

*А.А. Левтеров, к.т.н., с.н.с., докторант, НУГЗУ,
В.В. Тютюник, д.т.н., с.н.с., нач. каф., НУГЗУ,
В.Д. Калугин, д.х.н., профессор, профессор каф., НУГЗУ*

МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

(представлено д.т.н. Чубом И.А.)

Установлены эффекты акустической эмиссии (АЭ) при горении целлюлозосодержащих материалов, которые использованы для разработки установки записи и общего алгоритма обработки по лученным спектров. Показана правомочность анализа методов идентификации амплитудно-частотных характеристик АЭ процесса горения целлюлозосодержащих материалов. Предложены способы идентификации АЭ при помощи фрактальной размерности для реального (необработанного) сигнала и выделения пиковых частот спектра АЭ.

Ключевые слова: целлюлозосодержащие материалы, процесс горения, акустическая эмиссия процесса горения, характеристические спектры, фильтрация спектра, измерительная установка, раннее обнаружение возгорания, фрактальная размерность.

Постановка проблемы. Эффективность обеспечения пожарной безопасности зависит от вероятности раннего обнаружения очага возгорания [1-4]. Вследствие этого, проблема заключается в повышении эффективности и достоверности раннего обнаружения очага возгорания.

Для решения данной проблемы, необходимо, в качестве факторов, характеризующих процесс загорания, использовать новые физические явления, не применявшиеся ранее, сопровождающие процесс раннего загорания. К таким новым факторам и методам можно отнести обнаружение очага загорания на основе физического явления, как эффект акустической эмиссии (АЭ) процесса горения.

Также необходимо разработать методику и теоретические основы по идентификации процесса горения целлюлозосодержащих материалов по эффекту акустической эмиссии.

Анализ последних исследований и публикаций. Сравнительный анализ различных типов детекторов пожарных извещателей и физических факторов процесса горения, на которых они основаны, более полно представленный в [5]. Данный анализ позволил выделить две группы по областям функционирования: обнаружение газо-подобных продуктов горения на этапе возможного появления пожара – первая группа; обнаружение возрастающей температуры и факела горения на этапе, установившегося (стационарного) процесса горения – вторая группа. Подробный анализ устройств регистрации раннего возгорания, также приведен в статье авторов [5]. Повышение эффективности раннего обнаружения источников возгораний ограничено характеристиками физико-химических принципов

анализа среды возгорания, заложенных в работу чувствительных элементов рассматриваемых пожарных устройств обнаружения загораний.

Согласно выше изложенного, использование такого физического явления, как АЭ процесса горения в системах раннего обнаружения загораний, до сегодняшнего момента не применялось.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной статьи является развитие научно-технических основ, программных средств, а также теоретического обоснования и методов для достоверной идентификации явления АЭ процесса раннего загорания. Данные разработки будут применены для создания акустического извещателя в основу функционирования которого заложен принцип анализа амплитудно-частотных характеристик акустических колебаний, генерируемых источником возгорания, а также методика их идентификации.

Физико-химическая суть акустической эмиссии при горении заключается в том, что в процессе протекания окислительно-восстановительной реакции возникает спектр колебаний, связанных с возникновением и разрушением на молекулярном уровне напряжений в кристаллической решетке материала. В жидкостях происходит перемещение масс реагентов и продуктов и образование пузырьков газа, приводящих к колебаниям окружающей среды объекта загорания (кавитационные явления). Чем больше молекул вещества задействовано в процессе протекания реакции, тем интенсивнее горение и мощнее звуковая волна. В связи с этим, идентификация и регистрация данного явления, связана с решением задачи измерений волновых процессов и их последующей обработки.

Эффект акустической эмиссии имеет место на всех стадиях горения, пока есть деструкция материала и температурный градиент внутри очага горения. При появлении открытого пламени, когда реакция горения переходит в устойчивую стадию, интенсивность звуковых колебаний резко возрастает. Это обусловлено тем, что при горении твердых тел усиливается эффект деструкции и деформации материала. Увеличение интенсивности звуковых колебаний при горении жидкофазных материалов связано с переходом в стадию кипения поверхностного слоя на границе пламени. При этом необходимо отметить, что и само пламя вызывает значительные колебания воздуха за счет неравномерности течения реакции горения. Помимо того, выделение газовых составляющих при горении как твердых, так и жидких веществ, также приводит к локальным колебаниям воздуха в месте выхода газа из зоны горения [6, 7, 8-10].

Система раннего обнаружения, на основе анализа эффекта акустической эмиссии при протекании процесса горения в очаге возгорания, включает акустический пожарный извещатель (АПИ), а также автоматические системы обнаружения (АСОП) и тушения (АСТП) пожара. Блок АПИ включает акустический чувствительный элемент (АЧЭ) и пороговое устройство (ПУ) или несколько чувствительных элементов и пороговых устройств.

Принцип функционирования такой системы пожарной автоматики представлен на рис. 1. Теоретические основы формирования такой схемы измерений включают следующие положения проявления акустического эффекта и его теоретического обоснования.

Поскольку во всей системе единичное изменение объема в виде единого импульса не может произойти (в силу физических свойств), то в системе будут возбуждаться акустические колебания.

