

Рукопис надійшов: 28.06.2022

Статтю опубліковано: 30.08.2022

УДК 621.03.9

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.263194

Емпірична кумулятивна функція розподілу характерної ознаки газового середовища при загоряннях

Б. Б. Поспелов, В. А. Андронов, Є. О. Рибка, Ю. С. Безугла,
О. І. Ляшевська, Т. Ю. Бутенко, Е. А. Дармофал, С. В. Гришко,
І. П. Козинська, Ю. О. Бєлашов

Об'єктом дослідження є динаміка характерної ознаки прирощення стану газового середовища в приміщенні при появі теплового джерела пожежі. Предметом дослідження є вид емпіричної кумулятивної функції розподілу динаміки характерної ознаки прирощення стану газового середовища за відсутності та появи теплового джерела пожежі в приміщенні. У якості характерної ознаки обрано ймовірність нерекурентності прирощень вектору станів газового середовища. Результати дослідження дозволяють оперативно виявляти теплові джерела пожежі у невизначених умовах. Обґрунтовано методика дослідження емпіричної кумулятивної функції розподілу динаміки ймовірності нерекурентності прирощень вектора стану газового середовища. Методика включає виконання семи послідовних процедур і дозволяє досліджувати зазначену функцію для довільних інтервалах часу. Досліджено емпіричну кумулятивну функцію розподілу для двох фіксованих інтервалів часу рівної тривалості до і після появи тестових теплових джерел пожежі у лабораторній камері. Встановлено, що особливості емпіричних кумулятивних функцій розподілу динаміки ймовірності нерекурентності прирощень вектора стану газового середовища дозволяють здійснювати раннє виявлення пожежі. Головною ознакою виявлення є зниження фіксованих значень емпіричної кумулятивної функції розподілу. Для тестових теплових джерел фіксовані значення емпіричної кумулятивної функції розподілу лежать в діапазоні 0,15–0,44. Дані ймовірності обумовлюються різною швидкістю займання тестових теплових джерел. Результати досліджень свідчать про можливість використання виявлених особливостей емпіричних кумулятивних функцій розподілу динаміки ймовірності нерекурентності прирощень вектора стану газового середовища для раннього виявлення загорянь.

Ключові слова: газове середовище, динаміка прирощень станів, теплові джерела пожежі, емпірична кумулятивна функція розподілу.

1. Введение

Число пожаров в мире имеет опасную тенденцию роста. В результате пожаров ежегодно погибает около 90 тыс. чел. [1]. Пожары возникают в экосистемах [2], на производстве [3, 4], а также различных объектах критической инфраструктуры [5]. Наибольшее число пожаров возникает на объектах технической и жилой сферы [6]. Особая опасность таких пожаров связана с тем, что

