

**Виявлення особливостей амплітудного та фазового спектрів небезпечних факторів газового середовища при загоряннях матеріалів у приміщеннях****Б. Б. Поспелов, Є. О. Рибка, М. О. Самойлов, І. Є. Морозов, Ю. С. Безугла, Т. Ю. Бутенко, Ю. В. Михайловська, О. Г. Бондаренко, Ю. А. Веретеннікова**

*Виконано теоретичне обґрунтування досліджень спектральних особливостей динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища при загоряннях матеріалів у лабораторній камері. Дослідження таких спектральних особливостей ґрунтується на обчисленні прямого дискретного перетворення Фур'є для рівних за кількістю дискретних вимірювань на поточних інтервалах спостереження небезпечного досліджуваного параметра газового середовища до і після загоряння матеріалу. При цьому підході дискретне перетворення Фур'є дозволяє визначати миттєвий амплітудний і фазовий спектри для часових інтервалів, що розглядаються. Це дозволяє досліджувати особливості розподілу амплітуд та фаз гармонійних складових у спектрі динаміки небезпечних параметрів газового середовища до та після загоряння матеріалів. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що характер амплітудного спектру виявляється малоінформативним та недостатньо чутливим до загорянь. Основний внесок у амплітудний спектр динаміки досліджуваних небезпечних параметрів газового середовища в камері роблять частотні складові діапазону 0–0,2 Гц. Внесок у амплітудний спектр частотних складових понад 0,2 Гц виявляється незначним та зменшується зі збільшенням частоти. Встановлено, що з фазового спектра інформативним є характер випадкового розкиду фаз для частотних складових, які перевищують 0,2 Гц. Виявлено, що характер розкиду фаз для зазначених частотних складових у спектрі залежить від типу матеріалу загоряння. Отримані результати є корисними при розробці нових ефективних технологій виявлення загорянь у приміщеннях об'єктів різної сфери для захисту від пожеж. Пояснюється це тим, що для виявлення загорянь у приміщеннях важливими є високочастотні складові, що характеризуються прирощеннями небезпечних параметрів газового середовища.*

*Ключові слова: загоряння матеріалів, газове середовище приміщень, амплітудний миттєвий спектр, фазовий миттєвий спектр.*

**1. Введение**

Обеспечение безопасности и устойчивости функционирования различных объектов в настоящее время приобретает особую важность для любого из государств мира [1]. Это связано с решением общей проблемы устойчивого развития государств и мировой цивилизации в целом [2]. Наиболее важными для решения данной проблемы принято считать различные опасные объекты [3]. Процесс функционирования таких объектов обычно связан с возможностью возникновения различных опасных событий [4]. Опасные события могут возникать

в различных объектах как производственной, так и экологической сферы [5]. Кроме этого опасные события могут возникать в различных социально-экономических системах [6, 7]. При этом особо опасными и частыми событиями оказываются пожары в помещениях (ПП) объектов [8]. Опасные события в виде ПП обычно наносят значительный ущерб жизни человека [9], объектам [10] и окружающей среде [11, 12]. При этом существенно повышается общий уровень риска здоровью и жизни человека, снижающий устойчивость развития цивилизации [13]. В этой связи предотвращение ПП объектов следует рассматривать на современном этапе в качестве одной из актуальных проблем устойчивого развития цивилизации.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

В работе [14] отмечается, что в качестве одного из конструктивных подходов к обеспечению устойчивости функционирования объектов технической сферы следует рассматривать выявление ПП на ранних стадиях. При этом в работе [15] акцент делается на особой важности различных опасных параметров газовой среды (ГС). В работе [15] речь идет об опасных параметрах ГС, которые ограничиваются временной областью и измеряются соответствующими датчиками. Метод повышения быстродействия датчиков опасных параметров ГС при ПП рассматривается в [16]. Метод ограничивается схмотехническим усовершенствованием существующих датчиков и не затрагивает спектральных особенностей опасных параметров ГС. При этом метод ограничивается только измерением температуры ГС. В [17] исследуются нестационарные характеристики опасных параметров ГС. Применение адаптивных технологий для выявления загораний в этих условиях изучается в [18]. При этом адаптивные технологии ограничиваются рассмотрением лишь нестационарных энергетических характеристик и сводятся к адаптации порога соответствующих датчиков. Спектральные особенности опасных параметров ГС помещений при этом не рассматриваются и не исследуются. Использованию нескольких датчиков и применению групповой обработки данных и сетевых технологий для раннего выявления загораний не посвящена работа [19]. Развитие технологии совместной обработки данных о динамике двух и более опасных параметров ГС помещений для надежного выявления загорания рассматривается в [20]. При этом часть из указанных технологий уже реализована в стандартах EN и ISO [21–23]. Например, в [21] реализована технология обнаружения пожара на основе комбинации датчиков угарного газа и температуры ГС. При этом указанные датчики ограничиваются измерением традиционных временных параметров и не позволяют выявлять ранние загорания. Кроме этого расширение функциональных возможностей данной технологии не предусматривается. В [22] рассматривается технология использования множества датчиков для обнаружения ПП с функцией контроля состояния датчиков. Однако данная технология не позволяет выявлять загорания в помещениях. Она, как и технология [21], ограничивается измерением только временных параметров ГС. В стандарте ISO [23] рассматривается технология использования датчика угарного газа в сочетании с одним или несколькими тепловыми датчиками для использования в системах обнаружения

пожара и сигнализации. Однако данная технология не распространяется на совместное использование датчика угарного газа и тепла со специальными характеристиками, позволяющими выявлять загорания в помещениях.

В силу объективной многообразия и сложности реальной динамики опасных параметров ГС помещений при загораниях остаются недостаточно изученными особенности динамики указанных параметров при загораниях горючих материалов, характеризующихся различной скоростью выгорания. В этой связи актуальными оказываются исследования мгновенных амплитудных и фазовых частотных спектров динамики опасных параметров ГС помещений при загорании различных горючих материалов.

