

Метод предотвращения чрезвычайных ситуаций вследствие пожара в помещении путем оперативного контроля газовой среды

Б. Б. Поспелов, Р. Г. Мелешенко, А. Н. Крайнюков, К. М. Карпец,
Е. А. Петухова, Ю. С. Безуглая, Т. Ю. Бутенко, В. В. Горина,
П. Ю. Бородич, Э. А. Кочанов

Запропоновано метод запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного характеру унаслідок пожежі в приміщенні на основі використання поточної міри рекурентності приростів вектора стану газового середовища для виявлення можливих небезпек ураження обслуговуючого персоналу і руйнування обладнання в приміщеннях об'єкта. Дана міра дозволяє здійснювати оперативний контроль динаміки стану газового середовища і виявляти небезпечні стани, пов'язані з виникненням пожежі в приміщеннях об'єкта. Показано, що при виникненні небезпеки у вигляді пожежі газове середовище приміщенні є засобом передачі впливів від джерела займання. Проведена перевірка запропонованого методу на прикладі виявлення небезпеки у вигляді займань спирту і паперу в модельній камері, що імітує негерметичні приміщення об'єкта. Встановлено, що до моменту початку займання оцінка ймовірності рекурентності приростів станів газового середовища має тенденцію зростання від нуля до 0,5 для спирту і 0,6 для паперу. Відзначається, що тенденція зростання оцінки ймовірності рекурентності приростів станів газового середовища характеризується різкою і періодичною зміною зазначеної оцінки ймовірності. Виявлено, що до виникнення небезпеки, пов'язаної із займанням матеріалу, динаміка приростів характеризується випадковою зміною фазових станів, відповідних режиму динамічної стійкості. При виникненні небезпеки у вигляді загоряння матеріалу оцінка ймовірності рекурентності збільшень стає близькою до нуля. Ця ситуація відповідає втраті динамічної стійкості стану газового середовища. Після цього динаміка приростів характеризується окремими випадковими точками рекурентності, що належать області головної діагоналі рекурентної діаграми. Подальший розвиток даної небезпеки призводить до хаотичного характеру приростів станів газового середовища. Показано, що контроль динаміки приростів станів газового середовища дозволяє виявляти моменти виникнення небезпеки, пов'язаної із загорянням матеріалів в приміщеннях об'єкта. Це свідчить про працездатність запропонованого методу запобігання надзвичайним ситуаціям, пов'язаних з пожежами на об'єктах, шляхом раннього виявлення загорянь матеріалів на основі виявлення моментів, при яких відбувається зрив стійкості приростів станів газового середовища в приміщеннях

Ключові слова: надзвичайна ситуація, загоряння у приміщенні, поточна міра рекурентності, приріст станів, газове середовище, рекурентна діаграма

1. Введение

Известно, что любая чрезвычайная ситуация (ЧС) возникает только в случае одновременного наличия объекта опасности (опасности) и соответствующего объекта ее воздействия. При этом мировая статистика свидетельствует о том, что ежегодное количество ЧС техногенного характера более чем втрое превышает число ежегодных чрезвычайных ситуаций природного и иного характера [1]. Признанным является факт, что основными источниками ЧС техногенного характера являются различные типы потенциально опасных объектов [2]. Результаты долгосрочного прогнозирования [3] и статистики ЧС свидетельствуют о наличии устойчивой тенденции роста ЧС, в первую очередь за счет расширения числа опасностей. В случае ЧС опасность, оказывая влияние на объект воздействия, приводит к человеческим жертвам, ущербу здоровью людей, разрушению или уничтожению объектов [4] и других материальных ценностей, а также наносит серьезный ущерб окружающей среде [5]. Следует заметить, что во многих случаях предпосылки для появления опасностей в техногенной сфере, влекущих за собой ЧС, создает сам человек. Поэтому процесс взаимодействия человека со средой в ходе производственной деятельности должен минимизировать риск появления таких опасностей, чтобы избежать значительных расходов на ликвидацию возникших ЧС [6]. Одним из важных направлений снижения риска опасностей принято считать мероприятия по предупреждению возможных ЧС. Реализация методов предупреждения ЧС позволяет в 2–3 раза сократить затраты на ликвидацию последствий [7], при этом значительно уменьшить или полностью избежать потери населения. Мировая статистика свидетельствует о том, что большая часть ЧС техногенного характера обуславливается пожарами в помещениях, приводящими к поражению и гибели обслуживающего персонала и значительному разрушению технологического оборудования и самих помещений и объектов. В этой связи, объективная сложность раннего выявления пожаров на объектах технической сферы, а также многообразие потенциально-опасных объектов обуславливают актуальность предупреждения ЧС на объектах, обусловленных пожарами.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Газовая среда помещений в условиях опасности представляет собой сложную систему, обладающую диссипативной структурой, нелинейной динамикой и самоорганизацией. В такой системе классические методы не способны выявлять имеющиеся сложные связи между элементами, поскольку основываются на линейных принципах, которые обычно нарушаются [8]. Это приводит к ложным представлениям о реальной динамике состояния газовой среды в помещениях при возникновении опасности (пожара) не позволяет на ее основе осуществлять предупреждение ЧС на объектах. Однако характер динамики состояния газовой среды на этапе возникновения опасности в виде пожара имеет первостепенное значение для предупреждения поражения и гибели обслуживающего персонала, а также разрушения технологического оборудования и агрегатов в помещениях объектов [9]. Следует отметить, что в настоящее время количественные методы нелинейной динамики при наличии шумов и нестационарных условий являются активной об-

