

Краткосрочный прогноз пожара на основе рекуррентности приращений состояния воздушной среды и модели Брауна нулевого порядка

**Б. Б. Поспелов, Е. А. Рыбка, Р. Г. Мелешенко, А. Н. Крайнюков,
И. Ю. Бирюков, Т. Ю. Бутенко, О. А. Яценко, Ю. С. Безуглая,
К. М. Карпец, Р. В. Васильченко**

Розглянуто можливості параметризації моделі Брауна нульового порядку для прогнозування пожежі в приміщенні на основі поточної міри рекуррентності прирощень стану повітряного середовища. Ключовим для параметричної моделі прогнозування Брауна нульового порядку є вибір параметра згладжування, який характеризує адаптивність прогнозу до поточної міри рекуррентності прирощень стану повітряного середовища. Показано, що для ефективного короткострокового прогнозу пожежі в приміщенні параметр моделі Брауна повинен обиратися з позамежної множини, яка визначається 1 та 2. Позамежна множина для параметра моделі Брауна є областю ефективного прогнозування пожежі на основі міри поточної рекуррентності прирощень стану повітряного середовища в приміщеннях. Досліджено помилки прогнозу пожежі на основі параметризованої моделі Брауна нульового порядку в разі класичної і позамежної множини для параметрів моделі на прикладі загорання різних матеріалів в лабораторній камері. В якості кількісних показників якості прогнозу досліджуються експоненціальні згладжені з параметром 0,4 абсолютні і середні помилки прогнозу. Встановлено, що для спирту величина згладженої абсолютної і середньої помилки прогнозу для класичного параметра згладжування на інтервалі відсутності загорання, не перевищує 20 %. При цьому для позамежного випадку забезпечується величина зазначених помилок прогнозу в середньому на порядок менша. Аналогічні співвідношення для помилок прогнозу зберігаються при підпалі паперу, деревини і текстилю. Однак для перехідної зони, яка відповідає моментам підпалу матеріалів, спостерігається різке зменшення величини поточної міри рекуррентності прирощень стану повітряного середовища в камері. Встановлено, наприклад, що для цієї зони величина згладженої абсолютної помилки прогнозу для спирту становить близько 2 % при виборі параметра моделі з класичної множини. При цьому в разі вибору параметра моделі з позамежної множини помилка прогнозу становить близько 0,2 %. Отримані результати в цілому свідчать про суттєві переваги використання для прогнозу пожежі в приміщеннях параметричної моделі Брауна нульового порядку з параметрами з позамежної множини.

Ключові слова: прогнозування пожежі, модель Брауна нульового порядку, позамежна множина, загорання, міра рекуррентності.

1. Введение

Мировая статистика свидетельствует о том, что ежегодно возникает 8 млн. пожаров, при которых погибает свыше 90 тыс. чел. Любой пожар возникает в случае наличия горючего материала, окислителя и условий возгорания [1]. Наиболее опасными принято считать пожары в экосистемах [2], на производственных площадках [3, 4], а также внутри помещений различных объектов [5]. При этом, пожары в помещениях (ПП) оказываются наиболее частыми. Опасность таких пожаров связана с нанесением значительной угрозы жизни и здоровью человека [6]. Кроме этого, ПП нарушают целостность и устойчивость самих объектов [7], а также существующий баланс в окружающей природной среде [8]. При этом, масштабные пожары приводят к выпадению кислотных осадков и вызывают загрязнение водоносных слоев [9]. Например, по данным Национальной ассоциации противопожарной защиты, в 2019 году в США сообщение о ПП поступало каждые 93 секунды, а каждые 3 часа наступала смерть. Материальный ущерб составил около 12,3 млрд. долларов [10]. Это свидетельствует о недостаточной эффективности осуществляемых мероприятий и технологий, а также актуальности общей проблемы защиты от ПП. Одним из направлений решения данной проблемы следует считать краткосрочный прогноз (КП) ПП. КП позволит своевременно выявлять начало загораний и не допускать перерастания их в пожары. В силу особой сложности и индивидуальности каждого ПП технология КП должна базироваться на системных представлениях взаимодействия опасных факторов пожара с воздушной средой помещений в виде единой динамической системы и использовании современных методов краткосрочного прогнозирования процессов со случайной динамикой.

В этой связи исследование краткосрочного прогноза пожара на основе состояния воздушной среды в помещениях в виде единой динамической системы и методов прогнозирования процессов с неопределенной динамикой следует считать особо актуальным.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В [11] приведены результаты исследования современных методов прогнозирования ПП. Такие методы базируются на заданных моделях образования основных опасных факторов. При этом не решенными остались вопросы, связанные с КП пожаров в реальных помещениях. Известные методы позволяют в общем виде описывать и рассчитывать детерминированное изменение параметров среды в конкретных помещениях во времени [12]. Однако реальные условия возникновения ПП характеризуются достаточно сложной индивидуальной динамикой текущих состояний воздушной среды помещений (ВСП). Поэтому КП пожаров в различных реальных помещениях на основе известных методов трудно реализуем.