Для выявления загораний в помещениях применяются различные типы датчиков дыма [24]. Такие датчики обладают высоким быстродействием и имеют относительно низкую стоимость. Однако для указанных датчиков ложное выявление загораний зависит от температуры ГС [25]. Поэтому для надежного выявления загораний обычно применяются датчики газа [26] и датчики температуры [27]. При этом новые типы датчиков объединяют в своем составе несколько датчиков [28]. Известно, что для раннего выявления загораний важными являются особенности процессов пиролиза различных горючих материалов. В этой связи в [29] исследуются характеристики опасных факторов ГС при горении плантационной древесины. В [30] изучается влияние скорости выделения тепла при сжигании в различных условиях лиственницы. Исследованию скорости выделения тепла при горении древесины посвящена работа [31]. Однако в [31] исследования ограничиваются изучением зависимости между средней скоростью выделения тепла и интенсивностью горения. Скорость выделения тепла при горении органического стекла и кипариса исследуется в [32]. При этом в [29–32] не исследуются особенности мгновенных спектральных особенностей динамики опасных параметров ГС при пиролизе различных горючих материалов в помещении.

В работах [33–36] рассматриваются новые технологии выявления загораний, использующих различные фрактальные характеристики опасных параметров ГС помещений. Так, например, работе [33] предлагается использовать корреляционную размерность вектора состояния опасных параметров ГС помещений. Исследованию применения рекуррентных диаграмм для концентрации оксида углерода с целью выявления загораний в помещениях посвящена работа [34]. Краткосрочному прогнозу пожара на основе меры рекуррентности для вектора состояния ГС помещений и использования модели Брауна нулевого порядка посвящена работа [35]. Метод адаптивного вычисления рекуррентных диаграмм рассматривается в [36]. Однако в указанных работах фрактальные характеристики опасных параметров ГС помещений базируются на представлении ГС в виде сложной динамической системы. Исследования ограничиваются только рассмотрением временной области. При этом спектральные особенности текущей динамики опасных параметров ГС и ее состояния в случае загораний материалов в помещениях не рассматриваются и не исследуются.

Известно, что наилучшей зоной для выявления загораний является потолочная область в помещениях [37]. Поэтому при разработке технологий выяв-

ления загораний для предупреждения ПП в последнее время повышается роль моделей динамики опасных параметров ГС в потолочной области [38]. Стохастические модели опасных параметров ГС в указанной области в помещениях и параметров очага загорания с учетом случайных его параметров рассматриваются в [39]. Однако в [39] модели динамики опасных факторов ГС в потолочной области ограничиваются только временной областью. Вместе с этим в [38] отмечается, что многие из известных моделей нуждаются во всесторонней проверке экспериментальными огневыми испытаниями. В [40] на основе огневых испытаний установлено, что учет динамики концентрации СО и плотности дыма позволяет достаточно надежно выявлять загорания тестовых очагов стандарта EN 54. Результаты огневых испытаний с учетом воздействия различных мешающих факторов ГС помещений рассматриваются в [41]. Отмечается, что учет совместной динамики концентрации СО и плотности дыма ГС позволяет надежно выявлять большинство очагов загораний в условиях мешающих воздействий. Результаты экспериментального исследования взаимосвязей между опасными параметрами ГС при загорании материалов в помещениях приведены в [42]. Однако результаты исследования ограничиваются рассмотрением корреляционных связей, учитывающих линейную связь. Спектральные характеристики, учитывающие другие типы связей, при этом не рассматриваются и не исследуются.

Представленный анализ литературы свидетельствует, что недостаточно исследованными оказываются особенности амплитудного и фазового спектров динамики основных опасных параметров ГС при загорании материалов в помещениях. Прежде всего, речь идет о результатах экспериментального исследования спектральных особенностей динамики опасных параметров ГС при загораниях. В этой связи важной и нерешенной частью рассматриваемой проблемы является экспериментальное исследование спектральных особенностей динамики опасных параметров ГС при загораниях различных материалов в помещениях.

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью работы является выявление спектральных особенностей динамики основных опасных параметров газовой среды при загораниях материалов в помещениях. Это даст возможность раннего выявления загораний и предупреждения пожаров в помещениях.

Для достижения цели работы поставлены задачи:

- выполнить теоретическое обоснование исследования спектральных особенностей текущей динамики основных опасных параметров газовой среды при загораниях материалов;

- исследовать амплитудный и фазовый спектры текущей динамики для основных опасных параметров газовой среды при загорании тестовых материалов в лабораторной камере.

### **4. Материалы и методы исследования**

Экспериментальные исследования проводились в лабораторной камере [39], имитирующей негерметичное помещение. Объем камеры составлял

0,524 м<sup>3</sup>. В верхней части камеры на высоте 0,84 м от основания размещались датчики измерения исследуемых опасных параметров ГС при загорании тестовых горючих материалов. В качестве тестовых горючих материалов рассматривались спирт, бумага, древесина и текстиль. При поджоге высота пламени для отдельных тестовых горючих материалов не превышала 0,2 м. В эксперименте опасные параметры ГС  $x_i$  измерялись с помощью теплового датчика ТПТ-4, оптического датчика дыма ДИП-3.2 и датчика СО (серии Discovery).