ластью исследований во многих дисциплинах [10, 11]. В частности, в геофизике применяются методы анализа временных рядов с позиции теории динамических систем и фрактальных множеств [12]. При этом методы предупреждения ЧС техногенного характера, связанные с пожарами на объектах, не рассматриваются. Изучение процесса возникновения пожара в помещениях на основе экспериментальных данных выполнено в [13]. Оценка влияния теплового излучения на скорость процесса высвобождения тепла в типовых материалах представлена в [14]. Экспериментальное изучение режимов горения различных материалов под внешним тепловым воздействием, выполнено в работе [15]. Исследованию скорости тепловыделения при пожаре в помещениях посвящена работа [16]. Отмечается, что динамика состояния газовой среды в помещениях на этапе возгорания материалов носит сложный, нелинейный и нестационарный характер. Повышению быстродействия известных методов выявления возгораний в помещениях посвящена работа [17]. При этом новые методы, способные выявлять изменения в состоянии газовой среды при возгораниях, не рассматриваются, а динамика состояний газовой среды не изучается. Методы предупреждения ЧС на основе выявления изменений в состояниях газовой среды не рассматриваются. Самонастраивающиеся методы выявления возгораний рассматриваются в работах [18, 19]. Однако самонастраивающиеся методы основываются только на усредненных значениях состояний отдельных параметров газовой среды. При этом текущая динамика параметров газовой среды при возгораниях в помещениях не учитывается и не анализируется. Результаты, представленные в [20], ограничиваются анализом динамики адаптивного порога и вероятности обнаружения возгораний. Динамика состояний параметров газовой среды и их приращений при возгораниях материалов не изучается и не рассматривается. Методы предупреждения ЧС, связанные с пожарами, на основе анализа приращений состояния газовой среды в помещениях не рассматриваются. Экспериментальному исследованию временных автокорреляций и парных корреляций динамики основных параметров состояния газовой среды при возгораниях в модельном помещении посвящена работа [21]. Отмечается, что для выявления возгораний в помещениях более важными оказываются текущие показатели структурных особенностей взаимодействия и изменения параметров состояния газовой среды, а не их усредненные значения. Например, известны методы, пригодные для выявления опасных параметров газовой среды при пожаре [22]. Однако данные методы базируются на стационарном подходе, позволяющем выявлять лишь усредненные энергетические показатели для параметров газовой среды по лагам и частотам. При этом указанные методы не позволяют учитывать особенности частотно-временной структуры взаимодействия параметров состояния газовой среды.

В [23] рассматриваются методы временной и частотной локализации. Однако отмечается, что проблема частотно-временной локализации остается до конца не решенной. Указывается, что известные методы оказываются сложными в реализации и малоприспособленными для оперативного выявления возгораний в помещениях и на его основе предупреждения ЧС. В силу нестационарного характера параметров состояния газовой среды в помещениях при возникновении возгораний в [24] рассматривается метод, основанный на применении преобра-

зования Фурье к стационарным фрагментам нестационарной динамики состояний. Однако при выявлении возгораний выделить отрезки стационарности в динамике состояний опасных параметров газовой среды обычно затруднительно. При этом газовая среда как сложная динамическая система, генерирующая состояния опасных параметров при возгораниях, не рассматривается и не исследуется. Экспериментальному исследованию динамики скорости горения материалов в закрытых и вентилируемых помещениях посвящена работа [25]. Однако отсутствуют данные о структурных взаимодействиях опасных параметров газовой среды при возгораниях материалов в помещениях. Исследованию приращений отдельных опасных параметров газовой среды в качестве признаков возгораний посвящена работа [26]. Однако результаты ограничиваются анализом традиционных статистических показателей приращений параметров газовой среды. Исследование структурных особенностей динамики состояний газовой среды в многомерном фазовом пространстве не рассматривается. При этом, следуя [21–26], утверждается, что возгорания являются источником нарушения исходного равновесного состояния газовой среды в помещениях объектов. Состояние газовой среды при возгораниях в общем случае характеризуется более сложными нелинейными взаимодействиями его основных параметров.

