

УДК 614.8

*Б.Б. Поспелов, д.т.н., профессор, ведущ. научн. сотр., НУГЗУ,
Е.А. Рыбка, д.т.н., ст. исследователь, нач. отдела, НУГЗУ,
Р.Г. Мелещенко, к.т.н., доцент, доцент каф., НУГЗУ,
П.Ю. Бородич, к.т.н., доцент, доцент каф., НУГЗУ,
М.А. Самойлов, адъюнкт, НУГЗУ*

МЕТОД РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИЯХ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ РАЗМЕРНОСТИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

(представлено д.т.н. Абрамовым Ю.А.)

Разработан метод раннего обнаружения пожаров в помещениях на основе анализа текущей динамики корреляционной размерности состояний газовой среды и сравнения ее с порогом.

Ключевые слова: раннее обнаружение пожаров, корреляционная размерность, состояние газовой среды помещения.

Постановка проблемы. Известно, что согласно Классификатору [1] пожары на объектах являются источниками различных чрезвычайных ситуаций (ЧС). Пожары на объектах представляют экологическую опасность для окружающей среды и, прежде всего, для человека, поскольку приводят к его гибели. В особой степени это касается пожаров в помещениях объектов, где обычно сосредотачивается большая часть обслуживающего персонала. К опасным факторам пожаров в помещениях обычно относят токсичные продукты горения, открытое пламя, повышенную температуру, дым и снижение концентрации кислорода. Пожарная нагрузка большинства помещений современных объектов характеризуется обилием различных типов синтетических материалов, являющихся основными источниками опасных факторов горения. Общая статистика смертности людей на пожарах свидетельствует о том, что более 80% погибших приходится на пожары в помещениях. Одним из эффективных направлений снижения гибели людей на пожарах является раннее выявление возгораний материалов в помещениях с последующим их прекращением. Однако раннее выявление возгораний материалов в помещениях на современном этапе затрудняется достаточной сложностью и малой изученностью процессов, протекающих в газовой среде помещений в начале возгораний. В силу особой опасности пожаров для человека, актуальной проблемой является разработка методов раннего их обнаружения в помещениях объектов.

Анализ последних исследований и публикаций. Известно, что реальная газовая среда помещений при возгорании материалов представляет собой сложную динамическую систему, состояние которой описывается хаотической динамикой. В последнее время для анализа сложных динамических систем активно развиваются методы теории нелинейных динамических систем [2]. При пожаре состояние газовой среды в помещении описывается известной системой дифференциальных уравнений. Для сложной системы, требуется для описания увеличивать число таких уравнений. Од-

нако в природе существуют системы, описываемые малым числом уравнений. Известным примером является система Лоренца, описывающая процесс конвекции. Данная система описывается всего тремя уравнениями, но ее динамика демонстрирует элементы хаоса (т.н. «детерминированный хаос»). В связи с этим по динамике системы достаточно трудно определить, к какому классу принадлежит данная система. В последнее время для исследования динамики временных последовательностей разработаны и успешно применяются различные методы спектрального анализа, анализа тренда, цепей Маркова, wavelet анализа и т.д. В теории динамических систем появились методы, позволяющие по отдельным наблюдениям одного из параметров восстанавливать свойства всей системы. В частности, например, анализу наблюдений в геофизике посвящено немало работ, в том числе с позиции теории динамических систем и фрактальных множеств [3].