Акустическая эмиссия любой химической реакции, в том числе и процесса горения, имеет квазистационарный характер и является следствием выделения или поглощения энергии, что приводит к возникновению волн упругости (напряжения) в реакционной среде, которые можно обнаружить, используя датчики, обеспечивающие прием слабых сигналов на фоне собственных шумов. Следовательно, информация о состоянии материала и процессах, сопровождающих горение этого материала, представляет собой характеристический частотный спектр механических волн (колебаний), характеризующийся частотно-временным энергетическим показателем $W_{\text{Горение}}^{\text{Акуст.}}(F, t)$. В связи с тем, что процесс акустической эмиссии характеризуется импульсами длительностью (10^{-8} - 10^{-4}) с (время элементарного акта передачи \bar{e} в химической реакции), а энергия отдельного импульса составляет от 10^{-9} до 10^{-5} Дж, то частотный спектр акустической эмиссии лежит в широких пределах – от области инфразвука и частот слышимого звука до десятков и сотен МГц. Интенсивность импульсов акустической эмиссии зависит от объема зоны, в которой вещество подвергается деструкции, а также от изменения объема продуктов реакции [4, 11, 12].

Значения амплитуды механических колебаний (звуковые волны) в твердых телах при химических реакциях, согласно [8–10], находятся в пределах от $1 \cdot 10^{-4}$ до 5 мм.

На основе выше изложенного можно утверждать, что характерный частотный диапазон химических реакций, в соответствии с данными рис. 2 [6, 7], выходит за область частотных диапазонов, присущих производственным помещениям и помещениям с пребыванием людей. Следовательно, можно выделить характерный для очага загорания спектр излучаемых звуковых волн на фоне общего звукового излучения.

Генерация колебаний в инфразвуковом диапазоне очага загорания позволяет повысить эффективность функционирования автоматической системы раннего обнаружения пожара по сравнению с системами, работающими в других частотных диапазонах звуковых колебаний. К преимуществам измерений в инфразвуковом диапазоне необходимо отнести: 1) большие амплитуды колебаний в сравнении с равномошным слышимым человеком звуком; 2) способность распространения колебаний в воздухе с незначительным затуханием; 3) характерное для инфразвука явление дифракции благодаря большой длине волны, вследствие чего инфразвуковая волна легко проникает в помещения и огибает преграды.

Для реализации предлагаемого способа обнаружения очага загорания, необходимо определить параметры акустического чувствительного элемента АПИ, представляющего собой акустическую антенну (микрофон) или чувствительный диффузор. Выбор чувствительного элемента описан в статье авторов [5].

На основании изложенного в [5], для устройства регистрации акустических колебаний, генерируемых в ходе акустической эмиссии при

горении, может быть применен микрофон с чувствительностью не ниже $9 \cdot 10^{-4}$ Па, например, микрофон Panasonic WM-61A.

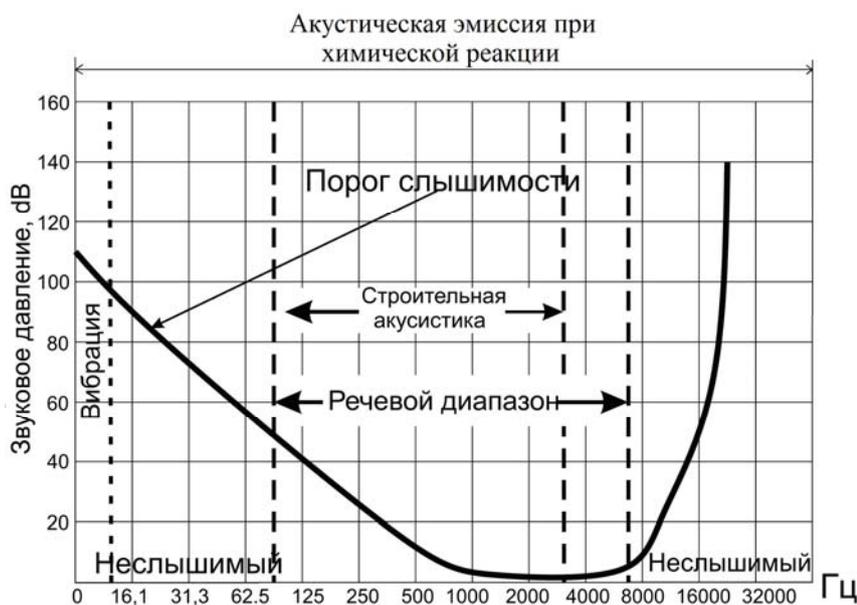


Рис. 2. Спектральные характеристики эффекта акустической эмиссии химической реакции, строительной акустики и речевого диапазона

Для проведения исследований эффекта акустической эмиссии на стадиях горения различных горючих материалов разработана лабораторная установка, структурная схема и внешний вид которой представлены на рис. 3, где П – пирометр; Г – газоанализатор; М – микрофон; У – усилитель; К – компьютер.