Общие методы частотно-временной идентификации нелинейных динамических систем рассматриваются в работах [27, 28]. Метод анализа нестационарных параметров процессов, базирующийся на кратковременном преобразовании Фурье, описан в работе [29]. При этом следует заметить, что методы, рассмотренные в работах [27–29], оказываются достаточно сложными в реализации и не могут рассматриваться в качестве конструктивных для выявления возгораний в помещениях и предупреждения возникновения ЧС техногенного характера, связанных с пожарами. Методы нелинейного анализа динамики систем, базирующиеся на подходах, отличных от Фурье, в работах [27–29] не рассматриваются. Хотя для выявления возгораний и разработки методов предупреждения ЧС, связанных с пожарами на объектах, прежде всего, необходимы исследования структуры динамики состояний и приращений газовой среды в многомерном фазовом пространстве. Однако до настоящего времени такие результаты в известной литературе отсутствуют. В работе [30] рассматривается применение частотно-временного метода к исследованию структурных особенностей динамики опасных параметров газовой среды при возгораниях в помещениях. Отмечается, что данный метод оказывается сложным в реализации и обладает недостаточной оперативностью. При этом эффективность метода существенно зависит от вида и параметров реализуемых оконных функций, используемых для усреднения. Кроме этого метод, являясь энергетическим, не позволяет исследовать структуру динамики опасных параметров газовой среды в соответствующем фазовом пространстве.

Таким образом, в силу сложности динамики состояний и взаимодействия опасных параметров газовой среды для выявления ранних возгораний в помещениях применяются различные частотно-временные методы. Однако для указанных методов характерны: сложность, ограниченная чувствительность выявления и область применения, а также недостаточная оперативность. Поэтому их при-

менение для предупреждения ЧС, связанных с пожарами на объектах, с помощью оперативного контроля состояния газовой среды в помещениях оказывается проблематичным. Более конструктивными и перспективными для предупреждения таких ЧС оказываются фрактальные методы нелинейной динамики [31]. Данные методы основаны на использовании текущих мер рекуррентности приращений состояния газовой среды при возникновении опасности в виде пожара. Поэтому важной и нерешенной частью рассматриваемой проблемы является разработка метода предупреждения ЧС техногенного характера, связанных с пожарами на объекте, основанного на использовании текущих мер рекуррентности приращений состояния газовой среды при возгораниях в помещениях.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка метода предупреждения ЧС техногенного характера вследствие пожара с помощью оперативного контроля состояния газовой среды и использования текущей меры рекуррентности приращений состояния газовой среды в помещении.

Для достижения цели работы были поставлены задачи:

- выполнить системный анализ возникновения ЧС техногенного характера вследствие пожара и возможности их предупреждения путем контроля состояния газовой среды в помещениях объекта, а также теоретически обосновать метод предупреждения ЧС на основе оценки текущей меры рекуррентности приращений состояния газовой среды в помещении;

- выполнить проверку работоспособности метода на примере состояния газовой среды при возгорании спирта и бумаги в камере, имитирующей негерметичное помещение объекта.

4. Системный анализ возникновения ЧС вследствие пожара и обоснование метода их предупреждения

Разработка метода базируется на результатах системного анализа возникновения ЧС техногенного характера, связанных с пожарами в помещениях объекта и возможностях использования для их предупреждения оценки состояния газовой среды. Пусть произвольное помещение объекта представляет некоторую систему $S = O \cup E$, состоящую из объекта опасности O (источника пожара в виде возгорания материала), который является потенциальным источником возникновения ЧС, и окружающей среды $E = G \cup R$, где G – газовая среда помещения, а R – объект, который подвергается воздействию объекта опасности (обслуживающий персонал, технологическое оборудование, агрегаты и конструкция объекта). В рассматриваемой системе объект O оказывает через газовую среду помещения G влияние на объект R . Объект опасности O характеризуется опасными состояниями $h \in O$. Такими состояниями могут быть, например, возгорания различных материалов или взрывы оборудования и агрегатов в помещении. Это означает, что состояния O в моменты времени $t \in [0, T]$ будут описываться случайной функцией $h=h(t)$. Газовая среда G помещения, посредством которой осуществляется перенос опасных состояний от источника к объ-

екту воздействия, также характеризуется состоянием $g \in G$. При этом параметрами состояния газовой среды могут быть, например, опасные для обслуживающего персонала факторы газовой среды. Прежде всего, это температура, концентрация угарного газа и плотность дыма. В различные моменты времени состояние G характеризуется случайной функцией $g=g(t)$. Наконец, состояние объекта R , который подвергается воздействию объекта опасности, может быть охарактеризовано некоторым скалярным параметром $l \in R$, который в общем случае представляет величину потерь (ущерба) наносимого объекту R воздействием объекта O . При этом параметр l определяется состоянием системы $SG = O \cup G$ и представляет собой некоторый функционал $l=l(h(t),g(t))$.