В условиях реальных ПП ВСП представляет собой сложную динамическую систему, обладающую свойствами диссипативных структур, нелинейности состояний и самоорганизации [13]. В таких системах известные методы не позволяют выявлять сложные взаимосвязи между элементами, поскольку основываются на принципах линейности, которые в реальных условиях нарушаются. Это приводит к ошибочной оценке динамики ВСП, что не позволяет осу-

ществлять КП ПП [14]. Однако, в [15] отмечается, что характер текущей динамики ВСП имеет первостепенное значение для КП ПП. В таких условиях для КП ПП можно использовать, например, методы нелинейной динамики, применяемые для анализа различных сложных систем [16]. Количественные методы нелинейной динамики различных сложных систем, функционирующих в нестационарных условиях, исследуются в [17]. Их применение в геофизике на основе фрактальных множеств рассматривается в [18]. Однако в [16–18] методы КП ПП на основе анализа состояния ВСП в реальных условиях не исследуются. В ряде работ приведены результаты экспериментальных исследований раннего возгорания материалов и ПП. Так в [19] приведены результаты экспериментальных исследований процесса возникновения ПП. Исследование влияния теплового излучения на скорость высвобождения тепла для различных горючих материалов приведено в [20]. Экспериментальное изучение режимов горения различных горючих материалов под воздействием внешнего теплового потока выполнено в [21]. Углубленному исследованию скорости выделения тепла в воздушную среду при ПП посвящена работа [22]. Отмечается, что динамика состояния ВСП на начальном этапе ПП носит сложный и нестационарный характер. Повышению эффективности выявления ПП на основе известных методов посвящена работа [23]. При этом методы КП ПП на основе анализа текущего состояния ВСП не рассматриваются и не исследуются [24]. В [25] предлагается в нестационарных условиях применять самонастраивающиеся методы выявления загораний. Однако предлагаемые методы ограничиваются усредненными значениями отдельных параметров ВСП. Текущая динамика состояний ВСП при пожаре не учитывается и не исследуется. В силу сложного характера и непредсказуемости реальной динамики состояния ВСП результаты исследований, представленные в [26], ограничиваются только адаптивным порогом и вероятностью обнаружения загораний. В [27] исследуется динамика временных автокорреляций и парных корреляций состояния ВСП на примере тестовых загораний в модельной камере. Отмечается, что для выявления ранних загораний более важными следует считать текущие показатели параметров состояния ВСП, а не их временные корреляции. Методы, пригодные для выявления загораний на основе параметров состояния ВСП рассматриваются в [28]. Однако указанные методы справедливы только для стационарных условий и базируются на усредненных показателях параметров ВСП. При этом не учитываются частотно-временные особенности динамики состояния ВСП, что не позволяет их использовать для КП ПП. Методы раннего выявления ПП, базирующиеся на временных и частотных изменениях состояний ВСП, рассматриваются в [29]. Отмечается, что проблема частотно-временного выявления загораний на основе состояний ВСП остается до конца не решенной. При этом известные методы являются сложными в реализации и малоприспособленными для КП ПП. Метод, учитывающий нестационарный характер параметров ВСП при загораниях, исследуется в [30]. Однако данный метод базируется на применении преобразования Фурье к стационарным фрагментам нестационарной динамики состояний ВСП. В случае ПП выделить стационарные фрагменты в нестационарной динамике состояний опасных параметров ВСП не представляется возможным. При этом в

указанных выше работах ВСП при пожаре не рассматривается в виде единой сложной динамической системы, не исследуется и не прогнозируется динамика состояний такой системы. В [31] представлены результаты экспериментального исследования динамики скорости горения различных материалов в закрытых и вентилируемых помещениях. Однако отсутствуют данные об особенностях динамики состояний ВСП. Исследованию динамики приращений отдельных параметров ВСП посвящена работа [32]. Отмечается, что динамика таких приращений может рассматриваться в качестве эффективного признака выявления загораний и КП ПП. Тем не менее, результаты исследований ограничиваются традиционными статистическими параметрами приращений. В [27–32] отмечается, что загорания материалов являются источником нарушения исходного динамического равновесия состояний ВСП. Установлено, что динамика состояний ВСП при загораниях носит сложный нелинейный и нестационарный характер. Применение методов частотно-временной идентификации нелинейных динамических систем для выявления указанных особенностей ВСП при загораниях рассматривается в [33, 34]. Метод кратковременного преобразования Фурье для выявления загораний в этом случае рассматривается в [35]. Однако, в [33–35], отмечается, что рассматриваемые методы оказываются достаточно сложными в реализации и не могут рассматриваться для КП ПП. При этом указывается, что для раннего выявления загораний, важной является динамика состояний и приращений состояний ВСП, как сложной динамической системы. Применение частотно-временного метода к оценке динамики ВСП при загораниях рассматривается в [36]. Отмечается, что метод оказывается достаточно сложным в реализации и обладает недостаточной оперативностью для КП ПП. В [37] предлагается метод оперативного прогнозирования ПП в реальных условиях. Метод базируется на представлении ВСП в виде сложной динамической системы, состояние которой оценивается вектором опасных факторов пожара. При этом для КП ПП предлагается использовать рекуррентность приращений состояний ВСП в модели Брауна нулевого порядка. Однако, известно, что качество КП в указанной модели существенно зависит от величины параметра экспоненциального сглаживания [38]. При этом в [39] принятые допустимые границы для величины указанного параметра расширены. Такое расширение классических границ принято называть запредельным. Однако в [37] отсутствует исследование КП ПП на основе использования модели Брауна нулевого порядка при классическом и запредельном случае.

