

*Р. Г. Мелещенко, к.т.н., доцент, НУЦЗУ*

## **РАННЕЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ПОЖАРА НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИЯХ**

(представлено д.т.н. Андроновым В. А.)

Предложен новый принцип раннего выявления пожара в помещениях, основанный на текущем контроле нелинейной динамики состояния газовой среды в помещениях.

**Ключевые слова:** раннее обнаружение пожара, нелинейная динамика, состояние газовой среды помещения.

**Постановка проблемы.** Мировая статистика свидетельствует, что большее число пожаров происходит в помещениях. При этом отмечается, что число погибших на таких пожарах составляет свыше 80 % от общего числа погибших при всех видах пожаров. В этой связи одной из главных и приоритетных мировых проблем защиты людей от пожаров является раннее выявление таких событий в помещениях.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Газовая среда помещений представляет собой сложную систему, обладающую диссипативной структурой, нелинейной динамикой параметров и свойствами самоорганизации. В условиях возникновения пожара в помещении параметры газовой среды сложным образом реагируют на его появление. В такой системе классические принципы не способны выявлять сложные нелинейные реакции среды, поскольку основываются на линейных подходах, которые в этом случае обычно нарушаются [1]. Это приводит к ложной оценке сложной динамики состояния газовой среды в помещениях при возникновении пожара, что не позволяет на ее основе осуществлять раннее выявление пожаров. Однако с точки зрения раннего выявления пожаров характер динамики состояния газовой среды в помещениях имеет первостепенное значение. Поскольку на основе анализа сложной динамики состояния газовой среды помещения в начале возникновения пожара можно предупредить его возникновение, а также поражение и гибель людей, разрушение самих помещений и нанесения материального ущерба [2]. Следует заметить, что в настоящее время активной областью исследований являются методы нелинейной динамики состояния различных сложных систем [3, 4]. В частности, в [5] рассматриваются методы применения фрактальных множеств для анализа геофизических динамических систем. При этом новые принципы раннего выявления пожара в помещениях по состоянию газовой среды не рассматриваются. Экспериментальному изучению особенностей процесса возникновения пожара в помещениях посвящена работа [6]. Однако принципы раннего выявления пожара в помещениях по состоянию газовой среды не рассматриваются и не обсуждаются. Влияние теплового излучения на скорость выделения

тепла в различных горючих материалах приведено в работе [7]. Экспериментальное изучение режимов горения различных материалов под внешним тепловым воздействием, выполнено в работе [8]. Исследованию скорости тепловыделения при пожаре в типовых помещениях посвящена работа [9]. При этом в указанных работах отмечается, что динамика состояния газовой среды в помещениях на начальном этапе пожара носит сложный, нелинейный и нестационарный характер. В работе [10] отмечается, что для выявления начала пожара в помещениях важной оказывается текущая динамика параметров состояния газовой среды, а не ее усредненное значение. Известны методы, пригодные для выявления опасных параметров состояния газовой среды при пожаре [11]. Однако данные методы основываются на стационарном подходе, который позволят выявлять лишь усредненные энергетические показатели параметров газовой среды и не годятся для раннего выявления пожара.

В [12] рассматриваются методы частотно-временной локализации, которые оказываются сложными в реализации и малоприспособленными для раннего выявления пожара в помещениях. В [13] предлагается метод, основанный на применении кратковременного преобразования Фурье к стационарным фрагментам нестационарной динамики параметров. Однако на начальном этапе пожара в помещении выделить стационарные фрагменты динамики параметров состояния газовой среды не представляется возможным. При этом газовая среда как сложная динамическая система, генерирующая нестационарные состояния газовой среды при пожаре, не рассматривается и не изучается. Экспериментальному исследованию динамики скорости горения материалов в закрытых и вентилируемых помещениях посвящена работа [14]. Однако отсутствуют данные о характере динамики состояния опасных параметров газовой среды при возникновении пожара в помещениях. Исследованию динамики приращений отдельных параметров газовой среды и применению полученных результатов для раннего выявления пожара в помещениях посвящена работа [15]. При этом результаты исследований ограничиваются традиционными статистическими оценками приращений параметров состояния газовой среды. Исследование особенностей динамики состояния газовой среды как сложной системы в многомерном фазовом пространстве не рассматривается. В работах [10–15] отмечается, что возгорания материалов являются не только источником возникновения пожара, но и источником нарушения исходного равновесного состояния газовой среды в помещении. Указывается, что в общем случае состояние газовой среды при возникновении пожара в помещении характеризуется сложной нелинейной динамикой.