Экспериментальному изучению процесса возникновения пожара в помещениях посвящена работа [4]. Результаты анализа влияния теплового потока на скорость высвобождения тепла в лиственнице представлены в [5], а экспериментальное исследование режимов горения различных типов материалов с учетом внешнего теплового воздействия, выполнено в работе [6]. Экспериментальному исследованию скорости тепловыделения для различной пожарной нагрузки при пожаре в помещениях посвящена работа [7]. В указанных работах [4–7] отмечается, что процессы образования опасных факторов пожара и их влияние на начальном этапе на состояние газовой среды в помещениях носят сложный и нестационарный характер. Повышению эффективности измерения температурного показателя газовой среды при возгораниях в помещениях посвящены работы [8, 9]. В работе [8] предлагается метод повышения точности измерения температуры на основе оптимизации параметров используемого теплового пожарного сенсора. При этом оптимизация параметров сенсора осуществляется по усредненным статистическим характеристикам газовой среды. Метод раннего обнаружения пожара на основе увеличения быстродействия используемых максимальных пожарных сенсоров предложен в [9]. При этом особенности реальной динамики температуры газовой среды на раннем этапе возникновения пожара в помещениях не учитываются. Решению проблемы раннего обнаружения возгораний материалов в помещениях на основе использования самонастраивающихся по возгораниям сенсоров посвящена работа [10]. При этом результаты исследования ограничиваются рассмотрением только усредненных характеристик газовой среды, а в работе [11] – анализом динамики самонастройки порога и вероятности обнаружения возгораний для этих условий. При этом изучение газовой среды как сложной динамической системы образования и взаимодействия опасных факторов на ранних этапах возгорания материалов и методов их раннего обнаружения не рассматриваются. В одной из первых работ [12], посвященных изучению новых особенностей динамики состояний реальной газовой среды на ранних этапах возникновения пожара, исследуются временные автокорреляции и парные корреляций состояния различных опасных факторов газовой среды. Другие параметры и характеристики опасных факторов газовой среды, как сложной динамической

системы, например, корреляционная размерность, которая характеризует степень сложности процессов, не изучаются и не исследуются.

Для раннего обнаружения пожара в помещениях более важными являются текущие параметры динамики взаимодействия опасных факторов в газовой среде, а не их интегральные значения. Методы обработки текущих данных, пригодные для обнаружения опасных факторов в газовой среде при пожаре, содержатся в [13]. Однако указанные методы основываются на стационарном подходе, который позволяет определять лишь средние распределения энергии опасных факторов по лагам и частотам. При этом особенности частотно-временной структуры опасных факторов газовой среды не учитываются, а корреляционная размерность не рассматривается.

Обзор современных методов временного и частотного анализа представлен в [14]. Отмечается, что проблема частотно-временной локализации остается не решенной, известные методы оказываются сложными и не пригодными для раннего обнаружения возгораний. В [15] рассматриваются методы временного анализа нестационарных процессов на основе преобразования Фурье к стационарным отрезкам реализаций. Однако процесс возгорания обычно характеризуется нестационарными отрезками реализации опасных факторов газовой среды. При этом газовая среда как сложная динамическая система образования и взаимодействия опасных факторов при возгораниях материалов не рассматривается.

Экспериментальное исследование динамики скорости горения в закрытых и вентилируемых помещениях представлено в [16]. Однако в данной работе не исследуются особенности структуры взаимодействия опасных факторов газовой среды при возгораниях. Экспериментальному исследованию применения флуктуаций параметров газовой среды в качестве признака для раннего обнаружения возгорания посвящена работа [17]. Приведенные результаты преимущественно ограничиваются анализом статистики флуктуаций основных параметров газовой среды. Исследование особенностей динамики корреляционной размерности опасных факторов газовой среды не рассматривается. При этом, следуя [12–17], исследования отдельных параметров опасных факторов для модельных возгораний, а также для реальных пожаров свидетельствуют о том, что раннее возгорание материалов является источником нарушения исходного равновесного состояния структуры газовой среды в помещениях. Формирование газовой среды при возгораниях в общем случае характеризуется более сложными нелинейными процессами образования и взаимодействия ее основных опасных факторов.

Общим методам частотно-временного представления и идентификации нелинейных систем на основе кратковременного преобразования Фурье посвящены работы [18] и [19] соответственно. Приложение методов кратковременного преобразования Фурье к анализу систем различной природы рассматривается в работе [20]. При этом известные методы [18–20] оказываются достаточно сложными для использования в приложениях и не могут рассматриваться в качестве конструктивных для раннего обнаружения пожаров в помещениях. В работе [21] рассматривается применение традиционного частотно-временного подхода к исследованию структуры

динамики опасных факторов газовой среды при возгораниях в помещениях. Отмечается общая сложность и низкая оперативность такого подхода. Описывается модифицированный метод частотно-временных представлений для флуктуаций опасных факторов газовой среды, отличающийся большей оперативностью. Однако данный метод является достаточно сложным, его эффективность существенно зависит от вида и параметров оконных функций, а также метод ограничивается рассмотрением энергетических представлений для опасных факторов газовой среды, которые не позволяют исследовать их тонкую структуру в фазовом пространстве.