Из анализа следует, что динамика состояний ВСП при ПП имеет сложный и нелинейный характер, зависящий от конкретных реальных условий, определяемых множеством неизвестных и изменяющихся во времени факторов. Для выявления загораний известны различные методы. Однако существующие методы являются достаточно сложными в реализации, обладают ограниченной чувствительностью, оперативностью и областью практического использования. По этой причине их применение для КП ПП оказывается проблематичным. Более приемлемыми являются методы, основанные на методах нелинейной динамики текущих состояний ВСП [37]. Такие методы прогнозирования должны базироваться на динамике рекуррентности приращений состояния ВСП. При

этом, наиболее важным с точки зрения прогнозирования ПП является КП, осуществляемый на основе модели прогнозирования Брауна нулевого порядка [37]. В силу параметрической зависимости прогноза важной и нерешенной частью проблемы является исследование КП ПП на основе параметрической модели Брауна нулевого порядка.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование краткосрочного прогноза пожара в помещении на основе модели Брауна нулевого порядка для текущей меры рекуррентности приращений состояния воздушной среды при различных значениях параметра экспоненциально сглаживания.

Для достижения цели работы поставлены задачи:

- оценить возможности параметризации модели Брауна нулевого порядка в случае применения ее для прогнозирования пожара в помещении на основе текущей меры рекуррентности приращений состояния воздушной среды;
- исследовать ошибки прогноза рекуррентности приращений состояния воздушной среды на основе модели Брауна нулевого порядка при различных значениях параметра на примере загорания тестовых материалов в лабораторной камере, моделирующей негерметичное помещение.

4. Материалы и методы исследования

В качестве горючих материалов исследовались спирт, бумага, древесина и текстиль, наиболее характерных для помещений различных типов объектов. Выбор указанных материалов обусловлен также и тем, что они с точки зрения пожара обладают различными скоростями воспламенения. Исследование краткосрочного прогноза пожара в помещении осуществлялось на основе дискретных во времени измерений состояния воздушной среды, характеризуемого вектором опасных факторов пожара [32]. В качестве опасных факторов пожара исследовались температура, плотность дыма и концентрация угарного газа воздушной среды в лабораторной камере, моделирующей негерметичное помещение с естественной вентиляцией при поджоге исследуемых горючих материалов. Измерения выполнялись в дискретные моменты времени [32]. $i=0,1,2,\dots,400$, следующие с интервалом 0,1 с. Поджог горючих материалов в лабораторной камере осуществлялся примерно в районе $i=200$ отсчета. Измерялись основные опасные факторы пожара, определяемые плотностью дыма, температурой и концентрацией угарного газа ВСП [11]. Указанные опасные факторы пожара измерялись с помощью соответствующих сенсоров TGS2442 (Япония), DS18B20 (Германия) и MQ-2 (Китай). Каждый из сенсоров перед исследованием подвергался проверке на соответствие заявляемым параметрам.

Методы исследования базировались на результатах системного анализа возникновения ПП [14] с учетом использования метода рекуррентных диаграмм (RP) [40]. Следуя [14], воздушная среда в камере рассматривалась в качестве некоторой сложной динамической системы, состояние которой определялось свойствами горючих материалов, параметрами лабораторной камеры и воздействием различных возмущающих факторов. При этом учитывалось, что в ре-

альных условиях ПП состояния воздушной среды обычно неизвестны заранее и могут непредсказуемо меняться во времени. Поэтому состояние воздушной среды в камере оценивалось на основе измерительной информации опасных факторов ВСП в реальном времени [41]. На основе полученных измерений опасных факторов пожара воздушной среды в камере определялся вектор текущих приращений вектора состояния ВСП. По текущим приращениям вектора состояния ВСП определялась текущая мера их рекуррентности [42]. Определенная текущая мера для приращений вектора состояния ВСП использовалась в модели Брауна нулевого порядка для КП ПП [37].

Исследование ошибок КП ПП на основе рекуррентности приращений состояния воздушной среды с использованием модели Брауна нулевого порядка при значении параметра экспоненциального сглаживания из классической и за-предельной области осуществлялось на примере реальных загораний горючих материалов в лабораторной камере, моделирующей негерметичное помещение. При этом количественная оценка качества КП производилась на основе вычисления экспоненциально сглаженных текущих абсолютных (МАЕ) и средних (МЕ) ошибок прогноза для параметра сглаживания из классической и за-предельной области. Регистрация и обработка данных выполнялась на ПК с системой Windows-10, а также специально разработанным программным обеспечением регистрации и программным продуктом обработки данных в вычислительной среде Mathcad 14.