они возникают в помещениях объектов (ППО) и представляют значительную угрозу для жизни человека [7]. Кроме этого такие пожары наносят огромный ущерб самим объектам [8, 9], окружающей среде [10], а также значительный материальный ущерб [11]. В результате пожара могут выпадать опасные кислотные дожди [12] и возникать загрязнения водоносных слоев [13]. Поэтому выявление тепловых источников (ТИ) до их перехода в пожары на объектах технической и жилой сферы является одной из важных и актуальных проблем.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Большая часть существующих исследований посвящена различным аспектам тушения уже возникших ППО. В [14] рассматриваются аспекты тушения ППО мелкодисперсной водой. Использование для тушения импульсной высокоскоростной струи жидкости для тушения рассматривается в [15]. Физические аспекты распространения загрязнений от ППО атомной промышленности рассматриваются в [16]. Однако в [14–16] особенности выявления ТИ с целью недопущения ППО на ранней стадии развития не рассматриваются. В [17] исследуется динамика опасных параметров газовой среды помещений (ГСП). Следуя [17], для выявления ТИ в помещениях объектов целесообразно использовать динамику приращений опасных параметров ГСП. Однако в [18] указывается, что динамика опасных параметров и их приращений для ГСП при ППО оказывается индивидуальной. В общем случае она характеризуется нелинейным и стохастическим характером, является неопределенной и нестационарной. Применение известных линейных технологий для выявления тепловых источников в таких условиях будет приводить к существенным ошибкам [19]. В [20] отмечается, что характер динамики ГСП и имеет особое значение для достоверного выявления ТИ. Например, неопределенность и нестационарный характер параметров ГСП при выявлении ТИ предлагается преодолевать на основе технологии самонастройки [21]. Однако в [21] технология самонастройки базируются на усредненных значениях параметров ГСП. Результаты экспериментальной проверки технологии самонастройки, предложенной в [21], представлены в [22]. Исследования ограничиваются только анализом динамики самонастройки порога и оценки текущей вероятности выявления ТИ [23]. Однако все вероятностные характеристики динамики параметров ГСП, содержащиеся в выборочной кумулятивной функции распределения, для выявления ТИ в [18–23] не рассматриваются. В [24] указывается возможность использования различных методов нелинейной динамики для выявления ТИ в условиях неопределенности, хаотичности и нестационарности динамики опасных параметров ГСП. Работа [25] посвящена исследованию метода корреляционной размерности. В [26] исследуются корреляции основных опасных параметров ГСП. Метод адаптивного вычисления рекуррентных диаграмм в случае неопределенности и нестационарности динамики опасных параметров ГСП предложен в [27]. Однако в [25–27] выборочная кумулятивная функция распределения динамики опасных параметров и особенности ее применения для выявления ТИ не рассматриваются. В [28] предлагаются методы выявления ТИ на основе динамики опасных параметров ГСП при возникновении ППО. Однако предложенные методы пригодны только в случае стационарной динамики и основываются на усредненных энергетических харак-

теристиках опасных параметров. Методы временной локализации опасных параметров ГСП рассматриваются в [29]. Однако выборочная кумулятивная функция распределения динамики опасных параметров для выявления ТИ не рассматривается. В [30] предложен метод прогнозирования ППО на основе динамики опасных параметров ГСП. Метод краткосрочного прогноза ППО на основе рекуррентности состояний ГСП предлагается в [31]. Однако в [30, 31] прогнозирование ППО в реальных условиях осуществляется без использования информации, которая содержится в выборочной кумулятивной функции распределения динамики опасных параметров. При этом выборочная кумулятивная функция распределения в общем случае кроме выявления ТИ позволяет оценивать и их вероятность. При этом динамика опасных параметров ГСП при возникновении ППО от различных ТИ имеет сложный нелинейный и хаотический характер, зависящий от множества неопределенных случайных факторов. Для выявления ТИ известны различные методы. Большая часть методов являются сложными, обладают ограниченной чувствительностью и оперативностью выявления ТИ пожара. Более конструктивными для выявления ТИ следует считать методы нелинейной динамики опасных параметров ГСП [32]. Однако не выявлено работ, в которых рассматривались бы методы выявления ТИ пожара, основанные на выборочной кумулятивной функции распределения для различных признаков приращений состояния газовой среды помещений. Данные методы, являясь непараметрическими, позволят выявлять ТИ ППО в условиях большой неопределенности. Поэтому важной и нерешенной частью проблемы выявления ТИ ППО в условиях неопределенности является применение выборочной кумулятивной функции распределения динамики характерного признака для приращений состояния ГСП при появлении ТИ.

3. Цель и задачи исследования

Цель работы – определить вид эмпирической кумулятивной функции распределения для динамики характерного признака приращений состояния газовой среды при появлении теплового источника пожара в помещении.

Результаты исследования позволят на практике оперативно выявлять появление тепловых источников и предупреждать возникновение пожара в различных типах реальных помещений.

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

- теоретически обосновать методику исследования эмпирической кумулятивной функции распределения динамики характерного признака приращений состояния газовой среды при появлении теплового источника пожара в помещении;
- исследовать вид эмпирической кумулятивной функции распределения динамики характерного признака приращений состояния газовой среды на двух фиксированных интервалах времени до и после появления различных тестовых тепловых источников пожара в лабораторной камере.