Рассмотрению общих методов идентификации нелинейных динамических систем посвящены работы [16, 17]. Применению метода кратковременного преобразования Фурье для анализа нестационарных параметров процессов посвящена работа [18]. При этом методы [16–18], оказываются достаточно сложными, что не позволяет использовать их для раннего выявления пожаров в помещениях. Однако новые принципы раннего выявления пожаров на основе методов нелинейной динамики

сложных систем в работах [16–18] не рассматриваются. Хотя новые принципы раннего выявления пожаров в помещениях, прежде всего, должны базироваться на результатах системного анализа динамики состояний газовой среды в помещении как сложной системы с учетом соответствующей размерности ее фазового пространства. Однако до настоящего времени такой анализ в известной литературе отсутствует. Например, в работе [19] рассматривается возможный принцип анализа особенностей динамики параметров газовой среды на этапе раннего возникновения пожара в помещениях. Отмечается, что данный принцип оказывается сложным в реализации и обладает низкой оперативностью.

Таким образом, в силу сложной динамики состояния газовой среды при возникновении пожара в помещениях возможно для раннего выявления пожара применение различных принципов. При этом известные принципы обладают рядом отмеченных недостатков, и поэтому их применение для раннего выявления пожаров в помещениях оказывается проблематичным. Более перспективными для раннего выявления пожара в помещениях следует считать принципы нелинейной динамики [20]. Однако применение этих принципов для раннего выявления пожара в помещениях, прежде всего, требует системного анализа состояния газовой среды при возникновении пожара в помещении. Поэтому важной и нерешенной частью рассматриваемой проблемы является рассмотрение нового принципа раннего выявления пожара в помещениях на основе контроля нелинейной динамики состояния газовой среды.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является рассмотрение нового принципа раннего выявления пожара в помещениях на основе контроля нелинейной динамики состояния газовой среды, базирующегося на системном анализе процесса возникновения пожара в помещении в виде системы взаимодействия объекта возникновения пожара, окружающей газовой среды и соответствующего объекта воздействия пожара.

Рассмотрим произвольное помещение, представляющее собой некоторую пожароопасную систему  $S = O \cup E$ . Данная система состоит из объекта возникновения пожара  $O$  (очага пожара), представляющего собой потенциальный источник возникновения пожара в помещении и окружающей среды  $E = C \cup R$  помещения, где  $C$  – газовая среда помещения. При этом  $R$  – объект, который подвергается воздействию пожара в помещении (люди, находящиеся в помещении, обслуживающий персонал, технологическое оборудование, агрегаты, конструкция помещения). В рассматриваемой системе объект  $O$  оказывает через газовую среду помещения  $C$  влияние на объект  $R$ . Пусть объект возникновения пожара  $O$  характеризуется состояниями  $y \in O$ . Такими состояниями могут быть, например, возгорания различных материалов или взрывы оборудования и агрегатов в технологических помещениях. Это означает, что состояния объекта  $O$  в текущие моменты времени  $t \in [0, T]$  будут описываться некоторой случайной функцией  $y = y(t)$ . Газовая среда  $C$  помещения осуществляет трансформацию опасных состояний  $y$  от источника к объекту

воздействия. В этом случае состояние газовой среды в каждой точке пространства помещения характеризуется соответствующим состоянием  $z \in C$ . При этом параметрами состояния газовой среды могут быть, например, опасные для людей или обслуживающего персонала факторы газовой среды. Прежде всего, это температура газовой среды, концентрация угарного газа и плотность дыма. В различные моменты времени состояние  $C$  характеризуется случайной функцией  $z=z(t)$ . Наконец, состояние объекта  $R$ , который подвергается воздействию объекта  $O$ , 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  $l$  будет определяться состоянием некоторой системы, определяемой  $SG = O \cup C$  и представлять собой функционал  $l=l(y(t),z(t))$ . Однако в рассматриваемой системе  $S = O \cup E$  состояние газовой среды  $z=z(t)$  в помещении определяется состоянием  $y=y(t)$  объекта возникновения пожара  $O$ . Поэтому параметр  $l$  будет определяться текущим состоянием газовой среды в помещении. Например, если ущерб, наносимый объекту  $R$ , зависит от состояния  $z=z(x,t)$  опасных факторов газовой среды в некоторой 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 человека или обслуживающего персонала.