5. Результаты исследования краткосрочного прогноза пожара с использованием модели Брауна

5.1. Оценка возможности параметризации модели Брауна нулевого порядка при прогнозировании пожара

Общее теоретическое обоснование метода КП ПП на основе текущей меры рекуррентности приращений состояния ВСП и модели Брауна нулевого порядка, базирующейся на процедуре экспоненциального сглаживания, изложено в работе [37]. Текущая мера рекуррентности приращений состояния ВСП в реальных условиях изменяется под воздействием многих опасных и мешающих факторов, сопутствующих загоранию материалов [43, 44]. В ряде случаев совокупность указанных факторов может вызывать как увеличение, так и уменьшение величины текущей рекуррентности приращений состояния ВСП. При этом могут иметь место и чередование указанных ситуаций. Очевидно, что в этих условиях КП ПП должен быть адаптивным к текущей мере рекуррентности приращений, которая имеет в случайную динамику без явных признаков тренда и сезонности. Поэтому для КП ПП в [37] предложено использовать известную модель Брауна нулевого порядка, но для текущей меры рекуррентности приращений состояния ВСП. КП ПП в соответствии с моделью Брауна нулевого порядка и текущей меры рекуррентности приращения состояний ВСП будет определяться по формуле

$$P_i = hAs_i + (1 - h)P_{i-1}, \quad (1)$$

где P_i – значение прогноза в момент времени i ;

h – величина параметра сглаживания;

A_{s_i} – величина текущей меры рекуррентности приращения состояний ВСП в момент i ;

P_{i-1} – значение прогноза в момент времени $i-1$.

Выбор величины параметра сглаживания в (1) обычно удовлетворяет классическому условию сглаживания, определяемому неравенством вида: $0 < h < 1$. Параметризация модели (1) широко применяется при прогнозировании экономических систем с различной динамикой состояния [45]. Последовательное применение соотношения (1) определяет КП P_i ПП в виде суммы экспоненциально взвешенных всех текущих мер рекуррентности в момент i и до момента i . Следуя Брауну, дисперсия $D[P_i]$ прогноза (1) будет определяться

$$D[P_i] = \frac{h\sigma^2}{2-h}, \quad (2)$$

где σ^2 – дисперсия текущей меры рекуррентности приращений состояния ВСП.

Из выражения (2) следует, что с уменьшением h дисперсия прогноза уменьшается. При этом для увеличения веса последних значений текущих мер рекуррентности приращений параметр h следует увеличивать. Преобразуя соотношение (1), КП ПП в соответствии с моделью Брауна нулевого порядка и текущей меры рекуррентности приращений состояния ВСП представим в следующем виде:

$$P_i = P_{i-1} + h(K_i - P_{i-1}). \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что величина $(K - P_{i-1})$ определяет текущую ошибку КП ПП. Следуя (1) или (2), экспоненциальное сглаживание текущей меры рекуррентности приращений состояния ВСП реализует вариант самообучающейся модели Брауна. Вычисление КП ПП в этом случае оказывается простым, реализуется итеративно и требует минимального объема памяти. Важным для рассматриваемой модели Брауна является параметр h . Данный параметр характеризует степень адаптивности КП ПП (1) или (3). При этом в классическом варианте использования (1) и (3) параметр h выбирается в пределах от 0 до 1. Однако в работе [43] доказано, что в рассматриваемой модели Брауна вместо классических пределов выбора параметра h в диапазоне от 0 до 1, данный параметр модели должен выбираться в более широких пределах – от 0 до 2. Показано, что в большинстве случаев прогнозирования реальной переходной экономики наилучшие прогнозы имеют место, когда параметр h выбирается из запредельного множества от 1 до 2. При этом была высказана гипотеза о том, что запредельное множество параметра h является областью эффективного прогнозирования нестационарных процессов. Данная гипотеза нашла подтверждение на ряде практических примеров. Отмечается, что для окончательного обоснования этой гипотезы необходимы более широкое ее теоретическое и эмпириче-

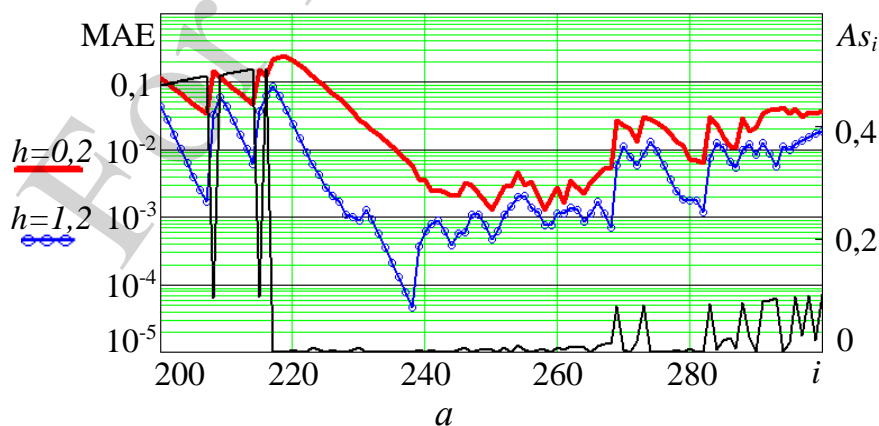
ское исследование. Практически неисследованным является случай запредельного множества параметра h для модели Брауна нулевого порядка, используемого для прогнозирования ПП [40]. Таким образом, исследование КП ПП при выборе параметра h из запредельного множества при использовании модели Брауна нулевого порядка для текущих мер рекуррентности приращений состояния ВСП на примере загораний материалов в лабораторной камере представляется важным и актуальным.