Однако в рассматриваемой системе $S = O \cup E$ состояние газовой среды $g=g(t)$ в помещении определяется состоянием $h=h(t)$ объекта опасности O . Поэтому параметр l будет определяться текущим состоянием газовой среды в помещении. Например, если ущерб, наносимый объекту R , зависит от состояния $g=g(x, t)$ опасных факторов газовой среды в точке пространства x помещения объекта, то параметр l может быть представлен в виде соответствующей одномерной интегральной функции, определяющей, например, ингаляционную дозу опасных факторов газовой среды для обслуживающего персонала. Таким образом, предупреждение ЧС техногенного характера вследствие пожара на объекте, возможно на основе текущего контроля состояния $g=g(t)$ опасных факторов газовой среды в помещениях, в которых размещается технологическое оборудование и обслуживающий персонал, с учетом потерь наносимого объекту R воздействием объекта O .

Состояния $g=g(t)$ газовой среды в помещениях зависят не только от источника опасности, но и подвержены воздействию различных возмущений. В большинстве практических случаев данные о возмущениях отсутствуют и единственной информацией являются измерения состояний газовой среды с учетом возмущений [32]. Обычно измерение состояний газовой среды выполняется в дискретные моменты времени [33]. В общем случае измерительная информация для произвольного дискретного момента времени i может быть представлена m -мерным вектором состояния опасных факторов

$$\bar{z}_i = \bar{d}_i + \bar{\Delta}_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1, \quad (1)$$

где \bar{d}_i – вектор текущих состояний газовой среды, обусловленных опасностью; $\bar{\Delta}_i$ – вектор текущих возмущений состояния газовой среды; N_s – размер выборки измерений указанного вектора состояний.

Применение метода РР для вектора состояний (1) позволяет отображать траектории состояния газовой среды, рассматриваемые в m -мерном фазовом пространстве, на двумерную двоичную матрицу размером $N_s \times N_s$. При этом единственный элемент этой матрицы при некоторых моментах времени i и j будет соответствовать рекуррентным состояниям (РС) газовой среды, а координатные

оси RP будут определяться дискретным временем измерения. Математически данное отображение можно представить, следуя [31], соотношением

$$R_{i,j}^{m,\varepsilon} = \Theta\left(\varepsilon - \|\bar{z}_i - \bar{z}_j\|\right), \quad \bar{z}_i \in \Omega^m, \quad i, j = 1, 2, \dots, N_s, \quad (2)$$

где $\Theta()$ – функция Хевисайда; ε – размер окрестности для выявления РС \bar{z}_i в момент времени i , а $\|\cdot\|$ – оператор вычисления нормы. Исследование динамики состояний различных сложных систем на основе (2) стало популярным благодаря появлению методов количественного анализа РС [34]. Данные методы основываются на соответствующих мерах, позволяющих численно измерять сложности RP, отображающих особые состояния в исследуемых системах. В [35] предложены меры рекуррентности состояний для концентраций загрязнений атмосферного воздуха, основанные на использовании (2). Однако известные меры не могут использоваться для предупреждения ЧС путем контроля состояния газовой среды при возникновении возгорания в помещениях объекта. Основным ограничением известных мер является недостаточная оперативность выявления изменений динамики состояний газовой среды при возгораниях в помещениях.

С целью обеспечения оперативности разработанных в [35] мер рекуррентности и возможности их использования для выявления изменений в динамике состояний газовой среды при возгораниях в помещениях предлагается вначале модифицировать (2) в соответствии с выражением

$$TRP_{i,j}^{m,\varepsilon} = \text{if}\left(i \neq j \bigcap j \leq i, R_{i,j}^{m,\varepsilon}, 0\right). \quad (3)$$

Выражение (3) по сравнению с (2) определяет оперативный способ вычисления RP в реальном времени наблюдения. На основании выражения (3) по аналогии с [34] может быть предложена текущая мера оценки РС газовой среды в помещениях объекта, определяемая

$$M_2(i, \varepsilon) = \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i TRP_{i,k}^{m,\varepsilon}. \quad (4)$$