Измеренные значения опасных параметров с выходов соответствующих датчиков сохранялись в памяти компьютера. Разработанное программное обеспечение позволяло осуществлять опрос датчиков с произвольным интервалом времени. В эксперименте опрос датчиков осуществлялся с интервалом 0,1 с. Поджог тестовых горючих материалов в камере производился примерно в момент времени  $t_{200}$ , соответствующий 20 с. Для исследования спектральных особенностей динамики измеряемых опасных параметров ГС в камере выбирались два одинаковых по длительности интервала времени, равных 100 отсчетам (10 с). При этом первый интервал выбирался в промежутке между 100-м и 200-м отсчетами и соответствовал отсутствию загорания тестового материала. Второй интервал выбирался в промежутке между 200-м и 300-м отсчетами, который охватывал момент начала загорания соответствующего тестового горючего материала.

Исследование спектральных особенностей динамики опасных параметров ГС на интервалах отсутствия и начала загорания проводилось отдельно для каждого тестового материала в следующей последовательности: спирт, бумага, древесина и текстиль. В ходе эксперимента исследовался мгновенный амплитудный и фазовый спектры динамики опасных параметров ГС в лабораторной камере. Для восстановления начальных условий ГС в камере после каждого загорания тестового материала осуществлялась естественная вентиляция камеры в течение 5–7 минут.

## **5. Результаты исследования спектральных особенностей газовой среды при загораниях материалов**

### **5.1. Теоретическое обоснование исследования спектральных особенностей газовой среды при загораниях материалов**

Теоретическое обоснование исследования спектральных особенностей газовой среды при загораниях материалов базируется на представлении ГС помещения в виде некоторой сложной динамической системы. Внутри указанной системы находится некоторый очаг возможного загорания соответствующего горючего материала. В случае загорания материала ГС помещения возмущается. Эти возмущения проявляются в соответствующем изменении динамики опасных параметров ГС. Пусть состояние такой системы рассматриваемой системы в произвольный фиксированный момент времени характеризуется заданной совокупностью опасных параметров ГС. В качестве опасных параметров ГС будем рассматривать среднеобъемную температуру, плотность дыма и концентрацию СО. Для исследования спектральных особенностей текущей динамики опасных параметров ГС предлагается использовать метод прямого дискретного преобразования Фурье, применяемому к фиксированному набору дис-

кретных измерений исследуемого опасного параметра ГС до загорания и после загорания материала. Метод прямого дискретного преобразования Фурье для фиксированного набора дискретных измерений позволяет вычислять мгновенный спектр для данного набора измерений. Мгновенный спектр отличается тем, что в отличие других спектров позволяет охарактеризовать амплитудный частотный состав для исследуемого дискретного набора измерений и соответствующий этим частотам мгновенный фазовый спектр. Выбирая дискретный набор измерений для другого временного интервала динамики опасного параметра ГС, можно определить мгновенный амплитудный частотный состав и соответствующий этим частотам фазовый спектр, характерный для данного набора измерений. Это означает, что такой подход позволяет исследовать спектральные особенности динамики опасных параметров ГС при загораниях путем выбора соответствующего дискретного набора измерений до загорания и после загорания материала.

Операция вычисления прямого дискретного преобразования Фурье сводится к вычислению средних значений амплитуд и фаз дискретных гармонических составляющих, определяемых конкретным дискретным набором измерений для исследуемого интервала динамики опасных параметров ГС. Для дискретного фиксированного размера  $N$  набора измерений  $x(k)$  мгновенное ДПФ  $X(f)$  можно представить в следующем виде:

$$X(f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp(-j2\pi fk / N) / N, \quad (1)$$

где  $f, k=0, 1, \dots, N-1$ ;  $X(f)$  – ДПФ для произвольного параметра ГС и дискретной частоты  $f$ ;  $x(k)$  – дискретное измерение в момент  $k$  для исследуемого интервала динамики произвольного параметра ГС.

С учетом (1) величина  $|X(f)|$  будет определять мгновенный амплитудный спектр для дискретной частоты  $f$ , а величина  $\arg[X(f)]$  соответствующий мгновенный фазовый спектр (в радианах) для дискретной частоты  $f$ . В соответствии с представлением (1) были выполнены экспериментальные исследования спектральных особенностей (мгновенного амплитудного и фазового спектра) динамики опасных параметров ГС для фиксированных интервалов времени до и после загорания соответствующего тестового материала. Результаты указанных исследований представлены ниже. При исследовании каждой дискретной частоте  $f$  в (1) соответствовала круговая дискретная частота  $m$  (Hz), определяемая величиной  $f * 10 / (N)$ .

## 5. 2. Результаты исследования амплитудного и фазового спектров динамики опасных параметров газовой среды

Обработка экспериментальных данных осуществлялась в соответствии с выполнением следующих процедур. Первая процедура включала выполнение с помощью соответствующих датчиков дискретных измерений среднеобъемной температуры, концентрации СО и плотности дыма ГС в лабораторной камере.

Данная процедура выполнялась на заданных интервалах отсутствия и наличия загорания для каждого тестового материала. Вторая процедура состояла в сохранении результатов измерений в памяти компьютера. Реализация первой и второй процедуры выполнялась с использованием специального оборудования, сопрягающего выходы датчиков с компьютером, и разработанного программного обеспечения, которое позволяло оборудованию регистрировать и сохранять измеренные данные. Третья процедура состояла в вычислении амплитудного и фазового спектра по измеренным данным в соответствии с (1). На рис. 1–4 представлены результаты указанных вычислений. Амплитудный спектр определялся зависимостью амплитуды исследуемого опасного параметра ГС (в единицах измерения для соответствующего параметра) от дискретной частоты (в Герцах). Фазовый спектр определялся зависимостью фазы (в радианах) от дискретной частоты (в Герцах). Реализация третьей процедуры осуществлялась с помощью специальной разработанной программы в среде Маткад – 14.

На рис. 1 приведены амплитудные и фазовые спектры для среднеобъемной температуры, концентрации СО и плотности дыма ГС в лабораторной камере, полученные на фиксированных интервалах до и после загорания тестового материала в виде спирта.