Таким образом, из анализа литературных источников следует, что проблема раннего обнаружения пожаров в помещениях является важной и актуальной на современном этапе. В силу объективной сложности структурных особенностей образования и взаимодействия опасных факторов в газовой среде для их анализа используют различные методы частотно-временного представления, которые обладают рядом ограничений и низкой оперативностью. Это затрудняет их использование для раннего обнаружения пожаров в помещениях. В этой связи особо актуальными являются исследования, связанные с изучением динамики параметров состояния опасных факторов пожара на основе современных методов нелинейной динамики. Учитывая фрактальность структуры динамики опасных факторов газовой среды при возгорании материалов в помещениях, для раннего обнаружения пожаров требуется применение методов нелинейного анализа динамических систем в многомерном фазовом пространстве. Методы фрактального анализа, основанные на семействе размерностей Реньи, позволяют изучать свойства различных фрактальных сред и протекающих в них процессов [22]. Фрактальная размерность показывает как состояния исследуемой системы заполняют фазовое пространство. При этом способ заполнения системой фазового пространства состояний определяется теми силами, которые определили эти состояния. Существует множество способов вычисления размерности, но все они включают определение фрактальной формы и того, как она изменяется при ее увеличении. Наиболее конструктивной для раннего обнаружения пожаров в помещениях является корреляционная размерность. Поэтому важной и нерешенной частью рассматриваемой проблемы является разработка метода раннего обнаружения пожаров в помещениях объектов на основе корреляционной размерности состояний опасных факторов газовой среды при возгорании различных материалов.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является разработка метода раннего обнаружения пожаров в помещениях на основе динамики корреляционной размерности состояний опасных факторов газовой среды при возгораниях различных материалов.

Корреляционная (фрактальная) размерность (КР) в настоящее время широко используется для определения меры упорядоченности значений процессов или состояний и является нижней оценкой размерности Хаусдорфа для странного аттрактора. Предлагаемый метод раннего обнаружения пожаров в помещениях основывается на вычислении КР для вектора состояний $z(t)$ опасных факторов газовой среды, который определя-

ется оптической плотностью дыма, температурой среды и концентрацией угарного газа (СО), наблюдаемых в текущий момент времени t на заданном интервале времени, включает ряд последовательных этапов.

На первом этапе наблюдаемый вектор состояний $z(t)$ опасных факторов газовой среды на заданном интервале времени измеряется в дискретные моменты времени i . Пусть общее число дискретных измерений на интервале наблюдения составляет N значений. Это означает, что в соответствующем фазовом пространстве рассматривается множество векторов $\{z_i\}$, где $i=0, \dots, N$. Каждый вектор z_i отображается в фазовом пространстве соответствующей i точкой.

На втором этапе для каждой точки i вектора состояний z_i определяется вектор разности $x_i = z_i - z_{i+1}$ между текущим i и последующим $i+1$ дискретным состоянием опасных факторов газовой среды.

На третьем этапе по полученным значениям x_i в фазовом пространстве вычисляется расстояние $\|x_i - x_j\|$ между соответствующими парами точек i и j , используя евклидову, либо иную меру $\|\cdot\|$.

На четвертом этапе определяется корреляционная функция $C_3(r)$, вычисляемая для заданного множества N точек в соответствии с выражением

$$C_3(r) = N^2 [\text{число пар } (i, j), \text{ для которых расстояние } \|x_i - x_j\| < r], \quad (1)$$

где r – заданная величина расстояния между парой соответствующих точек.

Значение корреляционной функции (1) зависит от величины r и N . Если при $r \rightarrow 0$ корреляционная функция (1) определяется степенным законом вида:

$$C_3(r) = a r^{D_2}, \quad (2)$$

где a – константа, а D_2 – КР, то полагают, что траектория приращений вектора состояний x_i опасных факторов газовой среды при пожаре обладает фрактальными свойствами. При этом с учетом (2) величина фрактальной или корреляционной размерности будет определяться наклоном прямой на графике $(\ln C_3(r), \ln r)$ или

$$D_2 = \frac{\ln C_3(r)}{\ln r}, \quad \text{при } r \rightarrow 0. \quad (3)$$

Известно, что корреляционную функцию (1) можно вычислить более эффективно, описав в соответствующем фазовом пространстве сферу радиуса r (или куб) вокруг каждой точки x_i и подсчитав число точек в каждой сфере, т. е.