Мера (4) позволяет оценивать РС на основе (3) для каждого текущего момента времени i с учетом размера ε окрестности рекуррентных состояний. Данная мера зависит от размера окрестности ε , который должен выбираться из условия обеспечения аутентичности оценки (4) реальным значениям РС газовой среды в помещениях объекта. Это означает, что с помощью меры (4), возможно, выявлять динамику повторяемости состояний в текущем времени. При этом оценка (4) РС численно характеризует вероятность повторяемости состояний для текущего момента времени. Это позволяет исследовать особенности перехода от устойчивых состояний к неустойчивым состояниям в различных динамических системах. В этом случае разрабатываемый метод предупреждения ЧС техногенного характера, связанных с пожарами на объектах, может базировать-

ся на оперативной оценке (4). При этом для эффективного выявления изменений в динамике состояний газовой среды помещений предлагается оценку (4) вычислять не для состояний газовой среды в помещениях, а для приращений состояний, измеренных в текущий и предшествующий моменты времени. Объясняется это тем, что приращения состояний газовой среды оказываются более чувствительными к возгораниям в помещениях. При этом установлено, что возгорания в помещениях приводят к срыву устойчивости именно приращений состояний газовой среды [36, 37]. Следует заметить, что в общем случае на основе меры (4) можно осуществлять прогнозирование моментов, при которых происходит потеря устойчивости приращений состояния газовой среды в помещениях, обусловленная возгораниями. При этом прогнозирование на момент $i+1$ по текущим наблюдениям до момента времени i может осуществляться, например, методом экспоненциальной фильтрации или другими методами. Таким образом, предложенный метод предупреждения ЧС техногенного характера вследствие пожара основывается на оперативном контроле состояния газовой среды в помещениях объекта с использованием меры (4) для приращений состояния газовой среды. При этом оперативное выявление возгораний в помещениях позволяет своевременно принять меры по их ликвидации и не допустить развитие ЧС, представляющую значительную угрозу жизни персоналу, выходу из строя оборудования и разрушения конструкций помещения.

5. Проверка работоспособности метода на примере состояния газовой среды при возгорании спирта и бумаги в модельной камере

Проверка метода предупреждения ЧС техногенного характера вследствие пожара путем оперативного контроля состояния газовой среды в помещениях осуществлялась на основе экспериментальных данных, полученных при возгорании спирта и бумаги в моделирующей камере [30]. В ходе эксперимента измерялись составляющие вектора состояний газовой среды в камере, определяемые концентрацией СО, температурой и плотностью дыма. Измерения указанных состояний производились в дискретные моменты времени t_i с шагом $\Delta t=0,1$ секунды, для $i=0, 1, 2, \dots, 400$. При этом номер отсчета i соответствовал моменту времени t_i интервала контроля состояний газовой среды. Это означает, что для отсчета i значение вектора состояний газовой среды определялось величиной \bar{z}_i . Перед поджогом бумаги производилась естественная вентиляция камеры в течение 5–7 минут. Поджог спирта и бумаги в камере производился в районе 200 отсчета. В качестве измерителей плотности дыма, температуры и концентрации СО газовой среды в камере использовались сенсоры типа TGS2442 (Япония), DS18B20 (Германия) и MQ-2 (Китай) соответственно. На рис. 1 приведены РР приращений состояния газовой среды, определяемые (2) и (3), для $i=0, 1, 2, \dots, 400$ и $j=0, 1, 2, \dots, 400$ при возгорании спирта в моделирующей камере в случае $\varepsilon=0,01$.

Иллюстрация динамики числа и оценки вероятности РС (4) для приращений состояния газовой среды при возгорании спирта в модельном помещении в случае $\varepsilon=0,01$ приведена на рис. 2.

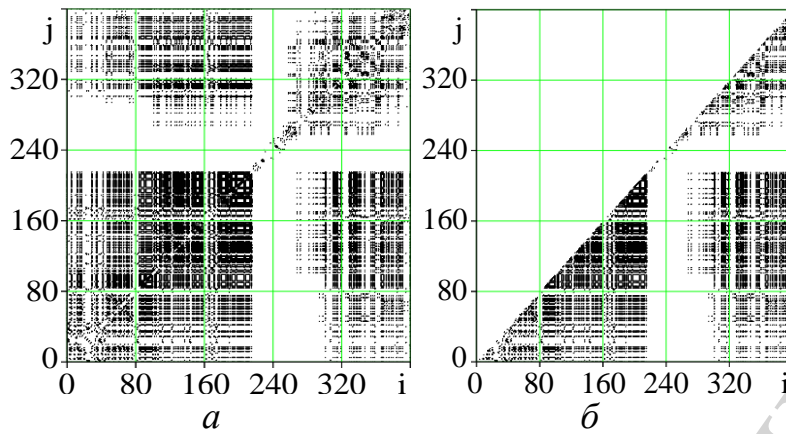


Рис. 1. RP для приращений состояний газовой среды в модельном помещении при возгорании спирта: a – RP (2); b – RP (3)