5. 2. Исследование ошибки прогноза пожара на основе модели Брауна нулевого порядка

Объектом исследования являлся КП ПП на основе модели Брауна нулевого порядка для текущих мер рекуррентности приращений вектора состояний ВСП. При этом выбор параметра h модели соответствовал расширенному множеству от нуля до двух. Предметом исследования являлись количественные показатели качества прогноза для параметра h модели из классического и запредельного множества. В качестве количественных показателей качества прогноза на основе текущей меры рекуррентности приращения вектора состояний ВСП [40] исследовалась динамика экспоненциально сглаженных с параметром 0,4 текущих абсолютной и средней ошибок прогноза. В качестве иллюстрации результатов исследования на рисунках ниже приведена характерная динамика МАЕ и МЕ прогноза для двух значений параметра h модели Брауна из области классического и запредельного множества, равного 0,2 и 1,2 соответственно.

Так, например, на рис. 1 иллюстрируются характерные динамики МАЕ и МЕ прогноза при указанных значениях параметра h модели в случае загорания спирта в лабораторной камере. Аналогичные зависимости для загорания бумаги, древесины и текстиля приведены на рис. 2–4 соответственно.

На рис. 1–4 черным цветом показана динамика меры текущей рекуррентности состояний воздушной среды в камере для соответствующих тестовых материалов.



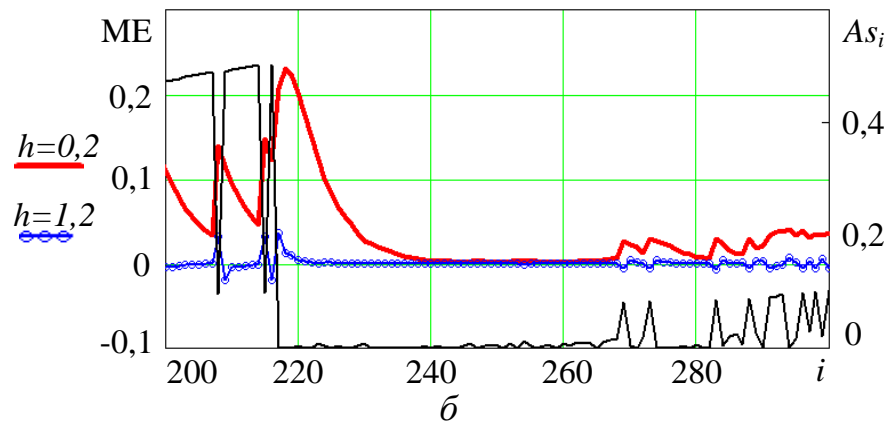


Рис. 1. Динамика ошибок прогноза при поджоге спирта: a – МАЕ; b – МЕ

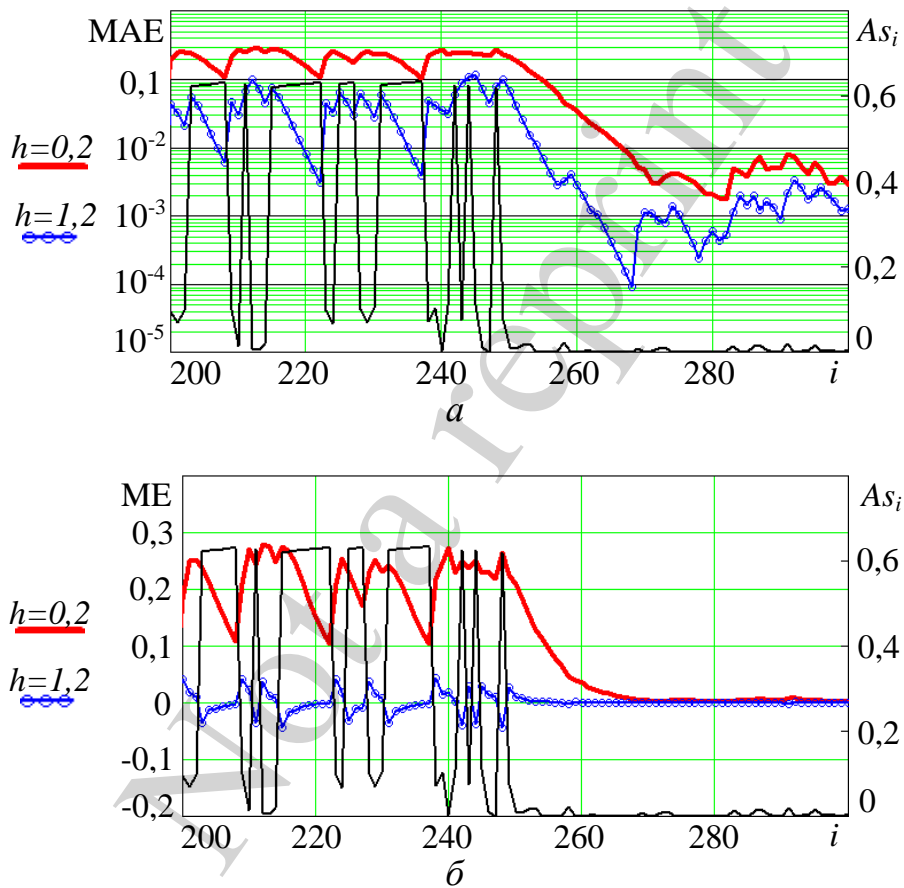
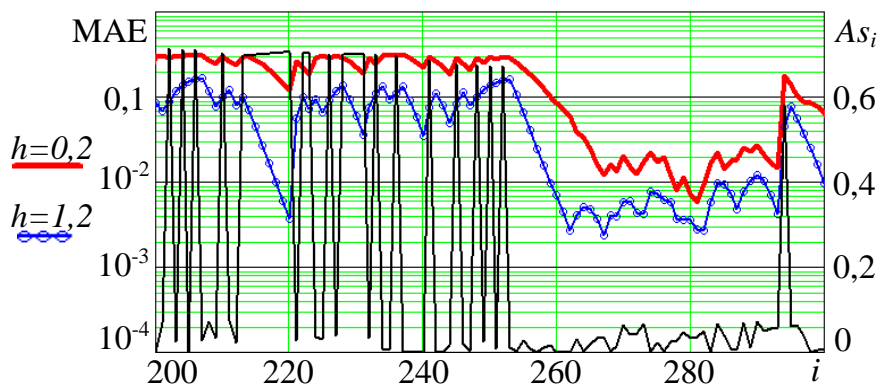