$$C_3(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N H(r - \|x_i - x_j\|). \quad (4)$$

Функция $H(*)$ в выражении (4) определяет функцию Хевисайда. В качестве меры $\|x_i - x_j\|$ в (4) предлагается выбирать норму L_∞ . Данная норма обладает двумя важными для практики преимуществами. Эти преимущества состоят в независимости данной нормы от размерности рассматриваемого фазового пространства, а также простоте ее вычисления.

Поскольку корреляционная функция (4) определяется всеми N точками $\{x_i\}$ приращений состояний, воспользоваться ею для оценки динамики КР не представляется возможным. В этой связи пятый этап предлагаемого метода включает вычисление корреляционной функции (4) в прямоугольном окне фиксированного размера $N_w \ll N$. При этом окно перемещается дискретно по мере измерений текущих значений вектора состояния (т. е. в реальном темпе измерения состояний опасных факторов пожара). Размер окна N_w выбирается априорно, исходя из задаваемых требований к качеству выявления ранних возгораний. При этом необходимо иметь в виду, что большая ширина N_w окна приводит к лучшему сглаживанию, но и большей начальной задержке в оценке КР, а малая ширина окна – к худшему сглаживанию, но меньшей начальной задержке оценки КР.

Шестой этап связан с выбором процедуры принятия решения о раннем обнаружении пожара на основе текущей оценки динамики КР опасных факторов газовой среды при возникновении пожара в помещениях. Для этого предлагается использовать традиционную пороговую процедуру принятия решения, но применяемую к текущим значениям КР, которые сравниваются с заданным порогом.

$$D0_2 = \frac{\log C(r0)}{\log r0}, \quad (5)$$

где $r0$ – заданный пороговый радиус сферы в фазовом пространстве для вычисления порога $D0_2$. В этом случае предлагаемый алгоритм раннего обнаружения пожара с учетом (3) и (4) будет определяться в виде:

$$D_2 \geq D0_2. \quad (6)$$

В реальных условиях динамика оценки КР (3) с учетом (4) носит случайный характер. Поэтому качество принятия решения о раннем обнаружении пожара в помещении можно описать на основе теории статистических решений. В общем случае, следуя (6) решения принимаются при двух взаимно исключающих условиях, характеризующих состояние очага пожара (места первоначального возникновения пожара): «пожар есть» – H_1 и «пожара нет» – H_0 . Вследствие возмущений газовой среды в помещении при раннем возгорании материалов решения о пожаре будут приниматься с ошибками. В данном случае на основании динамики КР состояния газовой среды в помещении можно выносить только предположительные решения (гипотезы) о пожаре, а именно: «пожар есть» – H_1^* ; «пожара нет» – H_0^* .

В результате обобщенная модель принятия решений при раннем

пороговом обнаружении пожара на основе динамики КР состояния газовой среды в помещении может быть представлена в виде, представленном на рис. 1.

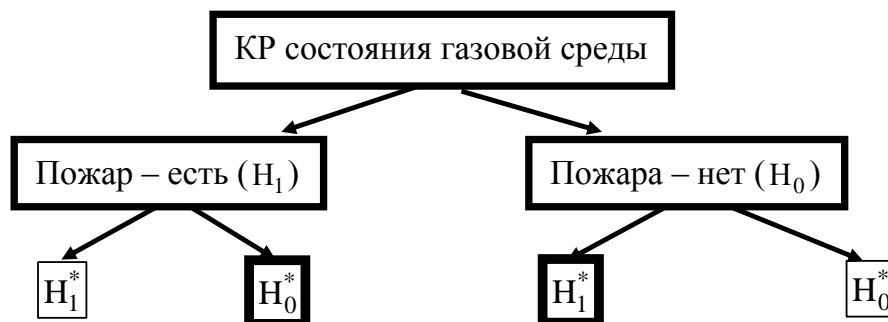


Рис. 1. Модель принятия решений о пожаре на основе определения КР состояния газовой среды в помещениях объекта