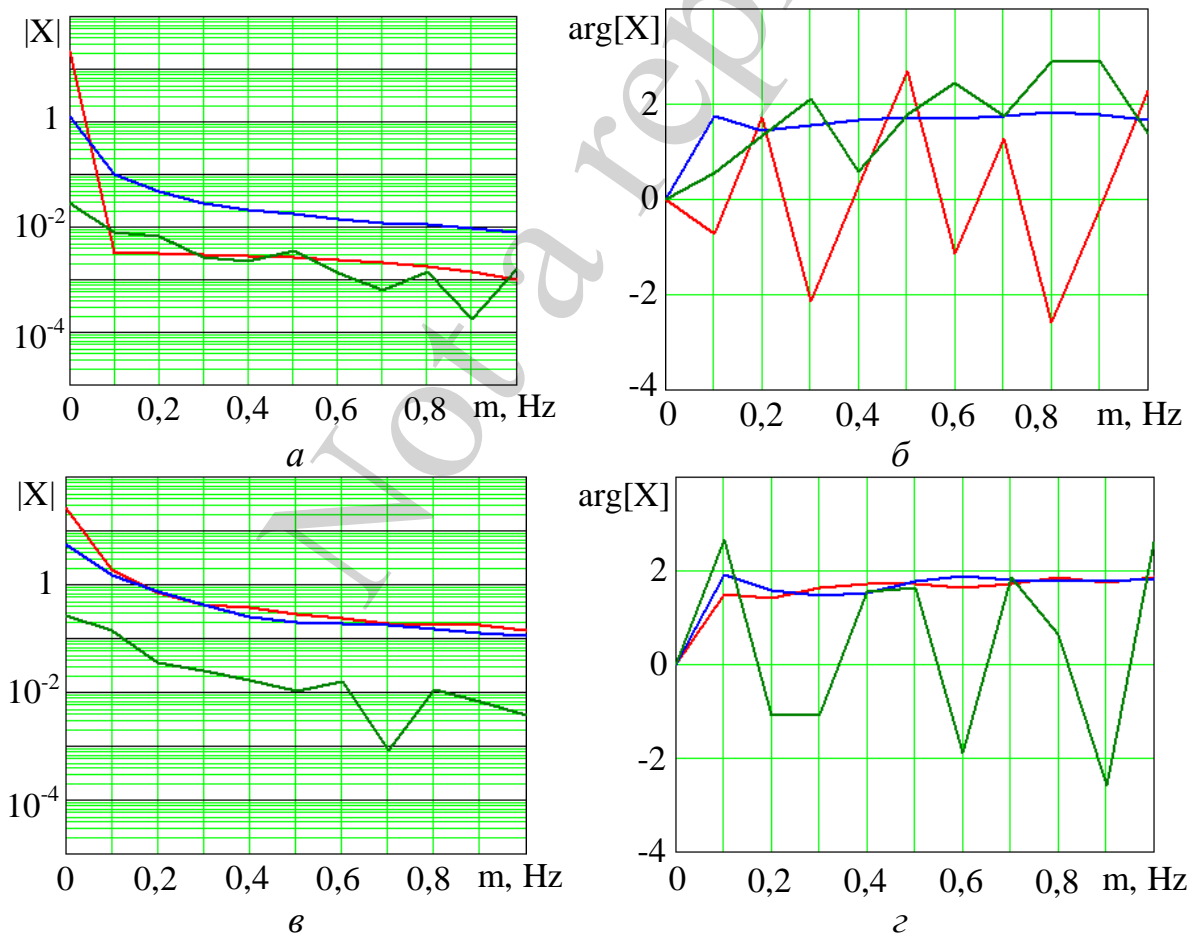


Рис. 1. Амплитудные и фазовые спектры для исследуемых параметров газовой среды камеры до и после загорания спирта: *a* – амплитудный спектр при отсутствии загорания; *б* – фазовый спектр при отсутствии загорания; *в* – амплитудный спектр при загорании; *г* – фазовый спектр при загорании

Аналогичные амплитудные и фазовые спектры для среднеобъемной температуры, концентрации CO и плотности дыма ГС камеры до и после начала загорания бумаги представлены на рис. 2.