Таким образом, раннее выявление пожара в помещениях можно осуществить на основе текущего контроля состояния  $z=z(t)$  газовой среды в помещениях с учетом потерь и ущерба, наносимых объекту  $R$  воздействием объекта  $O$  возникновения пожара.

Для обоснования нового принципа раннего выявления пожара в помещении на основе контроля состояния газовой среды рассмотрим более подробно функционал потерь (ущерба или риска)  $l=l(y(t),z(t))$ , характеризующий степень воздействия возможного возникновения пожара. В рассматриваемой системе  $S = O \cup E$  состояние газовой среды  $z=z(t)$  в помещении определяется состоянием  $y=y(t)$  объекта  $O$ . Это означает, что параметр  $l$  будет определяться текущим состоянием  $z_1(t,y(t))$  газовой среды в помещении с учетом текущего состояния  $y(t)$  объекта  $O$  возникновения пожара, т. е.  $l=l_1(z_1(t,y(t)))$ . Например, если ущерб, наносимый пожаром объекту воздействия  $R$ , зависит от состояния  $z_1=z_1(x,t,y(t))$  газовой среды в точке пространства  $x$  помещения объекта, то параметр  $l$  может быть представлен в виде соответствующей одномерной интегральной функции. В этом случае одномерная интегральная функция может определять, например, ингаляционную дозу опасных параметров состояния газовой среды для человека в помещении.

Таким образом, оказывается возможным на основе текущего контроля состояния  $z_1=z_1(t,y(t))$  газовой среды осуществлять раннее выявление пожара в помещении с учетом потерь наносимых пожаром объекту  $R$  воздействия. При этом в реальных условиях состояния  $z_1=z_1(t,y(t))$  га-

зовой среды в помещениях характеризуются нелинейной динамикой, которая зависит не только от состояния  $y(t)$  объекта возникновения пожара, но и от воздействия различных возмущений. В большинстве практических случаев данные об указанных возмущениях отсутствуют и единственной информацией для раннего выявления пожара оказываются текущие измерения нелинейной динамики состояния газовой среды с учетом возмущений [21]. Это означает, что на практике вместо нелинейной динамики состояний  $z_1=z_1(t,y(t))$  доступна измерению только нелинейная динамика состояния газовой среды  $z_1=z_1(t,y(t,n_i(t)),n_c(t))$ , где  $n_i(t)$  и  $n_c(t)$  определяют собой соответствующие возмущения состояний объекта опасности и газовой среды помещения. В большинстве случаев можно считать, что указанные возмущения являются аддитивными. Поэтому системная модель нового принципа раннего выявления пожара в помещении на основе контроля нелинейной динамики состояния газовой среды может быть представлена в виде, изображенном на рис. 1.