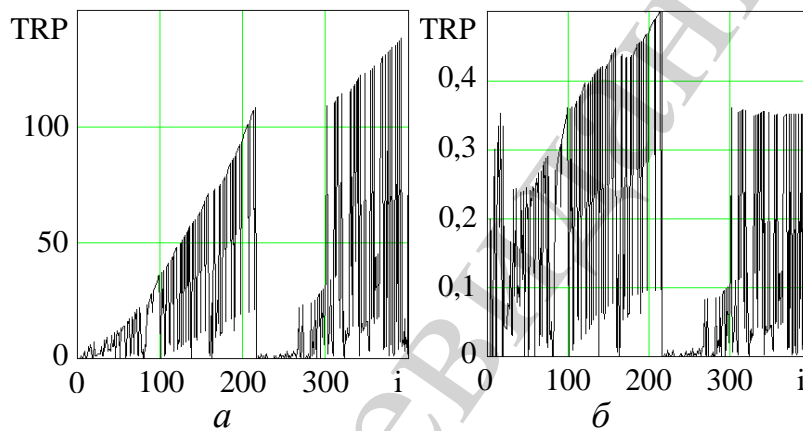


Рис. 2. Динамика РС газовой среды при возгорании спирта в модельном помещении: a – число РС; b – оценка вероятности РС, определяемая мерой (4)

На рис. 3 изображены RP для приращений состояний газовой среды в модельной камере в соответствии с выражениями (2) и (3) в случае опасности, связанной с возгоранием бумаги в модельном помещении, при $\epsilon=0,01$.

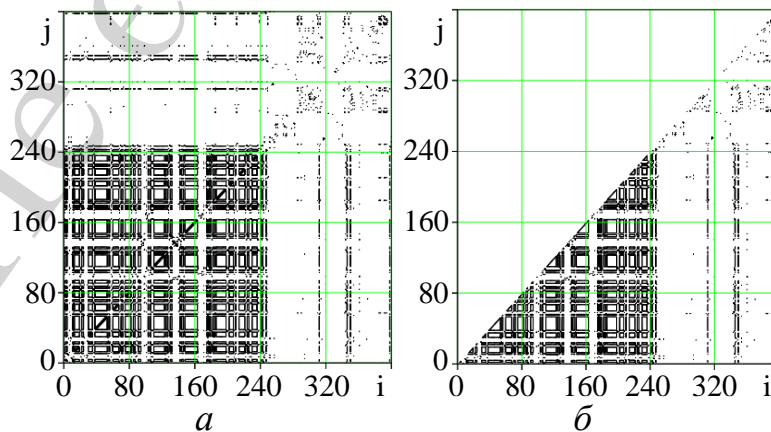


Рис. 3. RP для приращений состояний газовой среды в модельном помещении при возгорании бумаги: a – RP (2); b – RP (3)

Для этого случая на рис. 4 приведена иллюстрация динамики числа и оценки вероятности РС (4) для приращений состояния газовой среды в случае возгорания бумаги в модельном помещении при $\varepsilon=0,01$.

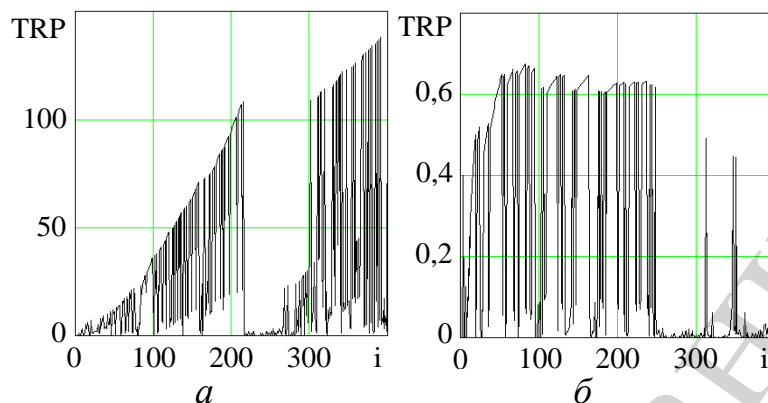


Рис. 4. Динамика РС газовой среды при возгорании бумаги в модельном помещении: *a* – число РС; *б* – оценка вероятности РС, определяемая мерой (4)

Представленные на рис. 1–4 зависимости получены с учетом реальных ошибок измерения сенсорами составляющих вектора состояния газовой среды. В пределах методической погрешности, полагая, что на основе используемых сенсоров конструируются реальные современные пожарные извещатели различных типов, можно считать, что приведенные данные удовлетворяют соответствующей степени достоверности.

