_n}, \Psi_{N_n})$$

Рис. 14. Неслучайная N-модель выгорания

В общем случае учет случайных факторов развития пожара приводит к существенному искажению устойчивой динамики среднеобъемной температуры газовой среды в помещении.

Выводы. Проведен анализ динамики среднеобъемной температуры и ресурса пожара в помещении с учетом случайных условий возгорания. В качестве случайных рассматривались модели случайного кругового (R) и линейного (L) распространения пожара по поверхности твердых горючих материалов и модель случайного нестационарного (N) выгорания горючих жидкостей. Случайный характер скорости выгорания описывался гауссовой статистикой, среднее значение которой определялось удельной массовой скоростью выгорания для соответствующего горючего материала и заданной величиной среднего отклонения. Показано, что для случайных моделей скорости выгорания динамика среднеобъемной температуры и ресурса пожара в помещении оказываются различными. Динамика ресурса пожара является случайной, имеющей локальные области значений температур, в которых ресурс проявляет циклические свойства.

Авторы статьи убеждены в том, что новый этап развития пожарной науки и практики должен базироваться на использовании статистической теории систем. Использование стохастических моделей развития пожара позволяет перейти от преобладающей эпохи детерминизма в современной пожарной науке к более глубокому и предметному изучению адекватных случайных системных свойств реальных пожаров как объекта регулирования и оптимизировать при этом эффективные управляющие воздействия по их локализации и прекращению в негерметичных помещениях различного типа. В этой связи данную статью следует рассматривать в качестве фрагментной иллюстрации использования статистического подхода и возможности получения на его основе новых системных сведений о состоянии возгораний в негерметичных помещениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. – М.: АГПС МВД России, 2000. – 118 с.
2. Башкирцев М.П. Исследование температурного режима при горении жидкостей в помещении: Дисс. канд. техн. наук. – М.: МИСИ им. В. Куйбышева, 1967. – 226 с.
3. Моторыгин Ю.Д. Системный анализ моделей описания процессов возникновения и развития пожара: Дисс. докт. техн. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной Противопожарной Службы МЧС России, 2011. – 247 с.
4. Моторыгин Ю.Д. Математическое моделирование процессов возникновения и развития пожаров: Монография / Под общей редакцией В.С. Артамонова. – СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной Противопожарной Службы МЧС России, 2011. – 248 с.
5. Пospelов Б.Б. Системный анализ моделей возникновения пожара в негерметичном помещении / Б.Б. Пospelов, Р.И. Шевченко, А.Н. Коленов // Проблемы пожарной безопасности, Харьков, НУГЗУ, 2013. – Вып. 34. – С. 140-149.
6. Пospelов Б.Б. Системная классификация моделей динамики среднеобъемной температуры пожара в помещении / Б.Б. Пospelов, В.А. Андронов // Проблемы пожарной безопасности, Харьков, НУГЗУ, 2015. – Вып. 37. – С. 178-185.

Б.Б. Пospelов, В.А. Андронов

Аналіз випадкової динаміки середньої за об'ємом температури і ресурсу пожежі в приміщенні

Представлені результати аналізу динаміки середньої за об'ємом температури і ресурсу пожежі для випадкових і не випадкових моделей швидкості вигорання горючого матеріалу в негерметичному приміщенні.

Ключові слова: випадкова середня за об'ємом температура газового середовища, фазовий портрет, випадковий ресурс пожежі, випадкові і не випадкові моделі швидкості вигорання горючого матеріалу, негерметичні приміщення.

B.B. Pospelov, V.A. Andronov

Analysis of dynamic averaged over the volume of random temperature and fire resource in the room

The results of the analysis of the dynamics of the resource and the mean bulk temperature of the fire for random and non-random models burn-up rate of combustible material in the unpressurized room.

Keywords: random mean bulk temperature of the gaseous medium, the phase portrait, casual resource of fire, random and non-random pattern rate of burning combustible material leaking room.