В ходе экспериментальной оценки динамики КР состояния газовой среды регистрировались плотность дыма, температура среды и концентрация СО. Регистрация этих показателей осуществлялась соответствующими сенсорами, расположенными в специальной камере, моделирующей негерметичное помещение [28]. В качестве типовых горючих материалов выбирался спирт, бумага, древесина и текстиль. Измерение состояния газовой среды производилось в дискретные моменты i времени, следующие с шагом $\Delta t=0,1$ секунды. Для удобства обработки данных дискретные моменты времени i были пронумерованы от 0 до N . Это позволило состояние газовой среды в момент i определить соответствующим вектором z_i в трехмерном фазовом пространстве. Перед каждым сеансом поджога тестовых горючих материалов производилась естественная вентиляция камеры в течение 5–7 минут с целью восстановления исходного состояния газовой среды в камере. В каждом сеансе исследования поджог тестовых горючих материалов в камере производился примерно в момент 200 отсчета от начала измерения. В качестве измерительных сенсоров использовались соответствующие штатные пожарные извещатели. Измерительные сенсоры размещались в зоне конвективной струи на высоте 0,8 м над областью расположения соответствующего тестового горючего материала.

КР состояния газовой среды в камере определялась методом движущегося окна по мере поступления результатов наблюдений. Это позволило вычислять текущие оценки динамики КР. Подробный анализ КР состояния газовой среды в камере при возгорании различных тестовых материалов представлен в [29].

На рис. 2 в качестве иллюстрации приведена характерная динамика КР при возгорании бумаги и текстиля в моделирующей камере при $\tau=0,001$ и ширине окна 60 дискретных отсчетов для 600 наблюдений. Там же приведена динамика приращений соответственно для температуры среды, плотности дыма и концентрации СО.

Динамика КР газовой среды при возгорании спирта схожа с динамикой КР для бумаги, а динамика КР газовой среды для древесины – с динамикой для текстиля. Из анализа приведенных данных

видно, что КР состояния газовой среды в отсутствие возгораний материалов (до 200 отсчета) при заданных параметрах изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,2 для всех тестовых материалов.