4. Материалы и методы исследования

Объектом исследования является динамика характерного признака приращений состояния ГСП при появлении ТИ ППО. Предметом исследования является вид эмпирической кумулятивной функции распределения динамики харак-

терного признака приращений состояния ГСП при отсутствии и появлении ТИ ППО. Рабочая гипотеза состоит в том, что появление ТИ ППО влияет на динамику характерного параметра приращений состояния ГСП. В качестве характерного признака приращений состояния ГСП используется оценка текущей вероятности рекуррентности или соответствующей ей не рекуррентности вектора приращений. Для определения указанного признака используется модифицированный метод рекуррентных диаграмм. Исследуемая эмпирическая кумулятивная функция распределения определяется для характерного признака динамики в виде оценки динамики вероятности рекуррентности или не рекуррентности вектора приращений состояния ГСП.

Исследования базируются на измерениях состояния газовой среды в лабораторной камере для ТИ пожара в виде спирта, древесины, целлюлозы и текстиля [17]. Состояние газовой среды определялось измеренными значениями плотности дыма, среднеобъемной температуры и концентрация СО [33]. Измерения опасных параметров проводились в дискретные моменты времени $i=0, 1, 2, \dots, 400$ с интервалом 0,1 с. Поэтому состояние газовой среды в момент i определялось вектором x_i , а составляющие этого вектора определялись результатами текущих измерений указанных опасных параметров газовой среды. Плотность дыма измерялась сенсором TGS2442 (Япония), среднеобъемная температура – DS18B20 (Германия), а концентрация СО – MQ-2 (Китай). Поджог ТИ пожара в камере производился на 20–25 секунде после начала измерения для каждого опасного параметра газовой среды. В [34–36] отмечается, что состояние ГСП зависит от множества неизвестных параметров и факторов. Например, параметров ТИ, помещения, а также других мешающих факторов. Возможности исследования вероятностных характеристик приращений состояния на основе выборочной кумулятивной функции распределения показаны в работах [37, 38]. Исследования выполнялись на основе измерений опасных параметров газовой среды на двух различных интервалах времени до и после появления тестовых ТИ пожара в камере [39]. Длительность интервалов определялась 100 дискретными измерениями параметров. Начало первого интервала измерений определялось 100 отсчетом, а начало второго – 200 отсчетом. Указанные начала указанных интервалов выбирались из условия достоверного отсутствия и начала возникновения ТИ пожара в камере.

5. Результаты исследования эмпирической кумулятивной функции

5.1. Теоретическое обоснование методики исследования эмпирической кумулятивной функции

Методика исследования базируется на представлении состояния ГСП в виде некоторого случайного события, связанного с появлением ТИ пожара. Данное случайное событие является следствием многих случайных причин. Законы действия этих причин обычно неизвестны. Поэтому невозможно заранее предсказать, произойдет или не произойдет данное событие – возникновение ТИ пожара. Однако при измерении текущего состояния ГСП это событие оказывается связанным с появлением действительной случайной величины. Это может быть как сам вектор состояния ГСП или его приращения, так и какой либо ха-

ракторный признак появления ТИ пожара [17, 18]. С вероятностной точки зрения любое случайное событие полностью описывается интегральной (кумулятивной) функцией распределения вероятностей случайных величин, связанных с этим событием. Характерным признаком случайной величины X , связанной с появлением ТИ пожара, можно считать, например, относительную частоту (вероятность) повторяющихся (рекуррентных с точностью ε) приращений вектора состояния ГСП на рассматриваемом интервале [17, 18]. В этом случае интегральная функция распределения X определяет вероятность выполнения неравенства $X < u$, где величина u определяет задаваемый уровень вероятности рекуррентности состояний $u \in (0, 1)$. Дополнение к интегральной функции распределения вероятностей случайной величины X определяет вероятность выполнения противоположного неравенства $X > u$. Эти свойства функции распределения положены в основу обоснования методики исследования.