6. Обсуждение результатов проверки метода предупреждения чрезвычайных ситуаций вследствие пожара в помещении

Из анализа RP на рис. 1, 3 следует, что динамика приращений состояния газовой среды в случае возникновения опасности, связанной с загоранием спирта и бумаги в модельной камере оказывается различной. При этом до момента возгорания материалов в камере динамика приращений состояний газовой среды оказывается схожей и характеризуется резкой сменой устойчивости в течение коротких интервалов времени. Такие изменения характерны для условий динамического равновесия состояний газовой среды в помещении при отсутствии возгорания. Некоторые отличия в RP на этом интервале на рис. 1, 3 объясняются тем, что возгорание бумаги происходило после загорания спирта с последующей естественной вентиляцией камеры. При этом в газовой среде могли присутствовать остаточные явления. Однако схожий характер RP до возгорания свидетельствует о достаточной степени проведенной естественной вентиляции камеры. Белые области на RP свидетельствуют об отсутствии рекуррентности в приращениях состояний газовой среды в камере. Эти области характеризуют потерю устойчивости состояний газовой среды и соответствуют моменту появления опасности в камере, связанной с загоранием спирта и бумаги. Дальнейшая динамика приращений состояния газовой среды носит хаотический характер, связанный с неустойчивостью состояний газовой среды. При

этом на рис. 1, 3 четко фиксируются области, когда возникает опасность (белые области RP в районе 200–250 отсчета). Поэтому можно утверждать, что приведенные RP для приращений состояния газовой среды в целом позволяют выявлять появление опасностей в виде возгораний материалов. Треугольный вид RP на рис. 1, 3 связан с тем, что RP вычисляются в реальном времени, в отличие от RP на рис. 1, 3, а. В этом смысле треугольная форма RP соответствует оперативному вычислению RP. Использование этих RP для вычисления предлагаемой меры рекуррентности приращений состояний (4), численно равной текущей оценке вероятности повторяемости (рис. 2, 4), свидетельствует о возможности ее использования для выявления опасности, связанной с началом возгорания материалов. Выявление начала возгорания материала позволяет осуществлять предупреждение о возможном возникновении ЧС, если это возгорание не будет ликвидировано доступными средствами. Таким образом, представленные на рис. 1–4 данные свидетельствуют о работоспособности разработанного метода предупреждения ЧС техногенного характера, связанных с пожарами на объектах, с помощью оперативного контроля приращений состояния газовой среды в помещениях.

Суть предупреждения ЧС состоит в раннем выявлении возгораний в помещениях объекта с целью ликвидации возгораний и недопущения возникновения ЧС, связанных с гибелью персонала, выходом из строя оборудования и агрегатов, разрушением конструкций помещений и возможно всего объекта. Для раннего выявления возгораний предлагается контролировать приращения состояний газовой среды технологических помещений объекта. Для этого необходимо создавать систему раннего выявления возгораний, которая должна быть связана с автоматической системой подавления таких возгораний в помещениях объекта. При этом основным принципом создания системы раннего выявления возгораний должен быть оперативный контроль приращений состояний газовой среды на основе вычисления предлагаемой текущей оценки их рекуррентности.

Результаты проверки метода ограничиваются экспериментальными данными возгорания материалов в модельной камере. При этом следует заметить, что в общем случае чувствительность метода по мере удаления от очага возгорания соответствующего сенсора будет снижаться. Поэтому при практической реализации целесообразно размещать сенсор (сенсоры) в зонах с наибольшей вероятностью возникновения возгораний. Обычно такие зоны в технологических помещениях объектов известны. Поэтому пути дальнейшего развития исследования должны быть направлены на проведение экспериментальной проверки работоспособности метода в реальных помещениях объектов с различными типами оборудования. В ходе таких исследований необходимо оценить реальную чувствительность и границы применимости предложенного метода предупреждения ЧС, условия устойчивости результатов, а также другие показатели и параметры, влияющие на область практического использования метода.

7. Выводы

1. Выполнен системный анализ возникновения ЧС техногенного характера на объектах, который показал, что осуществлять предупреждение появления

ЧС можно на основе контроля состояния газовой среды помещений, в которых эксплуатируется технологическое оборудование, а также размещается обслуживающий персонал. Показано, что при возникновении возгораний, газовая среда в помещениях объекта служит средством передачи опасных воздействий (угарного газа, температуры и дыма) к объекту воздействий, который является возможным источником возникновения ЧС. Теоретически обоснован метод предупреждения ЧС техногенного характера вследствие пожара в помещениях на основе использования текущей меры рекуррентности приращений вектора состояния газовой среды. Предложенная мера позволяет осуществлять оперативный контроль динамики приращений состояний газовой среды и выявлять опасные состояния, связанные с возгораниями в помещениях.