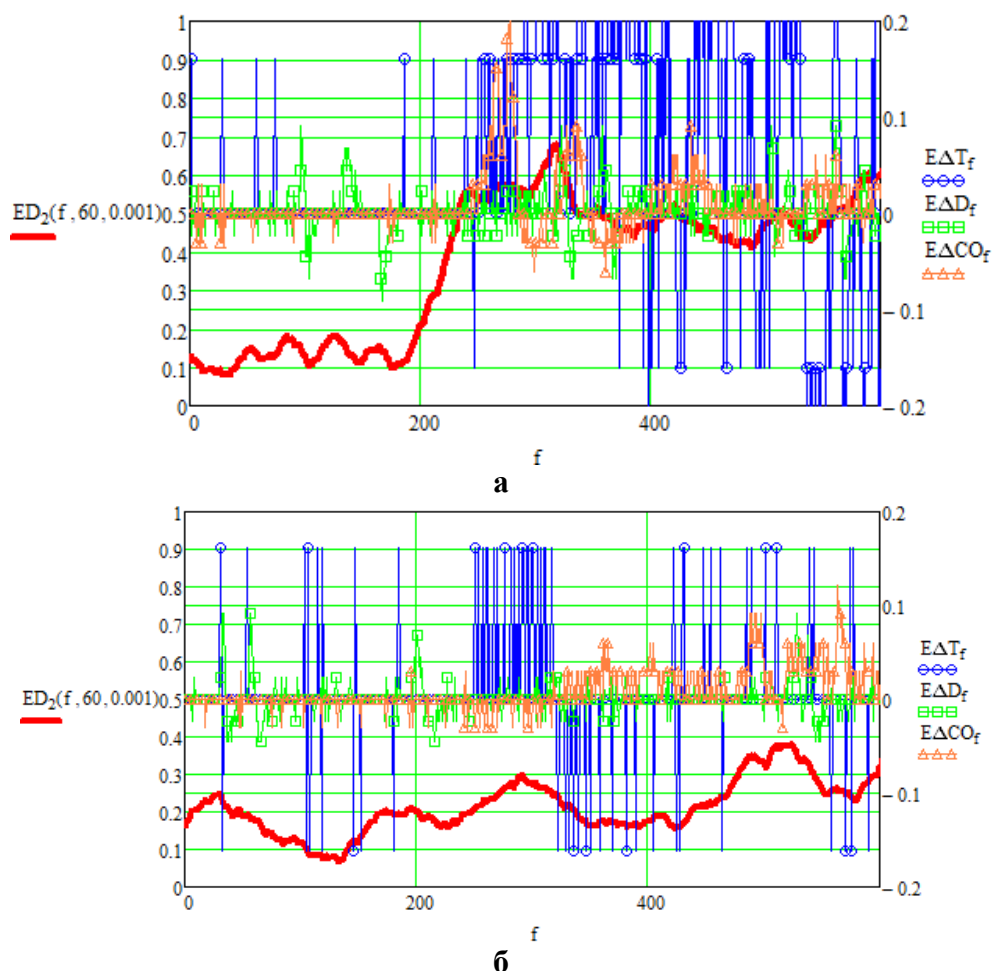


Рис. 2. Динамика КР состояния газовой среды в камере в случае возгорания: а – бумаги; б – текстиля

После поджега материалов КР возрастает. Однако наименьшее возрастание характерно для текстиля (КР возрастает до 0,3). Объясняется это более медленным физическим процессом возгорания данного типа материала и меньшим влиянием его на состояние газовой среды. При этом в целом по факту возрастания КР возможно судить о начале возгорания материалов. Для выбранного порогового радиуса сферы и заданной ширины окна высокая надежность раннего обнаружения пожара будет гарантироваться только для горючих материалов в виде бумаги и спирта, возгорание которых приводит к большим изменениям КР состояния газовой среды. Менее эффективным в этом случае оказывается раннее обнаружение пожара при возгорании горючих материалов в виде древесины и текстиля, для которых изменения КР состояния газовой среды менее значительны. Следует заметить, что для автоматического раннего обнаружения пожаров в помещениях в общем случае требуется устанавливать соответствующий порог (5), величина которого зависит от выбираемого порогового радиуса сферы в фазовом пространстве в зависимости от вида горючего материала. Так, например,

увеличение выбираемого порогового радиуса сферы в фазовом пространстве с 0,001 до значений 0,03 и 0,16 позволяет гарантированное раннее обнаружение пожара при возгорании древесины и текстиля. В качестве иллюстрации на рис. 3 приведена динамика КР состояния газовой среды при возгорании текстиля для различных значений выбираемого порогового радиуса сферы в фазовом пространстве.