Методика исследования включает последовательное выполнение семи специальных процедур. Первая процедура состоит в измерении произвольных опасных параметров ГСП. Эта процедура выполняется с помощью набора соответствующих измерительных сенсоров. По результатам измерений каждым из сенсоров формируется текущее значение вектора состояния x_i ГСП, где $i=0, 1, 2, \dots, N_s-1$. Здесь величина N_s определяется максимальным числом дискретных измерений, выполняемых каждым сенсором. Вторая процедура включает формирование приращений для вектора состояния x_i в каждый дискретный момент времени в соответствии с соотношением

$$z_i = x_i - x_{i-1}. \quad (1)$$

Третья процедура состоит в определении пространства Ω всех векторов приращений $z_i \in \Omega$ и введение метрики $d_{i,j}$ для этого пространства. В рассматриваемом случае метрика $d_{i,j}$ определяет расстояние между произвольной парой элементов пространства Ω в соответствии с правилом

$$d_{i,j} = |z_i - z_j|. \quad (2)$$

Четвертая процедура включает определение таких пар (схожих или рекуррентных) элементов пространства Ω , для которых метрика (2) меньше заданной величины ε . Эта процедура математически определяется функцией

$$R(i, j, \varepsilon) = \text{if} \left\{ i \neq j, ZH(\varepsilon - d_{i,j}), 0 \right\}. \quad (3)$$

В выражении (3) характеристическая функция $ZH(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ 1, & x > 0. \end{cases}$

Пятая процедура состоит в вычислении для каждого дискретного момента i и заданной величины ε функции вида:

$$TDR(i, \varepsilon) = if \left\{ i < 0, 0, \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i R(i, i-k, \varepsilon) \right\}. \quad (4)$$

Функция (4) определяет выборочную вероятность рекуррентности приращений вектора состояний ГСП до момента i включительно. Шестая процедура состоит в определении текущей вероятности противоположного события – вероятности нерекуррентности приращений вектора состояний ГСП. Данная вероятность определяется на основе функции (4) соотношением вида:

$$TDNR(i, \varepsilon) = 1 - TDR(i, \varepsilon). \quad (5)$$

Седьмая процедура состоит в вычислении выборочной кумулятивной функции распределения (5), для произвольного интервала моментов измерения $i \in (NI, NI+TI)$. Здесь величина NI определяет начало задаваемого интервала, а TI – длительность данного интервала. С учетом этого выборочная кумулятивная функция распределения (5) для произвольного заданного уровня y на основе моментов измерений $i \in (NI, NI+TI)$ будет определяться по формуле

$$F(y, \varepsilon) = \frac{1}{TI} \sum_{l=NI}^{NI+TI} ZH \{ y - TDNR(l, \varepsilon) \}. \quad (6)$$

Вычисление выборочной кумулятивной функции распределения (6) позволяет исследовать вероятностные свойства динамики вероятности нерекуррентности приращений вектора состояний ГСП для произвольного задаваемого интервала времени.

Описываемая методика включает последовательное выполнение процедур (1)–(6) и позволяет исследовать вид выборочной кумулятивной функции распределения динамики вероятности нерекуррентности приращений вектора состояний ГСП для произвольных интервалов времени измерения опасных параметров. Это позволяет использовать данные (6) для выявления интервалов появления ТИ ППО в реальном времени.

5. 2. Результаты исследования вида эмпирической кумулятивной функции

Результаты исследования включают оценку вида эмпирической кумулятивной функции распределения динамики вероятности нерекуррентности приращений состояния газовой среды на интервалах отсутствия и появления ТИ в лабораторной камере. На рис. 1 приведены эмпирические кумулятивные функции распределения динамики вероятности нерекуррентности приращений вектора состояния газовой среды для спирта и целлюлозы на указанных интервалах измерения. Кривые красного цвета соответствуют интервалу отсутствия, а синего цвета – интервалу наличия ТИ пожара. Аналогичные кривые для древесины и текстиля приведены на рис. 2.