2. Выполнена проверка работоспособности метода предупреждения ЧС техногенного характера вследствие пожара на примере состояния газовой среды при возгорании спирта и бумаги в камере, имитирующей негерметичное помещение объекта. Установлено, что до момента возгорания спирта и бумаги оценка вероятности рекуррентности приращений состояний газовой среды имеет тенденцию возрастания от 0 до 0,6. При этом указанная тенденция роста сопровождается резкой и периодической сменой величины оценки вероятности рекуррентности. Выявлено, что до возгорания материала приращения состояний газовой среды носят случайный характер, соответствующий режиму ее динамической устойчивости. При возникновении загораний оценка вероятности рекуррентности приращений резко снижается и приближается к нулю – происходит потеря динамической устойчивости. Следуя полученным результатам, потеря динамической устойчивости происходит в районе 200 отсчета. После возгорания динамика рекуррентности приращений состояний характеризуется отдельными рекуррентными точками, случайно расположенными в области главной диагонали рекуррентной диаграммы. Показано, что затем наступает неустойчивый режим приращений состояний газовой среды, свидетельствующий о дальнейшем хаотическом развитии возгораний. Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности предложенного метода предупреждения ЧС вследствие пожара путем оперативного контроля параметров газовой среды помещений объекта.

Литература

1. 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>
2. 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>
3. Otrosh, Y., Kovalov, A., Semkiv, O., Rudeshko, I., Diven, V. (2018). Methodology remaining lifetime determination of the building structures. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02023. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002023>

4. 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>
5. 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.
6. Tiutiunyk, V. V., Ivanets, H. V., Tolkunov, I. A., Stetsyuk, E. I. (2018). System approach for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 99–105. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/7>
7. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2017). Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (90)), 11–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114504>
8. Vasiliev, M. I., Movchan, I. O., Koval, O. M. (2014). Diminishing of ecological risk via optimization of fire-extinguishing system projects in timber-yards. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 106–113.
9. Kondratenko, O. M., Vambol, S. O., Stokov, O. P., Avramenko, A. M. (2015). Mathematical model of the efficiency of diesel particulate matter filter. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 55–61.
10. Vasyukov, A., Loboichenko, V., Bushtec, S. (2016). Identification of bottled natural waters by using direct conductometry *Ecology. Environment and Conservation*, 22 (3), 1171–1176.
11. 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>
12. Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9781139174695>
13. Poulsen, A., Jomaas, G. (2011). Experimental Study on the Burning Behavior of Pool Fires in Rooms with Different Wall Linings. *Fire Technology*, 48 (2), 419–439. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-011-0230-0>
14. Zhang, D., Xue, W. (2010). Effect of heat radiation on combustion heat release rate of larch. *Journal of West China Forestry Science*, 39, 148.
15. Ji, J., Yang, L., Fan, W. (2003). Experimental study on effects of burning behaviours of materials caused by external heat radiation. *JCST*, 9, 139.
16. Peng, X., Liu, S., Lu, G. (2005). Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. *Journal of Chongqing University*, 28, 122.
17. 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), 32–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96694>
18. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. *Eastern-European Journal of En-*

terprise Technologies, 4 (9 (88)), 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108448>

19. 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>

20. 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>

21. 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>

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

23. 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>

24. Singh, P. (2016). Time-frequency analysis via the fourier representation. HAL, 1–7. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01303330>

25. Pretrel, H., Querre, P., Forestier, M. (2005). Experimental Study Of Burning Rate Behaviour In Confined And Ventilated Fire Compartments. *Fire Safety Science*, 8, 1217–1228. doi: <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.8-1217>

26. 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>

27. Stankovic, L., Dakovic, M., Thayaparan, T. (2014). *Time-frequency signal analysis*. Kindle edition, Amazon, 655.

28. Avargel, Y., Cohen, I. (2010). Modeling and Identification of Nonlinear Systems in the Short-Time Fourier Transform Domain. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58 (1), 291–304. doi: <https://doi.org/10.1109/tsp.2009.2028978>

29. Giv, H. H. (2013). Directional short-time Fourier transform. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 399 (1), 100–107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2012.09.053>

30. 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>

31. Mandelbrot, B. (2002). *Fraktalnaya geometriya prirody*. Moscow, 656.

32. 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>

33. 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>
34. Webber, Jr. C. L., Zbilut, J. P. (2005). Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*, 26.
35. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P., Gornostal, S. (2019). Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (97)), 29–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155027>
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. 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>