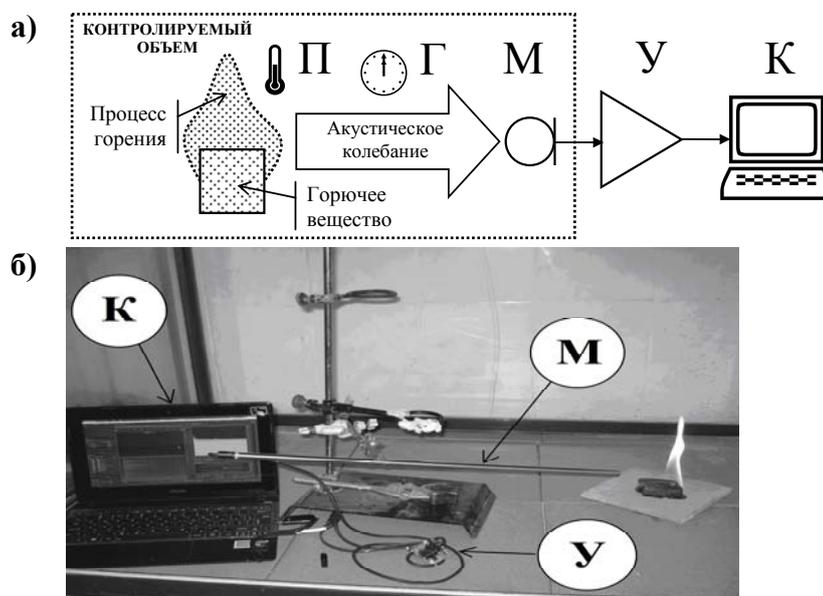


Рис. 3. Схема установки для исследования АЭ акустической эмиссии на стадиях горения различных горючих материалов

Для исследования явления акустической эмиссии были выбраны 4 образца целлюлозосодержащих материалов – бумага, картон, вата, бинт и образец древесины, с каждым из которых проведено по 3 эксперимента

с записью акустических спектров излучения при горении образцов.

Обработка получаемых спектров акустических колебаний процесса горения, проводилась с помощью специально разработанных и готовых компьютерных программ по заранее созданному алгоритму (рис. 4).

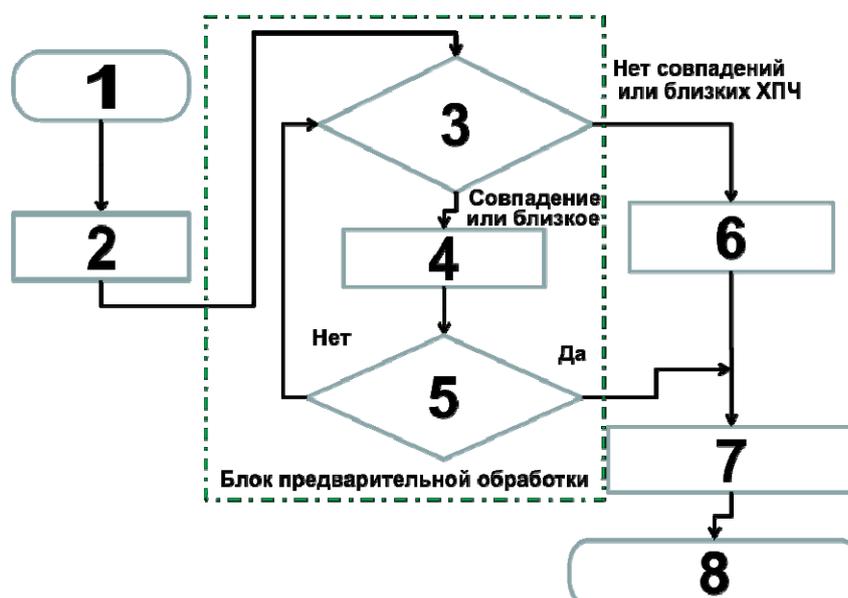


Рис. 4. Алгоритм обработки спектров акустической эмиссии источника загорания

Для получения звукового файла и мгновенных срезов спектра использовалось программное обеспечение Adobe Audition CC v9.2; обработка и анализ спектра аудиофайла реализовано в среде MatLab R2016b.

Краткое описание алгоритма, приведенного на рис. 4: 1 – калибровка по эталонному сигналу для проверки работоспособности системы обнаружения очага возгорания; 2 – запись фонового сигнала. Продолжительность записи зависит от особенностей частотных и амплитудных характеристик фона в помещении, где производится детектирование; 3 – проверка фона на характерные пиковые частоты и амплитуды (ХПЧ) заданных частотных диапазонов для исключения ложного обнаружения, поскольку в момент записи фона (блок 2), уже может быть сигнал от источника загорания. При совпадении характерных пиковых амплитуд или близких к ним значений осуществляется многократная запись (число записей и время (блок 4, 5) зависят от особенностей фона) и анализ сигнала на количество совпадений (количество процедур также определяется характеристиками фона) характерных пиковых амплитуд заданных частотных диапазонов; Таким образом блоки 3, 4 и 5 формируют модуль предварительной обработки сигнала, для исключения попадания в фоновый сигнал сигналов АЭ от объектов детектирования. 6 – при отсутствии характерных пиковых амплитуд в записанном фоне производится запись полезного сигнала; 7 – обработка полезного сигнала, которая включает: преобразование Фурье, фильтрацию сигнала от фона и посторонних шумов, анализ сигнала с помощью эволюционных алгоритмов и систем искусственного интеллекта. 8 – наличие информации о результатах обработки полезного сигнала в форме команды «обнаружено/не обнаружено» и передача ее на исполнение.