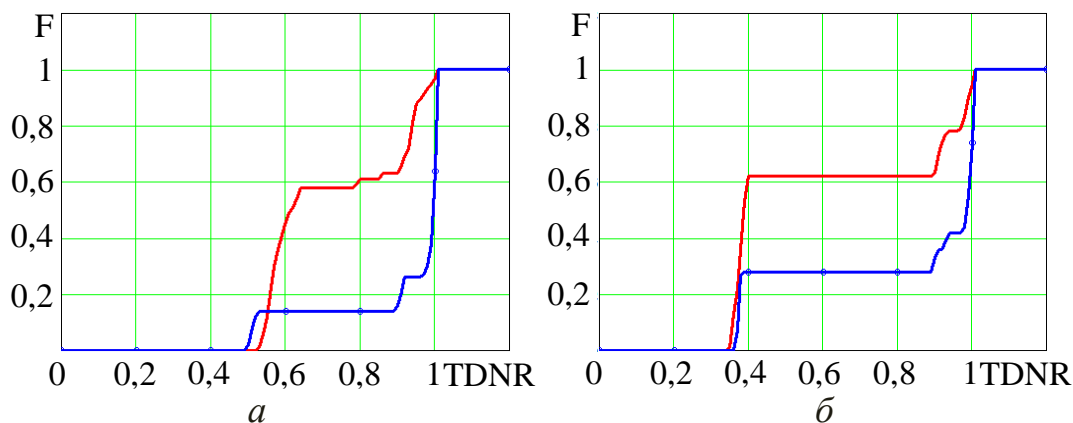


Рис. 1. Эмпирические кумулятивные функции распределения динамики вероятности нерекуррентности (несхожести) приращений вектора состояния газовой среды на исследуемых интервалах: a – для спирта; b – для целлюлозы

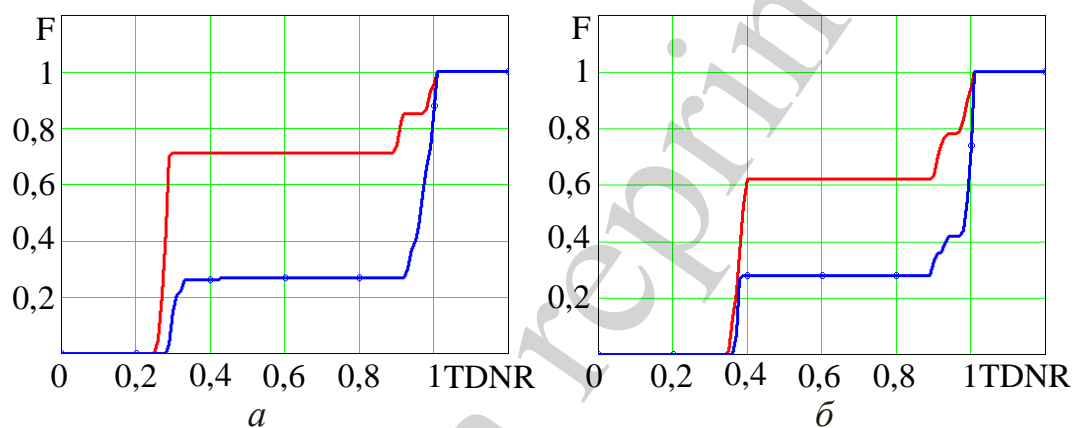


Рис. 2. Эмпирические кумулятивные функции распределения динамики вероятности нерекуррентности (несхожести) приращений вектора состояния газовой среды на исследуемых интервалах: a – для древесины; b – для текстиля

Кривые на рис. 1, 2 получены для заданной величины рекуррентности $\varepsilon=0,01$ и учитывают реальные ошибки сенсорных измерений опасных параметров газовой среды в лабораторной камере. При этом используемые в эксперименте сенсоры применяются в существующих пожарных датчиках и системах пожарной сигнализации. Поэтому полученные результаты можно зрения считать с практической точки зрения достоверными.