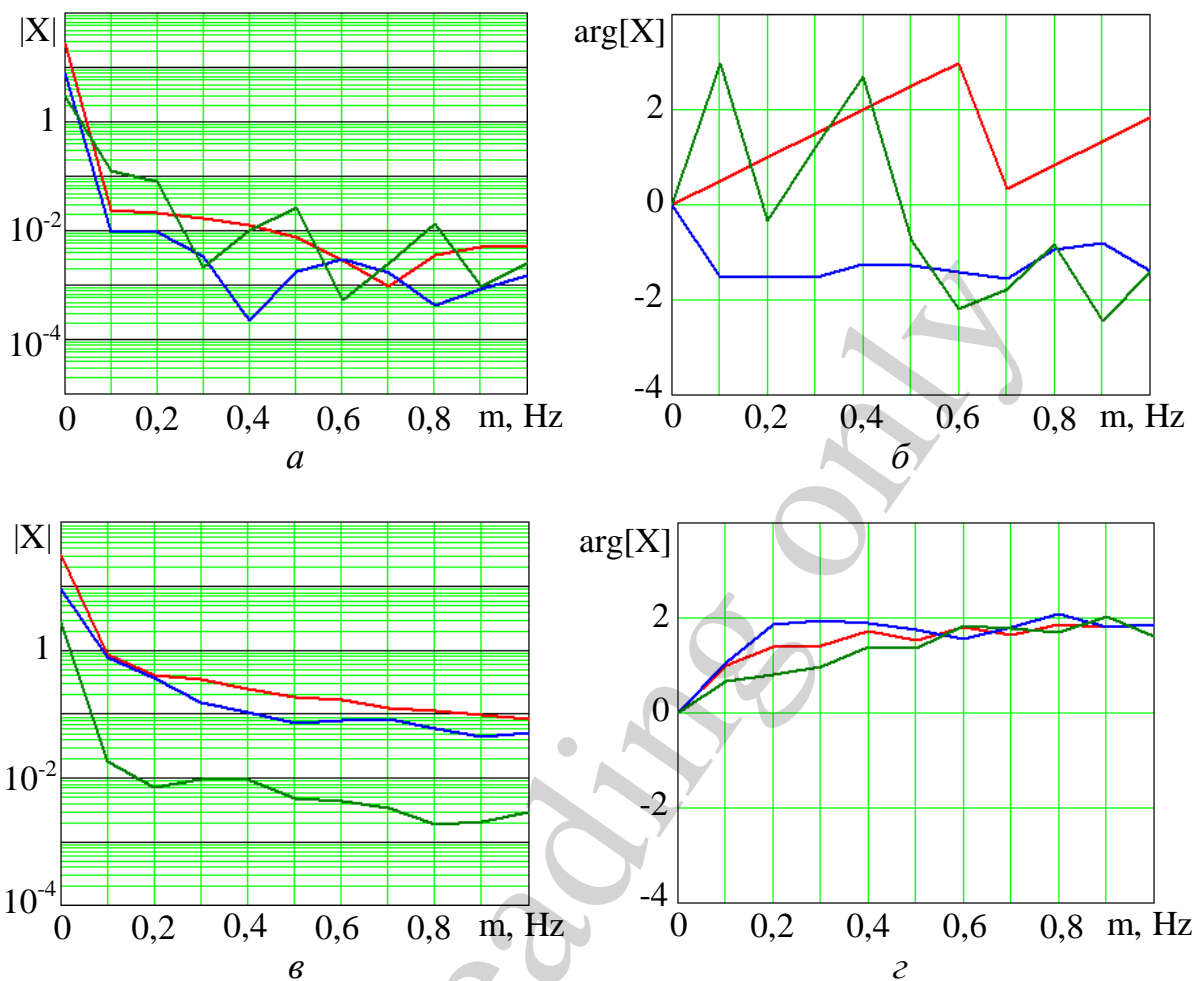


Рис. 2. Амплитудные и фазовые спектры для исследуемых параметров газовой среды камеры до и после загорания бумаги: *a* – амплитудный спектр при отсутствии загорания; *б* – фазовый спектр при отсутствии загорания; *в* – амплитудный спектр при загорании; *г* – фазовый спектр при загорании

На рис. 3 приведены амплитудные и фазовые спектры для среднеобъемной температуры, концентрации CO и плотности дыма ГС в камере на исследуемых интервалах до и после загорания древесины.

Аналогичные амплитудные и фазовые спектры для среднеобъемной температуры, концентрации CO и плотности дыма ГС в камере до и после загорания текстиля представлены на рис. 4.

На рис. 1–4 для указанных интервалов исследования красным цветом обозначены амплитудные и фазовые спектры динамики среднеобъемной температуры, синим цветом – динамики концентрации CO, а зеленым цветом – динамики плотности дыма ГС в экспериментальной камере.