С использованием представленной экспериментальной базы в работе проведены исследования спектральных характеристик горения целлюлозосодержащих материалов, как наиболее распространенных на объектах с пребыванием людей.

Схема, иллюстрирующая этапы исследования горения целлюлозосодержащих материалов и проявления эффекта акустической эмиссии на стадиях горения, представлена в [5].

Пример результатов проведенных экспериментов после соответствующей обработки представлены на рис. 5 в виде амплитудно-частотных акустических спектров для древесины (сосна). Результаты по другим целлюлозосодержащим материалам (бинт, картон, бумага, вата) приведены в [5].

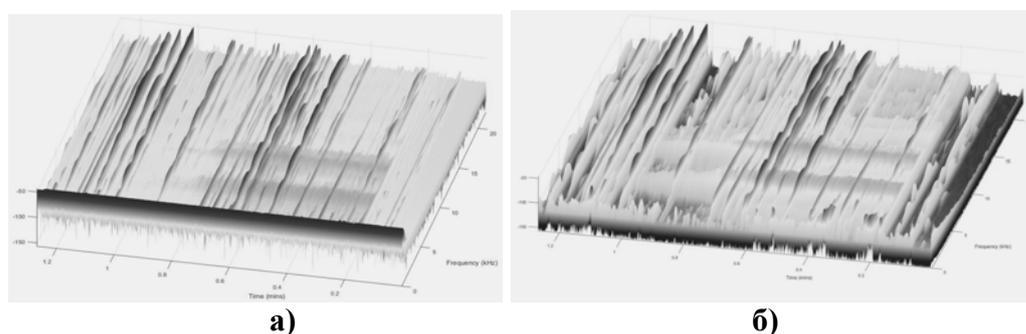


Рис. 5. Акустические спектры горения первого образца дерева до (а) и после (б) фильтрации от фоновых помех

Обработка полученных спектров в единых координатах P_{\min}/P_a (относительная амплитуда сигнала) от f (частота сигнала) показала удовлетворительную сходимость пиковых амплитуд испытуемых образцов в различных диапазонах частот от 5 Гц до 25 кГц. Результаты сопоставительного анализа показаны на рис. 6.

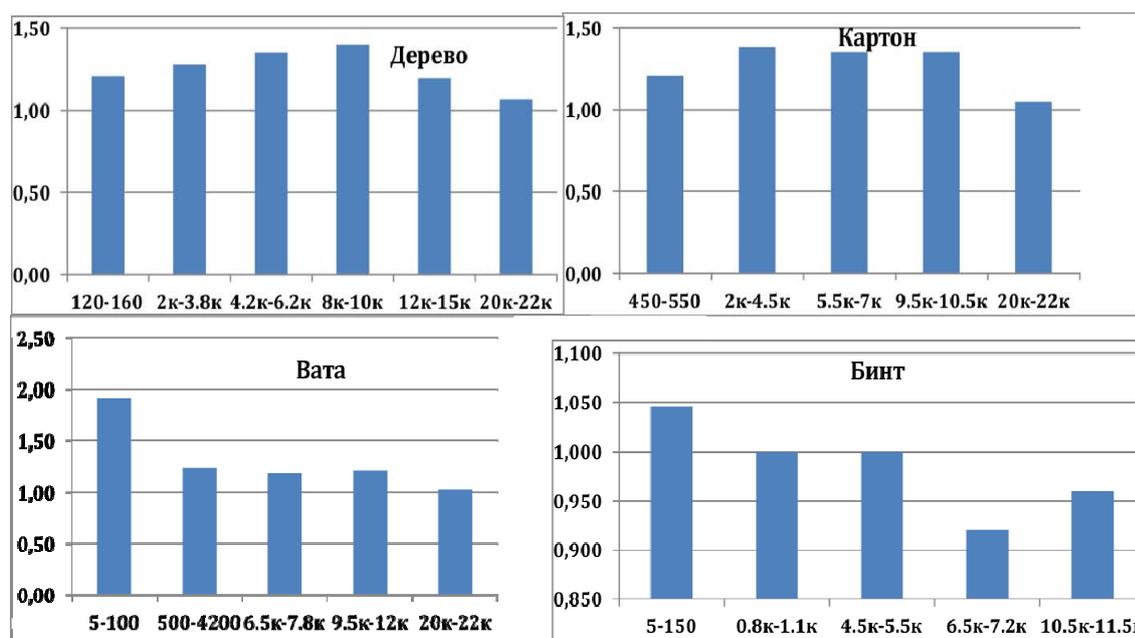


Рис. 6. Распределение характерных пиковых относительных амплитуд частотного спектра АЭ испытуемых образцов

Несходимость для некоторых диапазонов частот может быть объяснена различным содержанием целлюлозы в образцах (например, для картона), а также спецификой самого процесса высокотемпературного окисления, существенно зависящего от других компонент материала и структуры испытываемых образцов.

Для практического использования результатов амплитудно-частотных характеристик целлюлозосодержащих материалов при оценке возможного возгорания в помещениях с большим количеством материалов, содержащих целлюлозу, необходимо установить характерные частотные области, в которых относительная амплитуда процесса акустической эмиссии от горения исследованных материалов максимальна.