Рис. 2. Динамика ошибок прогноза при поджоге бумаги: a – МАЕ; b – МЕ



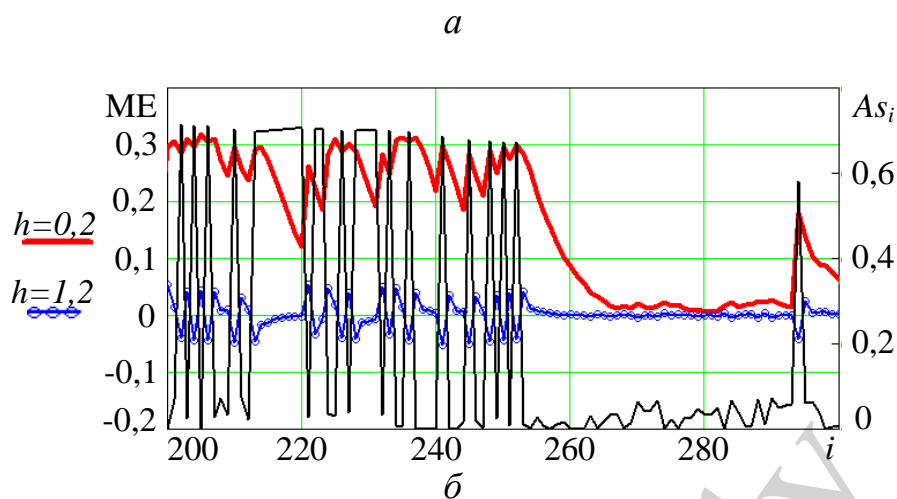


Рис. 3. Динамика ошибок прогноза при поджоге древесины: *a* – МАЕ; *б* – МЕ

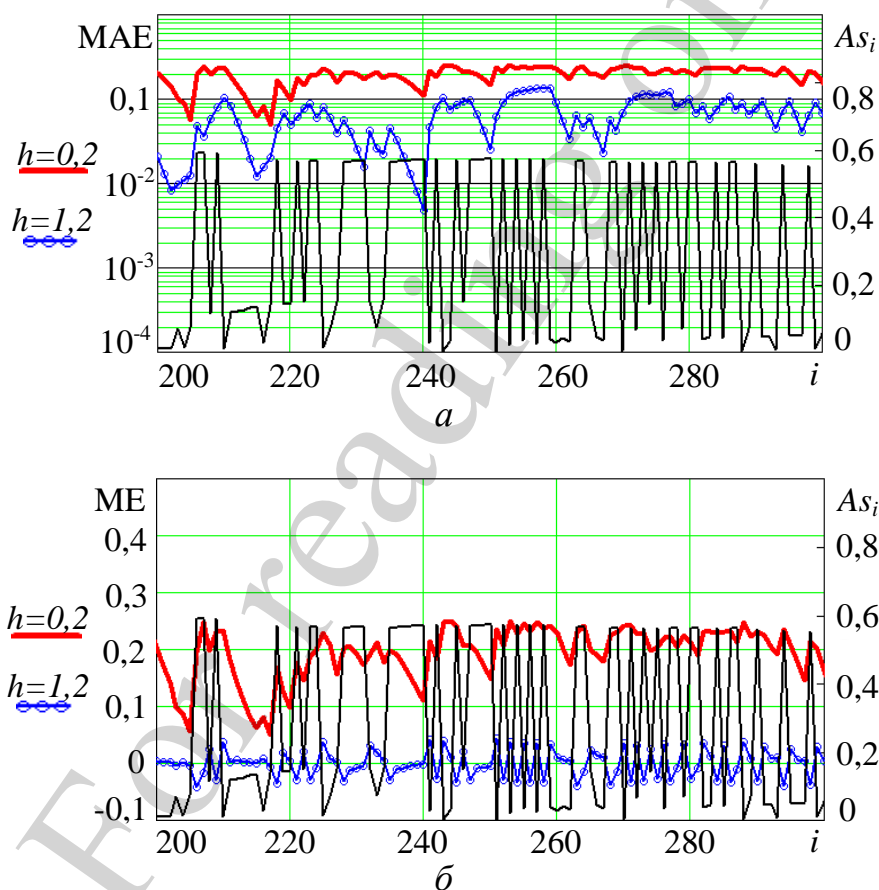


Рис. 4. Динамика ошибок прогноза при поджоге текстиля: *a* – МАЕ; *б* – МЕ

6. Обсуждение результатов исследования динамики ошибки прогноза пожара

Представленные на рис. 1–4 результаты исследования динамики ошибок прогноза при поджоге различных материалов объясняются различными возможностями модели Брауна нулевого порядка осуществлять КП ПП при выборе параметра сглаживания из классического и запредельного множества. Экспе-

риментальные данные для динамики МАЕ и МЕ в целом подтверждают гипотезу о том, что запредельное множество для параметра сглаживания модели Брауна позволяет эффективно прогнозировать нестационарные текущие меры рекуррентности приращений вектора состояний ВСП. При этом полученные количественные показатели качества ошибок прогноза, определяемые МАЕ и МЕ, свидетельствуют об их различии как для одних и тех же, так и различных горючих материалов. Исследуемые количественные показатели качества ошибок прогноза для различных материалов загорания в лабораторной камере оказываются примерно на порядок меньшими для запредельного множества параметра сглаживания по сравнению с классическим множеством. Так, например, для спирта величина МАЕ и МЕ при классическом параметре сглаживания обеспечивает ошибку прогноза на интервале отсутствия загорания, не превышающую 20 %. При этом выбор параметра сглаживания из запредельного множества обеспечивает в среднем на порядок меньшую ошибку прогноза в указанном интервале. Особенно это характерно для моментов времени с большей мерой текущей рекуррентности приращений состояния воздушной среды в камере. Аналогичные закономерности количественных показателей качества прогноза сохраняются и в случае загорания бумаги, древесины и текстиля.

В переходной зоне, соответствующей моменту поджога материалов величина МАЕ для спирта соответствует ошибке прогноза, примерно, равной 2 % для параметра сглаживания из классического множества и 0,2 % в случае из запредельного множества. Кроме этого динамика МАЕ в переходной зоне свидетельствует о более высокой точности прогноза в начале переходной зоны для случая запредельного параметра модели Брауна. При этом величина МЕ оказывается более чем на порядок ниже по сравнению с параметром из классического множества. Аналогичная ситуация характерна и при поджоге других типов материалов. Однако характер динамики МАЕ и МЕ для текстиля на исследуемом интервале отличается от других материалов (рис. 4). Объясняется это низким темпом загорания текстиля, который на рассматриваемом интервале не приводит к заметному снижению меры текущей рекуррентности приращений состояния воздушной среды в камере. Таким образом, представленные на рис. 1–4 экспериментальные данные в целом свидетельствуют о преимуществах использования для КП ПП модели Брауна нулевого порядка с параметром сглаживания из запредельного множества.