6. Обсуждение результатов исследования кумулятивной функции

Результаты, приведенные на рис. 1, 2, объясняются сложным характером реальной динамики вероятности нерекуррентности приращений вектора состояния газовой среды в лабораторной камере для тестовых ТИ. Следуя рис. 1, 2, возможные значения эмпирической кумулятивной функции распределения динамики вероятности нерекуррентности (несхожести) приращений вектора состояний газовой среды в камере при отсутствии и при наличии ТИ оказываются неодинаковыми. Например, различной является нижняя граница для значений

вероятности нерекуррентности. Для спирта эта граница определяется значениями вероятности в области с центром 0,5. Для целлюлозы, древесины и текстиля эта граница вероятности определяется областями с центром 0,35, 0,27 и 0,4 соответственно. Такой разброс границ объясняется различным качеством восстановления состояния газовой среды в камере после каждого исследования. Кумулятивные функции распределения на рис. 1, 2 имеют характерные участки возрастания и постоянства функций. Основной особенностью кумулятивных функций распределения при появлении тестовых ТИ пожара является снижение величины вероятности для фиксированных участков значений функций по сравнению со случаем достоверного отсутствия ТИ. Например, для спирта (рис. 1, а) данная вероятность снижается с 0,58 до 0,15, а для целлюлозы (рис. 1, б) – с 0,61 до 0,29. Для древесины (рис. 2, а) указанная вероятность снижается с 0,71 до 0,28, а для текстиля (рис. 2, б) – с 0,68 до 0,44. Следуя известному свойству кумулятивных функций распределения, для интервалов фиксированных значений вероятность попадания исследуемой случайной величины в эти интервалы равна нулю. Это означает, что значения вероятности нерекуррентности приращений для спирта и целлюлозы (рис. 1) в интервалах от 0,53 до 0,9 и от 0,39 до 0,9 соответственно равны нулю. Значения вероятности нерекуррентности для древесины и текстиля (рис. 2) равны нулю в интервалах от 0,33 до 0,93 и от 0,45 до 0,85 соответственно. Участки возрастания кумулятивных функций распределения на рис. 1, 2 определяют те возможные интервалы значений вероятности нерекуррентности, для которых вероятность отлична от нуля. Данная вероятность определяется разностью значений соответствующей кумулятивной функций распределения в граничных точках интервала значений вероятностей нерекуррентности, отличных от нуля. Таким образом, особенности вида эмпирических кумулятивных функций распределения динамики вероятности нерекуррентности (несхожести) приращений вектора состояния газовой среды при появлении ТИ позволяют осуществлять раннее выявление пожара. Главным признаком этого является снижение значений эмпирической кумулятивной функции распределения для фиксированных участков этой функции. Для исследуемых тестовых ТИ значения эмпирической кумулятивной функции распределения для фиксированных участков функций лежат в диапазоне от 0,15 до 0,44. Минимальная величина 0,15 обусловлена ТИ в виде спирта. Максимальная величина 0,44 характерна для ТИ в виде текстиля. Объясняется это тем, что указанные ТИ имеют максимальную и минимальную скорость воспламенения материала. К ограничениям данного исследования можно отнести конечный набор тестовых ТИ пожара и использование экспериментальных данных об опасных параметрах газовой среды в лабораторной камере.

7. Выводы

1. Предложена методика исследования вида эмпирической кумулятивной функции распределения динамики вероятности нерекуррентности приращений вектора состояния газовой среды при появлении тепловых источников пожара. Методика включает последовательное выполнение семи процедур. Первая процедура сводится к измерению опасных параметров газовой среды. Вторая –