На рис. 7 показана интегральная гистограмма распределения пиковых амплитуд спектров акустической эмиссии при горении исследованных материалов. Видно, что процесс горения характеризуется высокой кучностью максимальных амплитуд в областях частот от 5 до 200 Гц и от 400 Гц до 25кГц (рис. 8). Хотя на рис. 7 максимальная сходимость амплитуд наиболее характерна для диапазона частот (450-2500) Гц и (10-11) кГц.

Результаты исследований показывают, что процесс горения целлюлозосодержащих материалов характеризуется наличием спектров акустической эмиссии в низкочастотном диапазоне от 0 до 800 Гц, в среднем от 1000 до 6000Гц и в высокочастотном диапазоне от 10 до 25,4 кГц.

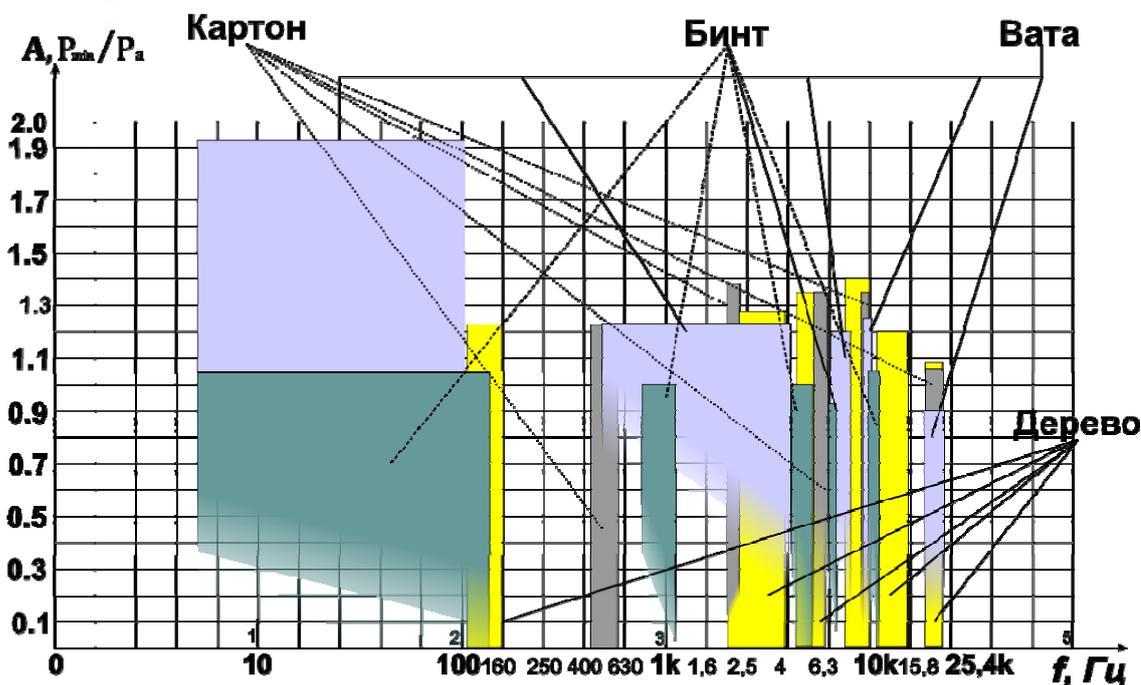


Рис. 7. Интегральное распределение характерных пиковых относительных амплитуд спектров АЭ в диапазоне частот 5 Гц ÷ 20,4 кГц

Амплитудная характеристика максимальна ($P_{min}/P_a = 1,92$, где $P_{min}=115$ dB) для ваты в низкочастотной области значительно выше в сравнении с амплитудными характеристиками других исследуемых материалов ($1,0 - 1,4 = P_{min}/P_a$) как для низкочастотных, так и для высокочастотных областей.