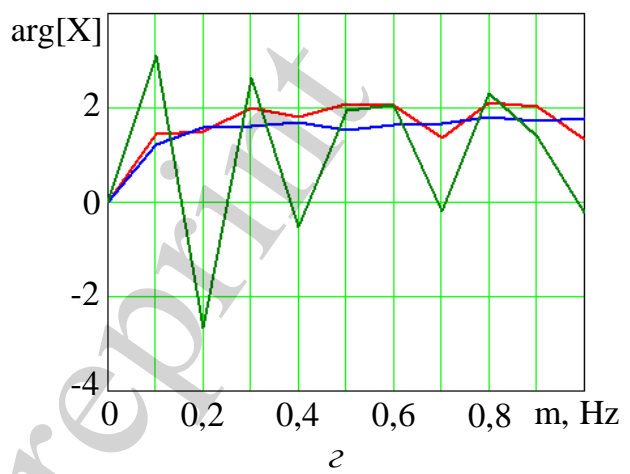
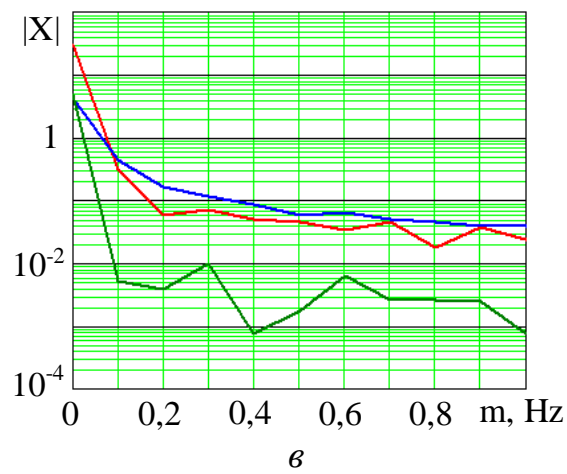
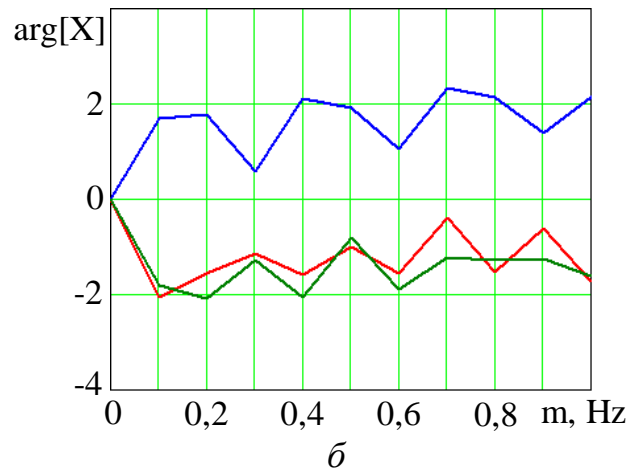
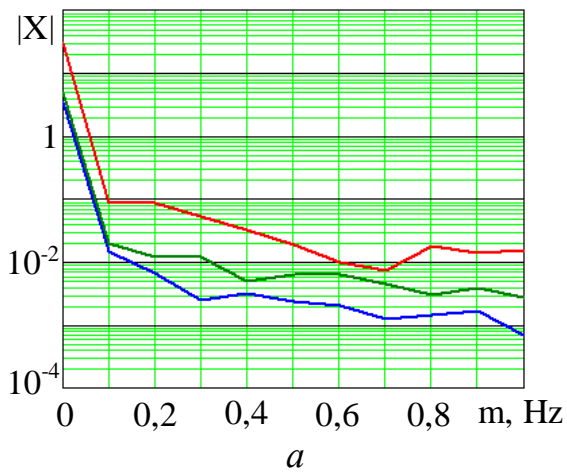
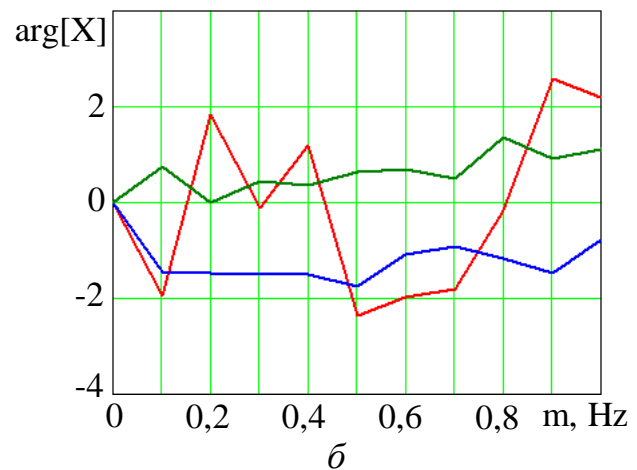
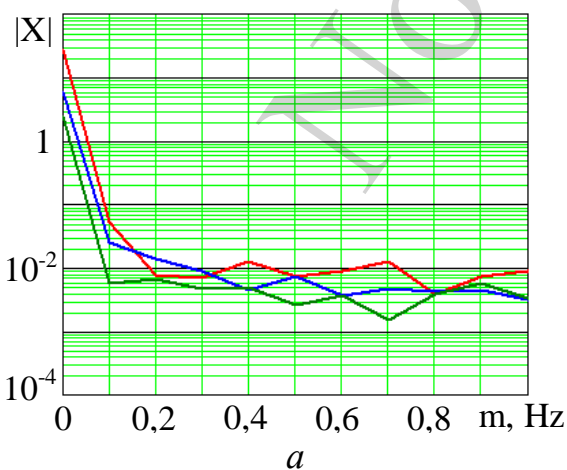


Рис. 3. Амплитудные и фазовые спектры для исследуемых параметров газовой среды камеры до и после загорания древесины: *a* – амплитудный спектр при отсутствии загорания; *б* – фазовый спектр при отсутствии загорания; *в* – амплитудный спектр при загорании; *г* – фазовый спектр при загорании



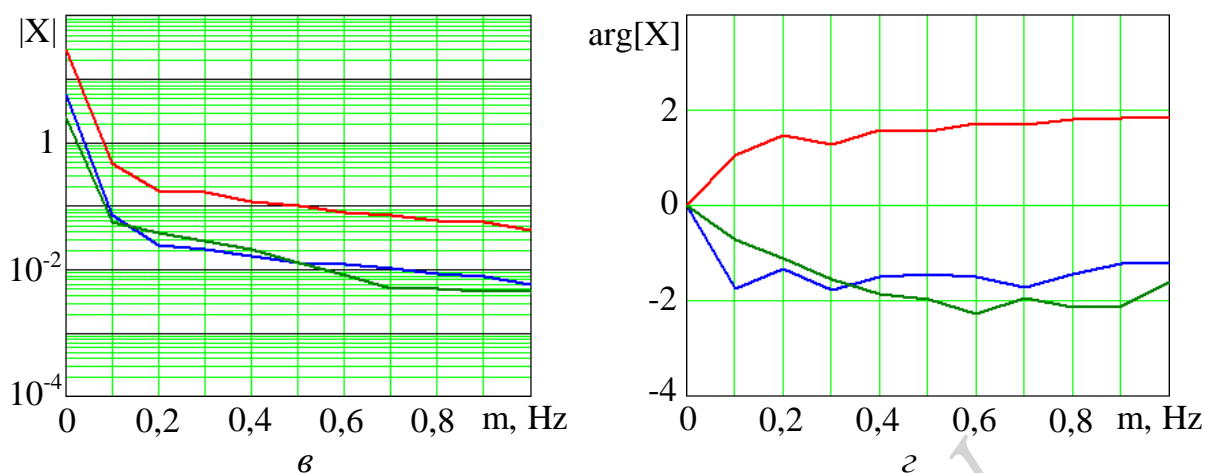


Рис. 4. Амплитудные и фазовые спектры для исследуемых параметров газовой среды камеры до и после загорания текстиля: *a* – амплитудный спектр при отсутствии загорания; *б* – фазовый спектр при отсутствии загорания; *в* – амплитудный спектр при загорании; *г* – фазовый спектр при загорании