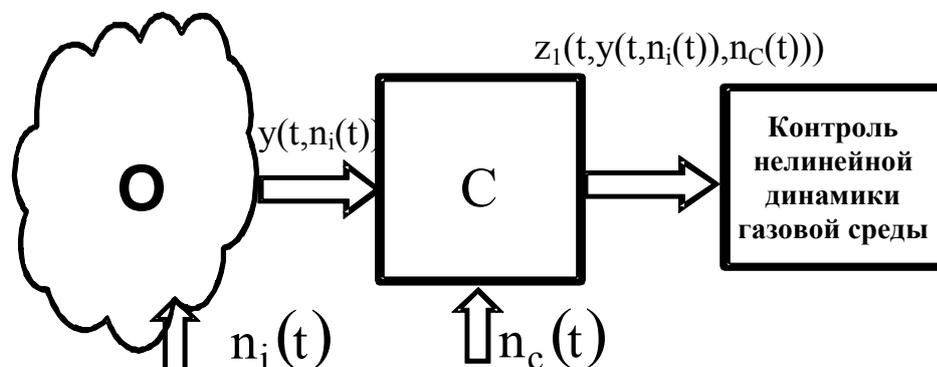


Рис. 1. Системная модель нового принципа раннего выявления пожара в помещениях

Состояние  $y(t,n_i(t))$  объекта возникновения пожара в общем случае характеризуется неопределенностью  $(H_1, H_0)$  появления или отсутствия возгорания соответственно, а также воздействием возмущений  $n_i(t)$ . Обычно возмущения  $n_i(t)$  и  $n_c(t)$  обусловлены различными факторами на всех этапах возникновения возгорания и передачи его влияния через газовую среду помещения объекту воздействия. В общем случае, следуя рис. 1, нелинейная динамика состояния  $z_1=z_1(t,y(t,n_i(t)),n_c(t))$  газовой среды с учетом неопределенности  $(H_1, H_0)$  объекта возникновения пожара может быть представлено в операторной форме

$$z_1(t) = C\{y(t, n_i(t)), n_c(t)\}_{H_1, H_0}, \quad (1)$$

где  $C\{*\}_{H_1, H_0}$  – в общем случае нелинейный оператор среды передачи состояния  $y(t)$  от объекта (очага) с учетом возмущений  $n_c(t)$  среды в случае наличия или отсутствия возгорания в помещении. С учетом представления состояния (1) раннее выявления пожара в соответствии с предлагаемым принципом должно осуществляться на основе оператив-

ного контроля нелинейной динамики состояния  $z_1=z_1(t,y(t,n_i(t)),n_c(t))$  газовой среды с учетом соответствующих возмущений. Отсутствие информации о возмущениях и динамике состояния газовой среды, а также неопределенности состояния очага возгорания в помещении обуславливают основную априорную трудность для достоверного раннего выявления пожара в соответствии с предлагаемым принципом.

С целью проверки нелинейности динамики отдельных параметров состояния газовой среды в помещениях объекта при возникновении пожара проводился эксперимент в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.

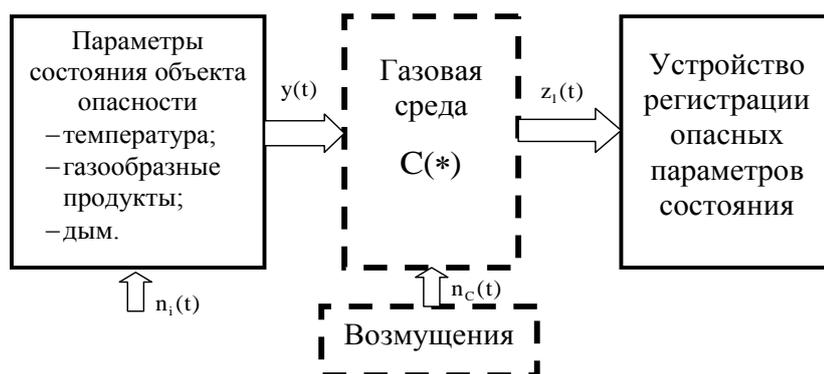


Рис. 2. Структурная схема эксперимента

Эксперимент проводился в негерметичной камере размером 1020мм\*840мм\*520мм, в верхней части которой размещались специальные сенсоры для регистрации основных параметров состояния газовой среды, опасных для объекта воздействия R, обусловленных воздействием объекта O возникновения пожара [22]. В качестве горючих материалов рассматривался спирт, ткань, бумага и древесина (в виде стружки среднего размера). Площадь тестового очага загорания составляла порядка 35см<sup>2</sup>, а максимальная высота пламени от основания очага составляла около 200–230 мм. Загорание материалов осуществлялось примерно на 20-ой секунде. В ходе эксперимента регистрировались температура, плотность дыма и концентрация СО газовой среды в камере в течение интервала времени 300 с, включающего момент поджога соответствующего горючего материала. В качестве иллюстрации на рис. 3 представлена динамика температуры газовой среды в камере при поджоге различных горючих материалов (Т1 – спирт, Т2 – бумага, Т3 – древесина, Т4 – ткань).