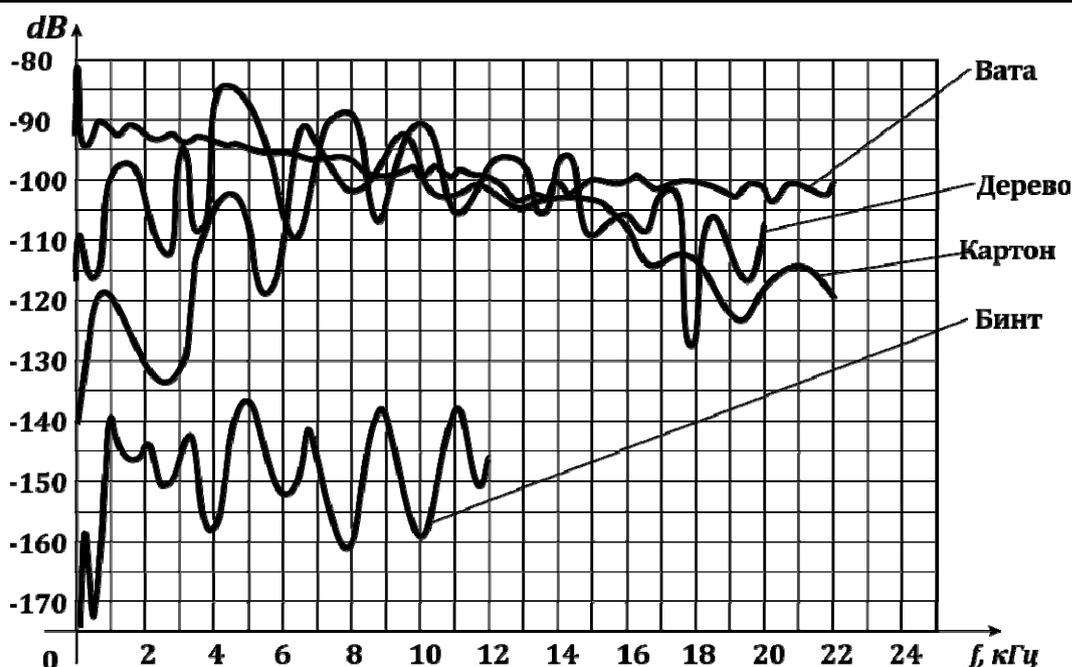


Рис. 8. АЧХ спектров АЭ исследуемых образцов, взятая как средняя по каждому образцу

Сравнение акустических спектров процесса горения целлюлозосодержащих материалов показывает их устойчивое сходство, но в тоже время и различие в зависимости от вида материала. Чтобы провести полноценное сравнение результатов, подтвердить их «неслучайность» и сделать соответствующие выводы о возможности однозначной идентификации спектра процесса АЭ различных материалов, применим другой метод идентификации спектра процесса АЭ.

Для этого переведем полученные акустические сигналы в числовой вид, воспользовавшись одним из методов спектральной обработки сигналов. Метод основан на фрактальном анализе свойств временного ряда [13-15].

Т.к. снимаемый звуковой сигнал (АЭ) представляет собой набор значений, известных только в дискретные моменты времени, т.е. $t_n = n\Delta t$, $n = 0 \dots N - 1$, то сигнал можно записать в виде:

$$x_n = x(t_n) = \frac{\Delta\omega}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} X(\omega_k) e^{i2\pi kn/N}, \quad (2)$$

где ω — частота, а k — номер гармоники [16] или, что удобнее для дальнейшего анализа, как

$$x(t) = \text{trend}(t) + x^h(t) + r(t), \quad (3)$$

где $\text{trend}(t)$ — тренд, аппроксимирующийся полиномом 1, 2 или более высокой степенью; $t=t_0, t_1, \dots, t_n$ — моменты времени (равные отсчеты); $x^h(t)$ — компонент, выражающий меру хаотичности ряда, описывающий

характер процесса и зависящий от показателя Херста $H(t)$ или показателя фрактальной размерности D_t [13, 17]; $r(t)$ – случайный шум [18].

Фрактальная размерность D временного ряда (3) позволяет определить его свойства, связанные с хаотичностью, случайностью и регулярностью [16], что может быть использовано для идентификации сигнала АЭ, а, следовательно, и для обнаружения раннего процесса возгорания соответствующих материалов. Значение величины фрактальной размерности находится в пределах $1 < D < 2$.

Если значение D сигнала АЭ у образцов в пределах одной выборки (процесс АЭ 3-х образцов) даст схожие результаты и будет отличаться от значений D в выборке другого образца, который также даст схожие значения, то можно утверждать с высокой долей вероятности, что такой подход можно применить при идентификации процесса АЭ раннего возгорания.

Фрактальная размерность D связана с показателем Херста H [13] зависимостью

$$D = 2 - H, \quad (4)$$

а показатель H определяется из эмпирического закона Херста [13]:

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{n}{2} \right)^H, \quad (5)$$

где R – максимальный размах исследуемого ряда, определяемый как $R = x_{\max}(t) - x_{\min}(t)$; S – среднеквадратическое отклонение наблюдений; n – количество наблюдений (может принимать любое целое значение и соответствует отсчетам временного интервала исследования сигнала); t – интервал времени состоящий из n отсчетов.

Анализ уравнения (5) показал, что при $H = 0,5$ – процесс случайный. Если $0 < H < 0,5$, процесс антиперсистентный, временный. При $0,5 < H < 1$, процесс является персистентным, то есть долговременным [17, 18]. И только при $1 < H < 2$ процесс приобретает динамический характер.

Дробная размерность сигнала, полученная в данном случае, как совокупность фона и АЭ соответствующего процесса горения, результаты расчетов дробной размерности для образцов дерева, бумаги, ваты, бинта и картона приведены на рис. 9. А на рис. 10 приведена динамика изменения фрактальной размерности $D(t)$ для 4 видов образцов и построены средние значения для 3 опытов. Обращает на себя внимание немаловажный факт существенной близости приведенных показателей для образцов дерева и прессованного картона.

На основании результатов, полученных разными методами, исследований процесса АЭ (были применены: анализ спектра на характерные пиковые частоты и метод динамики фрактальной размерности) можно утверждать, что процесс АЭ различных материалов поддается однозначной идентификации и может быть использован как новый фактор обнаружения раннего возгорания.