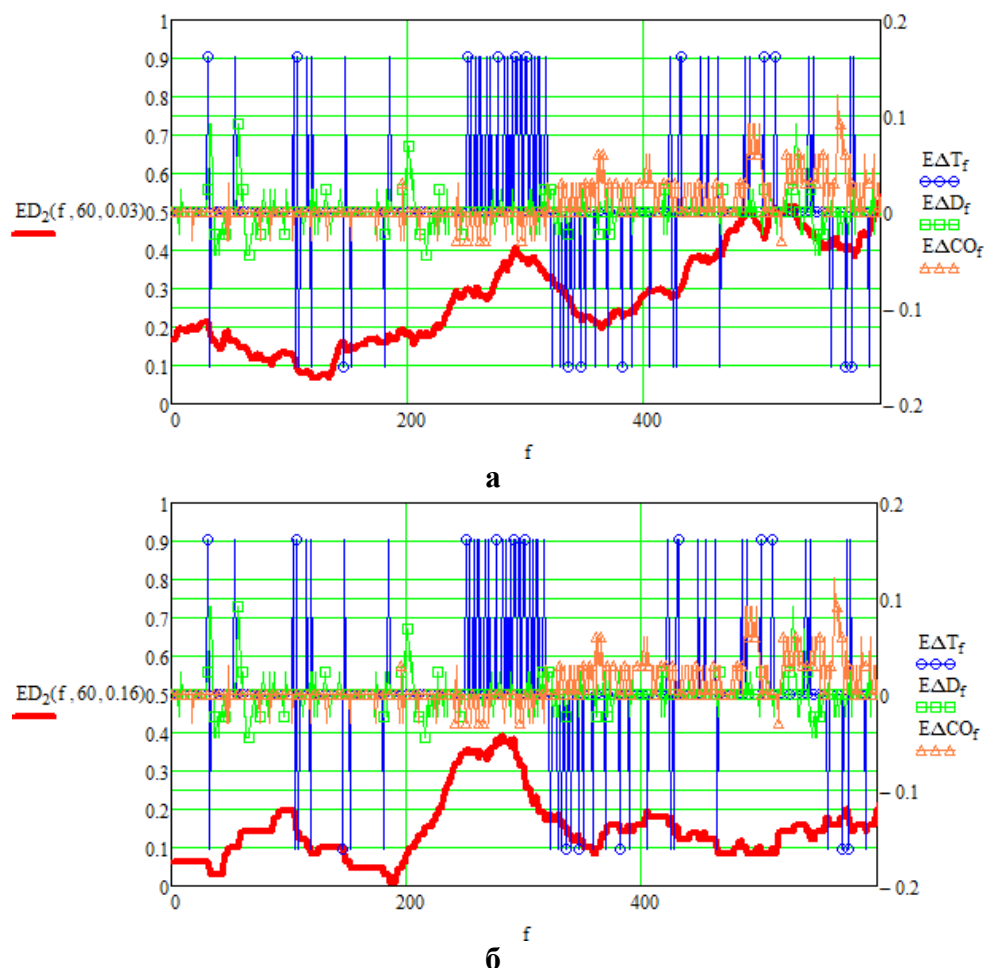


Рис. 3. Динамика КР состояния газовой среды в камере в случае возгорания текстиля для различных значений порогового радиуса сферы: а – 0,03; б – 0,16

Представленные на рис. 2 и рис. 3 результаты получены с учетом реальных ошибок регистрации данных сенсорами состояния газовой среды в моделирующей камере, а также ошибок преобразования результатов измерения в цифровую форму для последующей их обработки. Полагалось, что ошибки преобразования регистрируемых данных в цифровую форму пренебрежимо малы по сравнению с ошибками сенсорных измерений. Поэтому в пределах методической погрешности приведенные данные достоверно оценивают КР для состояний газовой среды. Считая, что используемые в эксперименте сенсоры аналогичны, применяемым в реальных пожарных извещателях, можно надеяться на адекватность представленных результатов исследования КР реальным условиям.

Анализ динамики КР состояния газовой среды при возгораниях различных тестируемых материалов свидетельствует о том, что она не превышает величину 0,6. Это свидетельствует о фрактальности состоя-

ния газовой среды в камере и ее хаотической динамике на этапе возгорания рассматриваемых тестовых материалов. Малое значение КР (до возгорания) свидетельствует о том, что это состояние будет продолжаться и в будущем. При возгорании материала в камере динамика КР изменяется и проявляется в резком ее увеличении в момент возгорания (на рис. 2 и рис. 3 область 200 отсчета) в среднем с 0,1 до 0,4 – 0,6. В большей степени КР увеличивается для бумаги (до 0,6) и в меньшей степени – для текстиля (до 0,3). Объясняется это различиями в процессах возгорания этих материалов. Малая величина КР в отсутствие возгорания говорит о наличии стационарности состояния газовой среды в камере. Возгорание материала старается нарушить указанную стационарность состояния газовой среды в камере и изменить ее фрактальные свойства.

Следует заметить, что в отличие от статистического анализа состояния газовой среды фрактальный анализ состояния свободен от вероятностного характера получаемых результатов. Однако решение о раннем обнаружении пожара на основе превышения КР задаваемого порога в соответствии с предлагаемым методом будет носить вероятностный характер.

Выводы. Таким образом, представлена разработка метода раннего обнаружения пожаров в помещениях на основе анализа текущей динамики корреляционной размерности состояний опасных факторов газовой среды при возгораниях различных материалов и сравнения ее с пороговым значением. Выполнено теоретическое обоснование метода, которое основывается на вычислении корреляционного интеграла в соответствии с алгоритмом Грассбергера-Прокаччиа в скользящем окне фиксированной ширины. Проведен анализ динамики КР состояния газовой среды при возгораниях спирта, бумаги, древесины и текстиля в моделирующей камере. Отмечается, что динамика состояния газовой среды в камере обладает фрактальной структурой и является хаотической при возгорании тестовых материалов. Фрактальная структура оказывается не одинаковой, что свидетельствует о сложном характере ("переходном хаосе") образующихся состояний газовой среды. При этом экспериментально подтверждено, что динамика текущей оценки КР в момент начала возгорания материалов имеет тенденцию увеличения. Данный факт предложено использовать в методе раннего обнаружения пожара в помещениях на объекте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Національний класифікатор України ДК 019-2010 «Класифікатор надзвичайних ситуацій», 19с.
2. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. V. 3/9 (93). P. 34–40.
3. Turcotte D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
4. Poulsen A., Jomaas G. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings // Fire Technolo-