### 6. Обсуждение результатов исследования спектральных особенностей газовой среды при загорании материалов

Из анализа данных на рис. 1–4 следует, что амплитудные спектры динамики исследуемых опасных параметров ГС в камере оказываются малоинформативными с точки зрения выявления загораний и предупреждения о пожаре в помещении. Объясняется это схожестью спектров. Амплитудные спектры свидетельствуют о преобладании в них низкочастотных составляющих, включая составляющую с нулевой частотой. Так, например, основной вклад в амплитудный спектр динамики исследуемых опасных параметров ГС в камере, следуя полученным результатам, вносят частотные составляющие диапазона 0–0,2 Гц. При этом амплитуда частотных составляющих свыше 0,2 Гц уменьшается с увеличением частоты. Более информативными с точки зрения выявления загораний и чувствительными к загораниям оказываются фазовые спектры динамики опасных параметров ГС. Например, фазовое распределение для частотных составляющих до 1 Гц в случае отсутствия загорания является неоднородным. Неоднородность значений фаз частотных составляющих для динамики исследуемых опасных параметров ГС в этом случае является случайной и может изменяться от  $-130^\circ$  до  $+130^\circ$ . При этом в случае загорания материала случайный разброс фаз для частотных составляющих динамики исследуемых опасных параметров ГС существенно уменьшается (рис. 2, *г*). Например, при загорании спирта случайный разброс фаз частотных составляющих существенно уменьшается для динамики среднеобъемной температуры и концентрации СО (рис. 1, *г*). При этом для плотности дыма случайный разброс фаз остается значительным. Аналогичная ситуация наблюдается и в случае загорания древесины (рис. 3, *г*). Для загорания текстиля случайный разброс фаз частотных составляющих существенно уменьшается для всех исследуемых параметров ГС (рис. 4, *г*). Однако знак максимальных значений фаз частотных составляющих при этом оказывается различным и зависит от исследуемого опасного парамет-

ра ГС. Так, например, для динамики среднеобъемной температуры знак максимальных значений фазы оказывается положительным, а для динамики концентрации СО и плотности дыма – отрицательным.

Таким образом, результаты приведенных экспериментальных исследований свидетельствуют, что характер случайного разброса фаз частотных составляющих динамики опасных параметров ГС зависит от типа материала загорания. Это означает, что по характеру неравномерности фазового спектра динамики опасных параметров ГС в принципе можно не только выявлять загорания в помещениях, но и распознавать тип материала загорания. Однако следует заметить, что использование рассматриваемого спектрального подхода не позволяет получить информацию о времени появления конкретных частотных составляющих спектра (их амплитуд и фаз). Поэтому спектральный подход не обеспечивает временную локализацию загораний, которая является важным показателем для предупреждения пожара. При этом время загорания при рассматриваемом подходе определяется только временным положением интервала выборки данных для соответствующего опасного параметра ГС. Кроме того точность вычисления амплитудного и фазового спектров зависит от размера этой выборки. При этом, чем больше размер выборки данных, тем точнее вычисляются указанные мгновенные спектры. Например, в эксперименте размер выборки определялся 100 отсчетами, следующими с интервалом 0,1 с. Это означает, что интервал анализа в эксперименте составлял 10 с. Поэтому полученные результаты исследования спектральных особенностей динамики опасных параметров ГС позволяет выявлять изменение спектрального состава динамики только для фиксированных интервалов времени выборки данных. В эксперименте этот интервал составлял 10 с. Поэтому для указанного интервала разрешение по частоте соответствует величине 0,1 Гц.

Преимущество данного исследования заключается новизне и оригинальности результатов, связанных со спектральными особенностями динамики опасных параметров ГС и возможности их использования для раннего выявления загораний и предупреждения о ПП.

К ограничениям исследования можно отнести то, что полученные результаты получены на основе экспериментальных измерений опасных параметров ГС в лабораторной камере. В связи с этим проверка полученных результатов нуждается в проведении дополнительных огневых испытаний с учетом горючих материалов, характерных для реальных помещений объектов.

## **7. Выводы**

1. Выполнено теоретическое обоснование проводимых исследований спектральных особенностей динамики основных опасных параметров газовой среды при загораниях материалов. Базовым подходом при этом является вычисление прямого дискретного преобразования Фурье для одинаковых по числу дискретных измерений интервалов времени исследуемой динамики опасных параметров газовой среды до и после загорания материала. При таком подходе дискретное преобразование Фурье позволяет определять мгновенный амплитудный и мгновенный фазовый спектры для рассматриваемых временных интерва-

лов. Это позволяет исследовать особенности распределения мгновенных амплитуд и фаз гармонических составляющих в спектре динамики опасных параметров газовой среды до и после загорания материалов.

2. Исследованы амплитудный и фазовый спектры динамики основных опасных факторов газовой среды при загорании тестовых материалов в лабораторной камере. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что характер амплитудного спектра оказывается малоинформативным с точки зрения выявления загораний и недостаточно чувствительным к загораниям. Объясняется это схожестью амплитудных спектров. Амплитудные спектры характеризуются преобладанием в них низкочастотных составляющих, включая частотную составляющую с нулевой частотой. Установлено, что основной вклад в амплитудный спектр динамики исследуемых опасных параметров газовой среды в камере вносят частотные составляющие диапазона 0–0,2 Гц. При этом вклад в амплитудный спектр частотных составляющих свыше 0,2 Гц значительно уменьшается с ростом частоты. Более информативными и чувствительными с точки зрения выявления загораний оказываются фазовые спектры динамики опасных параметров газовой среды для высокочастотных составляющих. Установлено, что для фазового спектра информативным является характер случайного разброса фаз для частотных составляющих, превышающих 0,2 Гц. При этом характер разброса фаз для указанных частотных составляющих в спектре зависит от типа материала загорания. Показано, что по характеру распределения фаз частотных составляющих спектра динамики опасных параметров газовой среды можно не только выявлять загорания на ранних стадиях и предупреждать о пожаре в помещениях, но и распознавать тип материала загорания. Однако результаты исследований показывают, что фазовый спектр динамики опасных параметров газовой среды при загораниях не позволяет осуществлять точную локализацию во времени начала загораний. Временная локализация загорания при этом определяется текущим временным положением строга выборки измерений, используемых для определения мгновенного спектра динамики опасного параметра газовой среды. Отмечается, что точность вычисления амплитудного и фазового спектров зависит от размера выборки измерений.