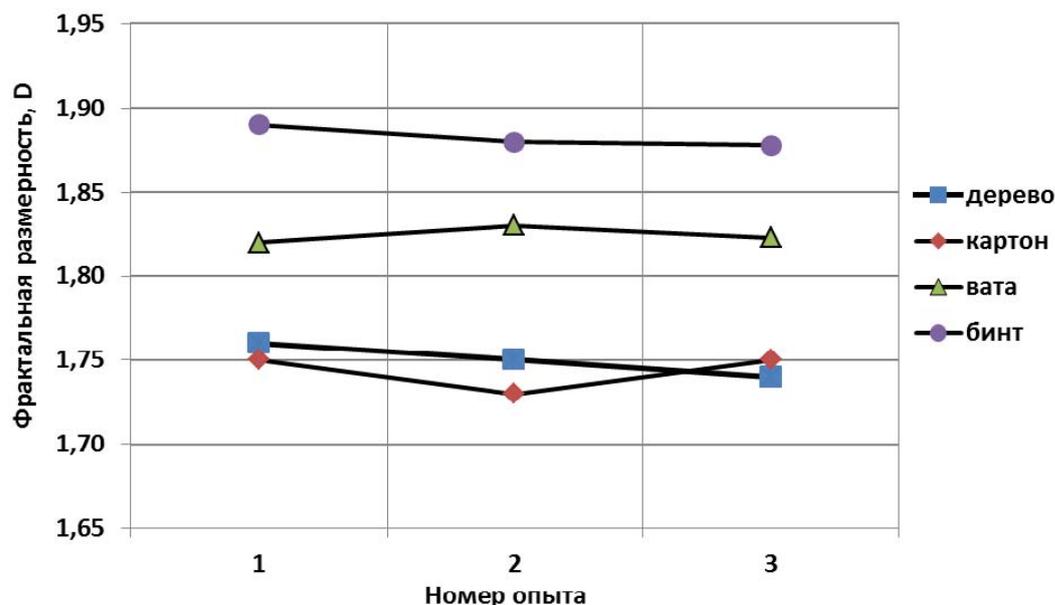
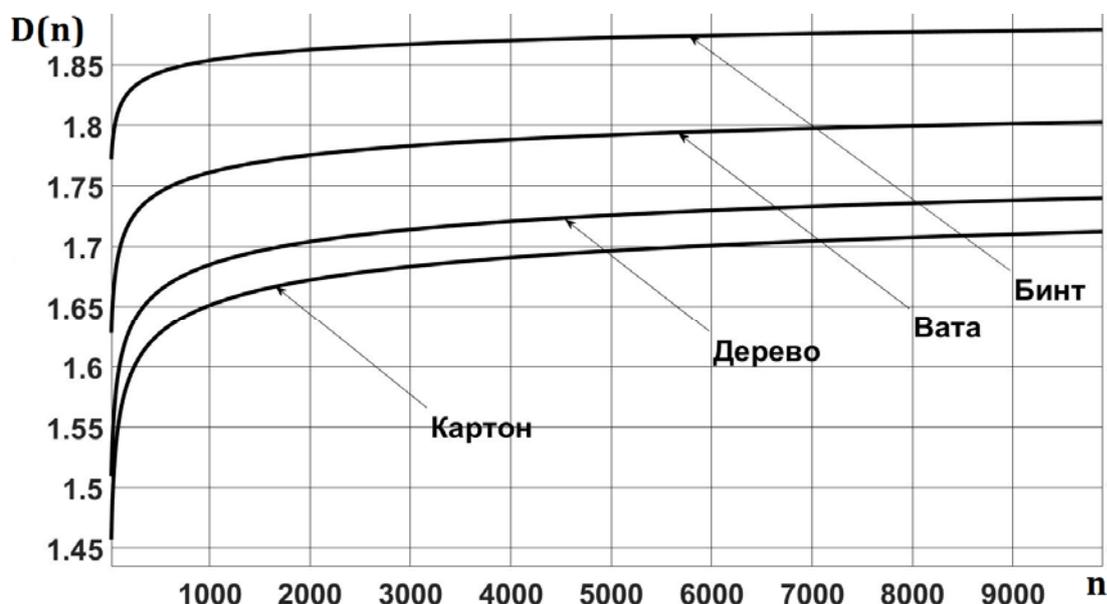


Рис. 9. Значение фрактальной размерности испытуемых образцов

Рис. 10. Среднее значение фрактальной размерности $D(n)$ испытуемых образцов (n – число временных отсчетов)

Приведенные результаты (рис. 9 и 10), также подтверждают полученные и при анализе пиковых частот спектров.

Поэтому, предлагаемые авторами, одновременное применение этих методов в схеме алгоритма (рис. 4) дает возможность повысить степень достоверности обнаружения раннего возгорания и снизить вероятность ложных срабатываний устройства обнаружения, основанного на эффекте АЭ.