Аналогичные результаты исследования были получены для плотности дыма и концентрации СО газовой среды в камере при поджоге указанных материалов. Все результаты исследования динамики плотности дыма, температуры и концентрации СО газовой среды были получены с учетом реальных возмущений, действующих в камере, а также с помощью сенсоров, применяемых в современных тепловых, дымовых и газовых пожарных извещателях. На основе визуального анализа результатов исследования динамики указанных параметров состояния газовой среды

можно сделать вывод о не детерминированном, а более сложном характере динамики состояния. С целью выяснения степени сложности характера динамики газовой среды в камере вычислялась корреляционная размерность [22] вектора состояния (1), определяемого текущими значениями плотности дыма, температуры и концентрации CO газовой среды в камере. Вычисление корреляционной размерности  $K_p$  исследуемого вектора состояния газовой среды в камере осуществлялось на интервале времени, длительностью 5 секунд, для трех характерных интервалов времени. Первый интервал (от 0 секунд до 5 секунд) соответствовал отсутствию загорания ( $H_0$ ) тестового материала. Второй интервал (от 19 секунд до 24 секунд) включал момент поджога ( $H_1$ ) материала, а третий интервал (от 40 секунд до 45 секунд) соответствовал начальному этапу возгорания.

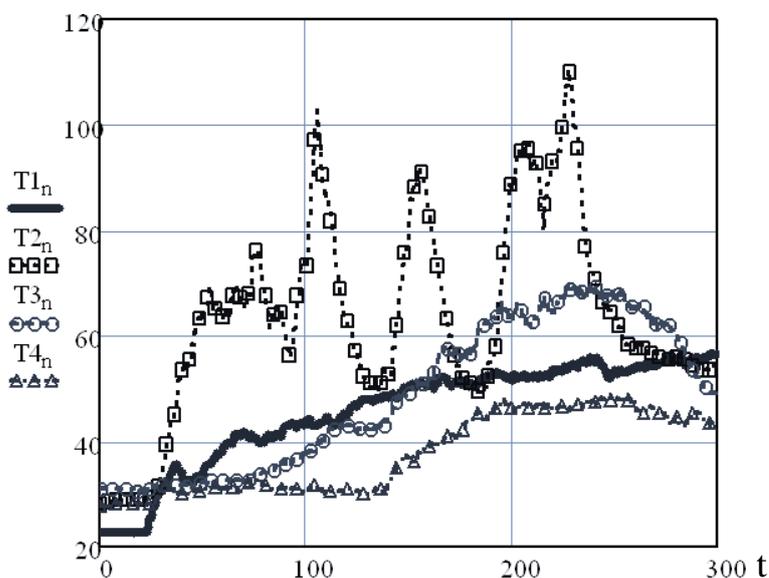


Рис. 3. Динамика температуры газовой среды в камере

На рис. 4 приведены вычисленные  $K_p$  вектора состояния газовой среды в камере для указанных характерных интервалов времени при поджоге спирта и бумаги: кривая красного цвета – первый интервал; кривая синего цвета – второй интервал; кривая зеленого цвета – третий интервал.