К ограничениям данного исследования можно отнести то, что результаты получены на примере экспериментальных данных загорания ограниченного числа горючих материалов в лабораторной камере. При этом исследуемые количественные показатели качества КП ПП будут зависеть от параметров лабораторной камеры, размеров очага загорания и удаленности соответствующих измерительных сенсоров от очага. Поэтому в реальных условиях при КП ПП целесообразно размещать измерительные сенсоры опасных факторов ВСП в зонах, где вероятность возникновения загораний максимальна. Обычно такие зоны в помещениях объектов известны заранее. Традиционно эффективной зоной размещения измерительных сенсоров принято считать потолочную область помещений.

Возможными путями дальнейшего развития исследования можно считать расширение сферы экспериментальных исследований на различные типы помещений и пожарных нагрузок в них. В ходе расширенных экспериментальных исследований необходимо уточнить рекомендуемые значения параметра сглаживания из запредельного множества, а также оценить границы применимости, ограничения и условия устойчивости КП ПП.

7. Выводы

1. Оценены возможности параметризации модели Брауна нулевого порядка для прогнозирования пожара в помещении на основе текущей меры рекуррентности приращений состояния воздушной среды. Параметризованная модель Брауна зависит от параметра сглаживания, который характеризует степень адаптивности прогноза к значениям меры текущей рекуррентности приращений состояния воздушной среды в помещении. Отмечено, что традиционно указанный параметр должен выбираться из множества между 0 и 1 (классическое множество). Однако известно, что вместо классического множества параметр модели должен выбираться из расширенного множества между 0 и 2. При этом замечено, что запредельное множество параметра сглаживания от 1 до 2 обеспечивает эффективное прогнозирование нестационарных процессов без тренда и сезонности. Неисследованным остался случай запредельного множества параметра для модели Брауна нулевого порядка, используемого для прогнозирования пожаров на основе меры текущих приращений состояния воздушной среды. Поэтому важными являются исследования расширенного множества для параметрической модели Брауна применительно к краткосрочному прогнозу пожара в помещении на основе для текущих мер рекуррентности приращений состояния воздушной среды.