Выводы. Исследования особенностей процесса акустической эмиссии при горении различных целлюлозосодержащих материалов и идентификации их спектров различными методами, указывают на высокую эффективность возможного обнаружения и установления фактов возгорания в помещениях с большим содержанием этих материалов (мебель, пиломатериалы, ткани, медицинские материалы и прочее). Результаты

проведенных экспериментов подтверждают, что процесс АЭ может быть использован как новый фактор для обнаружения раннего возгорания. Для идентификации АЭ разработана схема измерения, алгоритм и программное обеспечение для обработки полученных амплитудно-частотных характеристик спектров АЭ процесса горения. В этой связи в работе предложена система идентификации АЭ по значению фрактальной размерности для реального (необработанного и не преобразованного) сигнала, в котором не удален фон и выявления пиковых частот спектра АЭ на в сигнале с удаленным фоном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брушлинский Н.Н. Проблема пожаров в мире в начале XXI столетия / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – № 1. – С. 7-14.
2. World Fire Statistics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report22_world_fire_statistics_2017.pdf.
3. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dsns.gov.ua>.
4. Фёдоров А.В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара / А.В. Фёдоров, А.Н. Членов, А.А. Лукьянченко, Т.А. Буцынская, Ф.В. Демёхин. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 160 с.
5. Левтеров А.А. Использование эффекта акустической эмиссии при раннем обнаружении возгорания целлюлозосодержащих материалов объектовой подсистемой универсальной системы мониторинга чрезвычайных ситуаций в Украине / А.А. Левтеров, В.Д. Калугин, В.В. Тютюник // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков.–ХНУРЭ.– Т. 16. – №1, 2. – 2017. – С. 23-40.
6. Смирнов А.Н. Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах / А.Н. Смирнов // Российский химический журнал. – 2001. – т. XLV. – № 1. – С. 29-34.
7. Фадеев Г.Н. Акустическая резонансная частота химических реакций / Г.Н. Фадеев, В.С. Болдырев, Н.Н. Кузнецов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/chem/787.html>.
8. Асминг В.Э. Анализ инфразвуковых сигналов, генерируемых техногенными источниками / В.Э. Асминг, З.А. Евтюгина, Ю.А. Виноградов, А.В. Федоров // Вестник МГТУ. – 2009. – т. 12. – № 2. – С. 300-307.
9. Климчук Е.Г. Акустическая диагностика процессов «твёрдофазного горения» смесей органических кристаллов / Е.Г. Климчук, А.Л. Парахонский // Ученые записки физического факультета. – 2014. – № 6. – С. 146322-1–146322-5.
10. Беликов В.Т. Использование результатов наблюдений акустической эмиссии для изучения структурных характеристик твёрдого тела / В.Т. Беликов, Д.Г. Рывкин // Акустический журнал. – 2015. – Т. 61. –

№ 5. – С. 622-630.

11. Калугин В.Д. Газовые пожарные извещатели с полупроводниковыми датчиками: теория, технология, применение / В.Д. Калугин, А.В. Прусский, А.Ю. Войтов, Е.В. Быкова, С.А. Еременко. – Киев: ИГУГЗ НУЦЗ Украины, 2011. – 195 с.

12. Членов А.Н. Автоматические пороговые комбинированные пожарные извещатели / А.Н. Членов, М.В. Землянухин // Системы безопасности, № 5(59), октябрь-ноябрь. – М.: Гротек, 2004. – С. 36-40.

13. Федер Е. Фракталы / М.: Мир, 1991. – 258 с.

14. Мачехин Ю. Фрактальная шкала для временных рядов результатов измерений / Ю. Мачехин // Измерительная техника. – 2008. – Вып. 08. – С. 40-43.

15. Зорич В.А. Математический анализ. В 2-х Частях. – Изд. 4-е, испр. – М.: МЦНМО, 2002.

16. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов. Коллективная монография / Под ред. Р.Э. Пашенко. – Харьков. – ХООО «НЭО «Эко Перспектива», 2006. – 348 с.

17. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории / пер. с английского / М.: Постмаркер, 2000. – 352 с.

18. Mandelbrot B. V. The Fractal Geometry of Nature / San Francisco: Freeman, 1982. – 491 p.

Получено редколлегией 12.10.2017

А.А. Левтеров, В.В. Тютюник, В.Д. Калугин

Методи ідентифікації процесу горіння целюлозомістких матеріалів на основі ефекту акустичної емісії

Встановлено ефекти акустичної емісії (АЕ), що використані для розробки установки для запису, фільтрації та обробки спектрів целюлозомістких матеріалів. Проведено аналіз методів ідентифікації амплітудно-частотних спектрів АЕ процесу горіння целюлозомістких матеріалів. Було запропоновано способи ідентифікації АЕ за допомогою фрактальної розмірності для реального (необробленого) сигналу та виділення пікових частот спектра АЕ.

Ключові слова: целюлозомісткі матеріали, процес горіння, акустична емісія процесу горіння, характеристичні спектри, фільтрація спектра, вимірювальна установка, раніше виявлене загоряння, фрактальна розмірність.

A. Levterov, V. Tyutyunik, V. Kalugin

Identification methods of combustion process cellulose materials on the basis of acoustic emission effect

Effects of the acoustic emission (AE) have been established. They have been used for development of device record, filtration and processing ranges the cellulose materials. The analysis methods of identification amplitude-frequenciest ranges of process AE combustion the cellulose materials has been carried out. Ways of identification AE by means of fractal dimension for the actual (raw) signal and selection of peak frequencies range of AE have been offered.

Keywords: cellulose materials, combustion process, acoustic emission of process combustion, characteristic ranges, filtration range, measuring installation, early detection of ignition, fractal dimension.