включает формирование вектора состояния газовой среды и приращений этого вектора. Третья – состоит во введении метрического пространства для векторов приращений состояния газовой среды. Четвертая – включает выявление рекуррентных пар элементов метрического пространства. Пятая – состоит в вычислении текущей вероятности рекуррентности приращений вектора состояний газовой среды. Шестая – состоит в определении текущей вероятности нерекуррентности приращений вектора состояний газовой среды. Седьмая – состоит в вычислении выборочной кумулятивной функции распределения вероятностей нерекуррентности приращений вектора состояний газовой среды для произвольного интервала измерений. Последовательное выполнение предложенных процедур позволяет исследовать особенности вида выборочной кумулятивной функции распределения динамики вероятности нерекуррентности приращений вектора состояний газовой среды. Это позволяет использовать данную выборочную кумулятивную функцию распределения для раннего выявления тепловых источников пожара.

2. Исследована эмпирическая кумулятивная функция распределения динамики вероятности нерекуррентности приращений вектора состояний газовой среды для двух фиксированных интервалов времени равной длительности. Исследования выполнены для двух интервалов времени – до и после появления тестовых тепловых источников пожара в лабораторной камере. Установлено, что особенности эмпирических кумулятивных функций распределения динамики вероятности нерекуррентности (несхожести) приращений вектора состояния газовой среды позволяют осуществлять раннее выявление пожара. Главным признаком этого является снижение фиксированных значений эмпирической кумулятивной функции распределения. Определено, что для тестовых тепловых источников пожара значения эмпирической кумулятивной функции распределения лежат в диапазоне от 0,15 до 0,44. Данные значения объясняются различной скоростью воспламенения для тестовых тепловых источников пожара. В целом результаты исследований свидетельствуют о возможности использования эмпирических кумулятивных функций распределения динамики вероятности нерекуррентности приращений вектора состояния газовой среды на различных интервалах для раннего выявления загораний.

Литература

1. Brushlinsky, N. N., Ahrens, M., Sokolov, S. V., Wagner, P. (2019). World Fire Statistics. Report No. 24. Berlin: Center of Fire Statistics of CTIF, 65.
2. Migalenko, K., Nuianzin, V., Zemlianskyi, A., Dominik, A., Pozdieiev, S. (2018). Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (91)), 31–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121727>
3. Vambol, S., Vambol, V., Kondratenko, O., Koloskov, V., Suchikova, Y. (2018). Substantiation of expedience of application of high-temperature utilization of used tires for liquefied methane production. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2 (87), 77–84. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.2830>

4. Vambol, S., Vambol, V., Sobyna, V., Koloskov, V., Poberezhna, L. (2019). Investigation of the energy efficiency of waste utilization technology, with considering the use of low-temperature separation of the resulting gas mixtures. *Energetika*, 64 (4). doi: <https://doi.org/10.6001/energetika.v64i4.3893>
5. Semko, A., Beskrovnaya, M., Vinogradov, S., Hritsina, I., Yagudina, N. (2014). The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 52 (3), 655–664.
6. Otrosh, Y., Semkiv, O., Rybka, E., Kovalov, A. (2019). About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708 (1), 012065. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012065>
7. Ragimov, S., Sobyna, V., Vambol, S., Vambol, V., Feshchenko, A., Zakora, A. et. al. (2018). Physical modelling of changes in the energy impact on a worker taking into account high-temperature radiation. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 1 (91), 27–33. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.9654>
8. Kovalov, A., Otrosh, Y., Ostroverkh, O., Hrushovinchuk, O., Savchenko, O. (2018). Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*, 60, 00003. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>
9. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al.; Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. (Eds.) (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 180. doi: <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>
10. Dadashov, I., Loboichenko, V., Kireev, A. (2018). Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*, 37 (1), 63–77.
11. Reproduced with permission from *Fire Loss in the United States During 2019* (2020). National Fire Protection Association, 11.
12. Kustov, M., Kalugin, V., Tutunik, V., Tarakhno, O. (2019). Physico-chemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 1, 92–99. doi: <http://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99>
13. Vasyukov, A., Loboichenko, V., Bushtec, S. (2016). Identification of bottled natural waters by using direct conductometry. *Ecology, Environment and Conservation*. 22 (3), 1171–1176.
14. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely-dispersed water. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (92)), 38–43. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127865>
15. Semko, A., Rusanova, O., Kazak, O., Beskrovnaya, M., Vinogradov, S., Gricina, I. (2015). The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. *The International Journal of Multiphysics*, 9 (1), 9–20. doi: <https://doi.org/10.1260/1750-9548.9.1.9>

16. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D., Sobyna, V. et. al. (2019). Physical Features of Pollutants Spread in the Air During the Emergency at NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*, 4 (84), 88–98. doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).11)
17. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Popov, V., Romin, A. (2018). Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (91)), 50–55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122419>
18. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P. (2018). Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (9 (93)), 34–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133127>
19. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Popov, V., Semkiv, O. (2018). Development of the method of frequency-temporal representation of fluctuations of gaseous medium parameters at fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (92)), 44–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125926>
20. Ahn, C.-S., Kim, J.-Y. (2011). A study for a fire spread mechanism of residential buildings with numerical modeling. *Safety and Security Engineering IV*. doi: <https://doi.org/10.2495/safe110171>
21. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (88)), 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108448>
22. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Examining the learning fire detectors under real conditions of application. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (9 (87)), 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101985>
23. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by self-adjusting fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (89)), 43–48. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110092>
24. Angus, D. (2019). Recurrence Methods for Communication Data, Reflecting on 20 Years of Progress. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 5. doi: <https://doi.org/10.3389/fams.2019.00054>
25. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S. (2018). Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (95)), 25–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142995>
26. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S., Shcherbak, S. (2017). Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (90)), 50–56. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117789>
27. Pospelov, B., Rybka, E., Togobytska, V., Meleshchenko, R., Danchenko, Y., Butenko, T. et. al. (2019). Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. *Eastern-European Journal of En-*

Enterprise Technologies, 4 (10 (100)), 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176579>

28. Bendat, J. S., Piersol, A. G. (2010). Random data: analysis and measurement procedures. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118032428>

29. Shafi, I., Ahmad, J., Shah, S. I., Kashif, F. M. (2009). Techniques to Obtain Good Resolution and Concentrated Time-Frequency Distributions: A Review. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2009 (1). doi: <https://doi.org/10.1155/2009/673539>

30. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Samoilo, M., Krainiukov, O., Biryukov, I. et. al. (2021). Development of the method of operational forecasting of fire in the premises of objects under real conditions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (10 (110)), 43–50. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.226692>

31. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Krainiukov, O., Biryukov, I., Butenko, T. et. al. (2021). Short-term fire forecast based on air state gain recurrence and zero-order brown model. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (10 (111)), 27–33. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233606>

32. Mandelbrot, B. (2002). Fraktal'naya geometriya prirody. Institut kompyuternykh issledovaniy, 652. URL: <https://coollib.com/b/423957/read>

33. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Krainiukov, O., Maksymenko, N., Meleshchenko, R. et. al. (2020). Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (10 (106)), 37–44. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210059>

34. Materials of 7th International Symposium on Recurrence Plots (2017). São Paulo.

35. Marwan, N. (2011). How to avoid potential pitfalls in recurrence plot based data analysis. International Journal of Bifurcation and Chaos, 21 (04), 1003–1017. doi: <https://doi.org/10.1142/s0218127411029008>

36. Marwan, N., Webber, C. L., Macau, E. E. N., Viana, R. L. (2018). Introduction to focus issue: Recurrence quantification analysis for understanding complex systems. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 28 (8), 085601. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5050929>

37. Ramachandran, K. M., Tsokos, C. P. (2020). Mathematical Statistics with Applications in R. Academic Press. doi: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-02285-9>

38. Cheng, R., Currie, C. (2009). Resampling methods of analysis in simulation studies. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC). doi: <https://doi.org/10.1109/wsc.2009.5429319>

39. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Krainiukov, O., Karpets, K., Pirohov, O. et. al. (2019). Development of the correlation method for operative detection of recurrent states. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (4 (102)), 39–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.187252>