2. Исследованы ошибки прогноза пожара на основе параметризованной модели Брауна нулевого порядка в случае расширенного множества параметров на примере загорания различных горючих материалов в лабораторной камере, моделирующей негерметичное помещение. В качестве количественных показателей качества прогноза рассмотрены экспоненциально сглаженные с параметром 0,4 абсолютные и средние ошибки. Установлено, что для спирта величина сглаженной абсолютной и средней ошибки прогноза для классического параметра сглаживания на интервале отсутствия загорания, не превышает 20 %. При этом для запредельного случая обеспечивается величина указанных ошибок прогноза в среднем на порядок меньшая. Аналогичные соотношения для ошибок прогноза сохраняются при поджоге бумаги, древесины и текстиля. Однако для переходной зоны, соответствующей моментам поджога материалов, наблюдается резкое уменьшение величины текущей меры рекуррентности приращений состояния воздушной среды в камере. Установлено, что для этой зоны величина сглаженной абсолютной ошибки прогноза для спирта составляет около 2 % в случае выбора параметра модели из классического множества. При этом в случае параметра модели из запредельного множества ошибка прогноза составляет порядка 0,2 %. Таким образом, полученные результаты в целом свидетельствуют о существенных преимуществах использования для краткосрочного

прогноза пожара в помещении параметрической модели Брауна нулевого порядка с параметрами модели из запредельного множества.

Литература

1. Kustov, M., Kalugin, V., Tutunik, V., Tarakhno, O. (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: <http://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99>
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: <http://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: <http://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), 186–195. doi: <http://doi.org/10.6001/energetika.v64i4.3893>
5. Semko, A., Beskrovnaya, M., Vinogradov, S., Hritsina, I., Yagudina, N. (2017). The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 3, 655–664.
6. 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: <http://doi.org/10.5604/01.3001.0012.9654>
7. 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: <http://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>
8. 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.
9. Loboichenko, V. M., Vasyukov, A. E., Tishakova, T. S. (2017). Investigations of Mineralization of Water Bodies on the Example of River Waters of Ukraine. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 14 (4), 37–41. doi: <http://doi.org/10.3233/ajw-170035>
10. Reproduced with permission from fire loss in the United States during 2019 (2020). National Fire Protection Association, 11. Available at: <https://www.nfpa.org/>
11. Кошмаров, Ю. А., Пузач, С. В., Андреев, В. В. (2012). Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. *АГПС МЧС России*, 126.
12. 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, 012065. doi: <http://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012065>

13. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133127>

14. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101985>

15. Ahn, C. -S., Kim, J. -Y. (2011). A study for a fire spread mechanism of residential buildings with numerical modeling. *WIT Transactions on the Built Environment*, 117, 185–196. doi: <http://doi.org/10.2495/safe110171>

16. Recurrence plots and their quantifications: expanding horizons (2015). *International Symposium on Recurrence Plots*. Grenoble, 380.

17. Sadkovi, V., Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Krainiukov, O., Rud, A. et. al. (2020). Construction of a method for detecting arbitrary hazard pollutants in the atmospheric air based on the structural function of the current pollutant concentrations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (108)), 14–22. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218714>

18. Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge university press, 416.

19. 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: <http://doi.org/10.1007/s10694-011-0230-0>

20. Zhang, D., Xue, W. (2010). Effect of heat radiation on combustion heat release rate of larch. *Journal of West China Forestry Science*, 39, 148.

21. Ji, J., Yang, L., Fan, W. (2003). Experimental study on effects of burning behaviours of materials caused by external heat radiation. *JCST*, 9, 139.

22. Peng, X., Liu, S., Lu, G. (2005). Experimental analysis on heat release rate of materials. *Journal of Chongqing University*, 28, 122.

23. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96694>

24. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142995>

25. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108448>

26. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110092>

27. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117789>

28. Bendat, J. S., Piersol, A. G. (2010). *Random data: analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons. doi: <http://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: <http://doi.org/10.1155/2009/673539>

30. Singh, P. (2016). Time-frequency analysis via the fourier representation. HAL.

31. 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: <http://doi.org/10.3801/iafss.fss.8-1217>

32. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122419>

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

34. 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: <http://doi.org/10.1109/tsp.2009.2028978>

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

36. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125926>

37. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Samoilov, 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.226692>

38. Sinaga, H. D. E., Irawati, N. (2018). A medical disposable supply demand forecasting by moving average and exponential smoothing method. *WMA-2*. Padang. doi: <http://doi.org/10.4108/eai.24-1-2018.2292378>

39. Светуных, С. Г. (2002). О расширении границ применения метода Брауна. *Известия Санкт-Петербургского государственного университета экономики и финансов*, 3, 94–107.

40. Mandelbrot, B. (2002). *Fraktalnaya geometriya prirody*. Institut kompyuternykh issledovaniy, 656, 12.
41. Marwan, N. (2011). How to avoid potential pitfalls in recurrence plot based data analysis. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 21 (4), 1003–1017. doi: <http://doi.org/10.1142/s0218127411029008>
42. Webber, Jr. C. L., Zbilut, J. P. (2005). Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*, 26–94.
43. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176579>
44. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.187252>
45. Орлова, И. В., Половников, В. А. (2010). *Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование*. Москва: ИНФРА-М, 366 .