### **Литература**

1. Vambol, S., Vambol, V., Bogdanov, I., Suchikova, Y., Rashkevich, N. (2017). Research of the influence of decomposition of wastes of polymers with nano inclusions on the atmosphere. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (90)), 57–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118213>
2. Tan, P., Steinbach, M., Kumar, V. (2005). *Introduction to Data Mining*. Addison Wesley, 864.
3. Semko, A. N., Beskrovnaya, M. V., Vinogradov, S. A., Hritsina, I. N., Yagudina, N. I. (2014). The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 52 (3), 655–664.
4. 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>

5. 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>

6. 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>

7. 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>

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. Reproduced with permission from fire loss in the United States during 2019 (2020). National Fire Protection Association.

10. 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>

11. 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.

12. Kustov, M. V., Kalugin, V. D., Tutunik, V. V., Tarakhno, E. V. (2019). Physicochemical 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: <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99>

13. 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>

14. 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>

15. 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>

16. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E. (2017). Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (86)), 32–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96694>

17. 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>

18. 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>

19. Cheng, C., Sun, F., Zhou, X. (2011). One fire detection method using neural networks. *Tsinghua Science and Technology*, 16 (1), 31–35. doi: [https://doi.org/10.1016/s1007-0214\(11\)70005-0](https://doi.org/10.1016/s1007-0214(11)70005-0)

20. Ding, Q., Peng, Z., Liu, T., Tong, Q. (2014). Multi-Sensor Building Fire Alarm System with Information Fusion Technology Based on D-S Evidence Theory. *Algorithms*, 7 (4), 523–537. doi: <https://doi.org/10.3390/a7040523>

21. BS EN 54-30:2015. Fire detection and fire alarm systems. Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of carbon monoxide and heat sensors. doi: <https://doi.org/10.3403/30266860>

22. BS EN 54-31:2014. Fire detection and fire alarm system. Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of smoke, carbon monoxide and optionally heat sensors. doi: <https://doi.org/10.3403/30256418u>

23. ISO 7240-8:2014. Fire detection and alarm systems. Point-type fire detectors using a carbon monoxide sensor in combination with a heat sensor. doi: <https://doi.org/10.3403/30280584>

24. Aspey, R. A., Brazier, K. J., Spencer, J. W. (2005). Multiwavelength sensing of smoke using a polychromatic LED: Mie extinction characterization using HLS analysis. *IEEE Sensors Journal*, 5 (5), 1050–1056. doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2005.845207>

25. Chen, S.-J., Hovde, D. C., Peterson, K. A., Marshall, A. W. (2007). Fire detection using smoke and gas sensors. *Fire Safety Journal*, 42 (8), 507–515. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.01.006>

26. Shi, M., Bermak, A., Chandrasekaran, S., Amira, A., Brahim-Belhouari, S. (2008). A Committee Machine Gas Identification System Based on Dynamically Reconfigurable FPGA. *IEEE Sensors Journal*, 8 (4), 403–414. doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2008.917124>

27. Skinner, A. J., Lambert, M. F. (2006). Using Smart Sensor Strings for Continuous Monitoring of Temperature Stratification in Large Water Bodies. *IEEE Sensors Journal*, 6 (6), 1473–1481. doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2006.881373>

28. Cheon, J., Lee, J., Lee, I., Chae, Y., Yoo, Y., Han, G. (2009). A Single-Chip CMOS Smoke and Temperature Sensor for an Intelligent Fire Detector. *IEEE Sensors Journal*, 9 (8), 914–921. doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2009.2024703>

29. Wu, Y., Harada, T. (2004). Study on the Burning Behaviour of Plantation Wood. *Scientia Silvae Sinicae*, 40, 131.
30. Zhang, D., Xue, W. (2010). Effect of Heat Radiation on Combustion Heat Release Rate of Larch. *Journal of West China Forestry Science*, 39, 148.
31. Ji, J., Yang, L., Fan, W. (2003). Experimental Study on Effects of Burning Behaviours of Materials Caused by External Heat Radiation. *Journal of Combustion Science and Technology*, 9, 139.
32. Peng, X., Liu, S., Lu, G. (2005). Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. *Journal of Chongqing University*, 28, 122.
33. 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>
34. 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>
35. 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>
36. 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 Enterprise Technologies*, 4 (10 (100)), 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176579>
37. McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. (2016). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Vol. 3.* National Institute of Standards and Technology.
38. Floyd, J., Forney, G., Hostikka, S., Korhonen, T., McDermott, R., McGrattan, K. (2013). *Fire Dynamics Simulator. User's Guide. V. 6.* National Institute of Standard and Technology.
39. Полстянкин, Р. М., Поспелов, Б. Б. (2015). Стохастические модели опасных факторов и параметров очага загорания в помещениях. *Проблемы пожарной безопасности*, 38, 130–135.
40. Heskestad, G., Newman, J. S. (1992). Fire detection using cross-correlations of sensor signals. *Fire Safety Journal*, 18 (4), 355–374. doi: [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(92\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0379-7112(92)90024-7)
41. Gottuk, D. T., Wright, M. T., Wong, J. T., Pham, H. V., Rose-Pehrsson, S. L., Hart, S. et. al. (2002). *Prototype Early Warning Fire Detection Systems: Test Series 4 Results.* NRL/MR/6180-02-8602. Naval Research Laboratory.
42. 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>