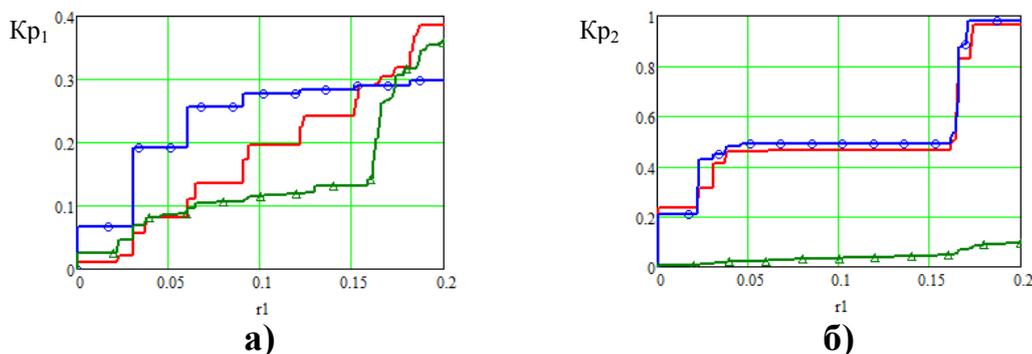
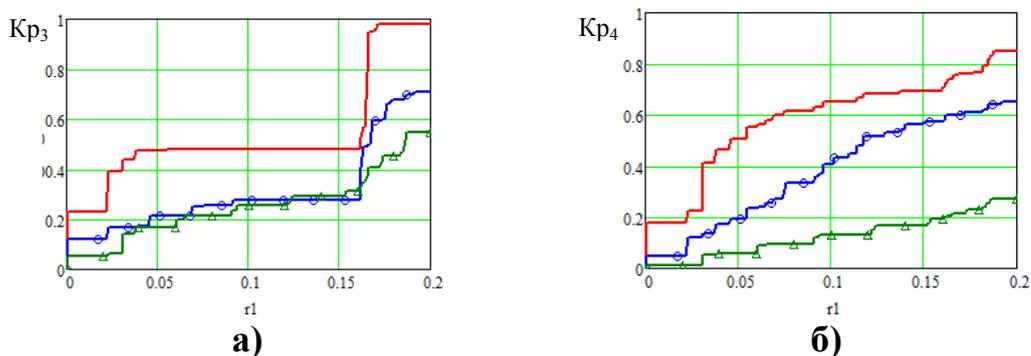


Рис. 4. Корреляционная размерность вектора состояния газовой среды в камере для характерных интервалов времени при поджоге различных материалов: а) спирт; б) бумага

На рис. 5 приведены аналогичные зависимости для древесины и ткани. При этом на рис. 4 и рис. 5 величина  $r_1$  допустимую область рекуррентности для исследуемого вектора состояний газовой среды в камере.



**Рис. 5. Корреляционная размерность вектора состояния газовой среды в камере для характерных интервалов времени при поджоге различных материалов: а) древесина; б) ткань**

Из анализа данных, представленных на рис. 4 и рис. 5, следует, что реальная динамика вектора состояния газовой среды (плотности дыма, температуры и концентрации  $CO$ ) при загорании тестируемых материалов в камере носит нелинейный, нестационарный и хаотический характер с признаками различной фрактальности. Это доказывает справедливость предположения о нелинейной динамике (1). При этом установлено, что фрактальность нелинейной динамики состояния газовой среды в момент поджога материалов резко изменяется. Указанные изменения носят неодинаковый характер и зависят от вида горючего материала. Это подтверждает в целом возможность раннего выявления пожара на основе текущего контроля динамики состояния газовой среды в помещениях. При этом для выявления возгораний по состоянию газовой среды необходимо использовать современные методы анализа нелинейной динамики, основанные, например, на методах рекуррентных диаграмм, корреляционной размерности или других методах [20, 21].

В общем случае для адекватного описания динамики состояния газовой среды помещений при возникновении пожара, следуя данным на рис. 4 и рис. 5, может потребоваться система соответствующих стохастических дифференциальных уравнений в переменных состояния высокого порядка. Такая система позволит в принципе синтезировать как оптимальные измерители составляющих вектора состояния газовой среды, так и технические устройства для раннего выявления пожаров в помещениях.

**Выводы.** Предложен новый принцип раннего выявления пожара в помещениях на основе контроля нелинейной динамики состояния газовой среды в помещениях. Показано, что газовая среда в помещениях служит средством передачи опасных воздействий (температуры, концентрации угарного газа, плотности дыма и других опасных факторов) к объекту воздействия. Поэтому нелинейная динамика состояния газовой среды может рассматриваться в качестве конструктивного признака раннего выявления пожара. Экспериментальная проверка динамики основных опас-