gy. 2012. №48. P. 419–439.

5. Zhang D., Xue W. Effect of heat radiation on combustion heat release rate of larch // *Journal of West China Forestry Science*. 2010. №39. C. 148.

6. Ji J., Yang L., Fan W. Experimental study on effects of burning behaviours of materials caused by external heat radiation // *JCST*. 2003. №9. P. 139.

7. Peng X., Liu S., Lu G. Experimental analysis on heat release rate of materials // *Journal of Chongqing University*. 2005. №28. P. 122.

8. Andronov V., Pospelov B., Rybka E. Increase of accuracy of definition of temperature by sensors of fire alarms in real conditions of fire on objects // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. V. 4 (82). №5. P. 38–44.

9. Andronov V., Pospelov B., Rybka E. Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detector // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 2 (86). №9. P. 32–37.

10. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 4 (88). №9. P. 53–59.

11. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by self-adjusting fire detectors // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 5 (89). №9. P. 43–48.

12. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S., Shcherbak S. Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 6 (90). №10. P. 50–56.

13. Bendat J. S., Piersol A. G. *Random data: analysis and measurement procedures, fourth edition* // John Wiley & Sons. 2010. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781118032428>

14. Shafi I., Ahmad J., Shah S. I., Kashif F. M. Techniques to obtain good resolution and concentrated time-frequency distributions: a review // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2009. 43 p.

15. Singh P. Time-frequency analysis via the fourier representation // *HAL*. 2016. P. 1–7. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01303330>

16. Pretrel H., Querre P., Forestier M. Experimental study of burning rate behaviour in confined and ventilated fire compartments // *Fire safety science proceedings of the eighth international symposium*. 2005. P. 1217–1228.

17. Andronov V., Pospelov B., Rybka E., Popov V., Romin A. Experimental investigation of fluctuations of gas environment parameters as early fire signs // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V.1 (91). №10. P. 50-55.

18. Stankovic L., Dakovic M., Thayaparan T. *Time-frequency signal analysis* // Kindle edition, Amazon. 2014. 655 p.

19. Avargel Y., Cohen I. Modeling and identification of nonlinear systems in the short-time Fourier transform domain // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2010. V. 58. №1. P. 291–304.

20. Giv H. Directional short-time Fourier transform // Journal of Mathematical Analysis and Applications. 2013. V. 399. №1. P. 100–107.

21. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Popov V., Semkiv O. Development of the method of frequency-temporal representation of fluctuations of gaseous medium parameters at fire // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. V. 2 (92). №10. P. 44–49.

22. Б. Мандельброт. Фрактальная геометрия природы. Москва. 2002.

23. Andronov V., Pospelov B., Rybka E. Examining the learning fire detectors under real conditions of application // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. V. 3 (87). №9. P. 53–59.

24. Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 5, Issue 10 (95). P. 25–30.

Получено редколлегией 10.09.2019

Б.Б. Поспелов, Є.О. Рибка, Р.Г. Мелешченко, П.Ю. Бородич, М. А. Самойлов

Розроблено метод раннього виявлення пожеж в приміщеннях на основі аналізу поточної динаміки кореляційної розмірності станів газового середовища і порівняння її з порогом.

Ключові слова: раннє виявлення пожеж, кореляційний розмірність, стан газового середовища приміщення.

B. Pospelov, E. Rybka, R. Meleshchenko, P. Borodich, M. Samoylov

A method has been developed for the early detection of fires in rooms based on an analysis of the current dynamics of the correlation dimension of the states of the gas medium and its comparison with the threshold.

Keywords: early fire detection, correlation dimension, state of the gas environment of the room.