ных для человека параметров состояния газовой среды в помещениях при загорании спирта, бумаги, древесины и ткани в модельной камере подтвердила ее нелинейный и хаотический характер. При этом установлено, что нелинейный характер динамики состояния газовой среды зависит от вида горючего материала и может рассматриваться в качестве конструктивного признака раннего выявления загораний в помещениях. В целом полученные результаты свидетельствуют о возможности предлагаемого принципа раннего выявления пожара путем текущего контроля нелинейной динамики газовой среды в помещении. Это означает, что известные традиционные технологии, которые базируются на линейном характере динамики состояния газовой среды, оказываются достаточно грубыми и малоэффективными для раннего выявления пожаров в помещениях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Andronov V., Pospelov B., Rybka E. Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2, Issue 9 (86). P. 32–37.
2. Mathematical model of the efficiency of diesel particulate matter filter / Kondratenko O. M., Vambol S. O., Stokov O. P., Avramenko A. M. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015. Issue 6. P. 55–61.
3. Vasyukov A., Loboichenko V., Bushtec S. Identification of bottled natural waters by using direct conductometry Ecology // *Environment and Conservation*. 2016. Vol. 22, Issue 3. P. 1171–1176.
4. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V. 3/9(93). P. 34–40.
5. Turcotte D. L. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge university press, 1997.
6. Poulsen A., Jomaas G. Experimental Study on the Burning Behavior of Pool Fires in Rooms with Different Wall Linings // *Fire Technology*. 2011. Vol. 48, Issue 2. P. 419–439.
7. Zhang D., Xue W. Effect of heat radiation on combustion heat release rate of larch // *Journal of West China Forestry Science*. 2010. Issue 39. P. 148.
8. Ji J., Yang L., Fan W. Experimental study on effects of burning behaviours of materials caused by external heat radiation // *JCST*. 2003. Issue 9. P. 139.
9. Peng X., Liu S., Lu G. Experimental analysis on heat release rate of materials // *Journal of Chongqing University*. 2005. Issue 28. P. 122.
10. Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises / Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S., Shcherbak S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, Issue 10 (90). P. 50–56.
11. Bendat J. S., Piersol A. G. *Random data: analysis and measurement procedures*. 2th ed. John Wiley & Sons, 2010.
12. Techniques to Obtain Good Resolution and Concentrated Time-Frequency Distributions: A Review / Shafi I., Ahmad J., Shah S. I., Kashif F. M. // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2009. Vol. 2009, Issue 1.

13. Singh P. Time-frequency analysis via the fourier representation // HAL. 2016.

14. Pretrel H., Querre P., Forestier M. Experimental Study Of Burning Rate Behaviour In Confined And Ventilated Fire Compartments // Fire Safety Science. 2005. Vol. 8. P. 1217–1228.

15. Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Popov V., Romin A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, Issue 10 (91). P. 50–55.

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

17. Avargel Y., Cohen I. Modeling and Identification of Nonlinear Systems in the Short-Time Fourier Transform Domain // IEEE Transactions on Signal Processing. 2010. Vol. 58, Issue 1. P. 291–304.

18. Giv H. H. Directional short-time Fourier transform // Journal of Mathematical Analysis and Applications. 2013. Vol. 399, Issue 1. P. 100–107.

19. Development of the method of frequencytemporal representation of fluctuations of gaseous medium parameters at fire / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Popov V., Semkiv O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 10 (92). P. 44–49.

20. Mandelbrot B. Fraktalnaya geometriya prirody // Institut kompyuternykh issledovaniy. 2002. V. 656. P. 12.

21. Marwan N. How to avoid potential pitfalls in recurrence plot based data analysis // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2011. V. 21 (04). P. 1003–1017.

22. Пospelov Б. Б., Андронов В. А., Рыбка Е. А., Мелешенко Р. Г., Карпец К.М. Разработка конструктивных методов повышения эффективности автоматического обнаружения возгораний в компрессорных станциях газотранспортных систем Украины. Монография. Харьков: НУГЗУ, 2018. С. 172.

*Получено редколлегией 08.01.2020*

Р. Г. Мелешенко

**Новий принцип раннього виявлення пожежі на основі контролю динаміки стану газового середовища в приміщеннях**

Запропоновано новий принцип раннього виявлення пожежі в приміщеннях, заснований на поточному контролі нелінійної динаміки стану газового середовища в приміщеннях.

**Ключові слова:** раннє виявлення пожежі, нелінійна динаміка, стан газового середовища приміщення.

R. Meleschenko

**The new principle of early fire detection based on monitoring the dynamics of the state of the gas environment in the premises**

A new principle is proposed for the early detection of a fire in rooms, based on the current monitoring of the nonlinear dynamics of the state of the gas environment in the rooms.

**Keywords:** early fire detection, nonlinear dynamics, the state of the gas environment of the room.