

А.А. Левтеров, к.т.н., с.н.с., доц. каф., НУГЗУ

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГОРЮЧЕГО ВЕЩЕСТВА В ЗОНЕ ОЧАГА ВОЗГОРАНИЯ

(представлено д.т.н. Росохой С.В.)

Предложена модель идентификации горючего вещества в зоне очага возгорания на основе анализа акустической эмиссии процесса горения. Описаны особенности применения данной модели для идентификации горючего вещества в зоне очага возгорания.

Ключевые слова: процесс горения, акустическая эмиссия процесса горения, раннее обнаружение возгорания, фрактальная размерность.

Постановка проблемы. Эффективность обеспечения пожарной безопасности зависит от вероятности раннего обнаружения очага возгорания [1]. Вследствие этого, проблема заключается в повышении эффективности и достоверности раннего обнаружения очага возгорания и идентификации горящего вещества, особенно на объектах со сложной пожарной нагрузкой, требующей разных огнетушащих составов в системах автоматического пожаротушения. 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. Для решения данной проблемы необходимо разработать методику и теоретические основы по идентификации процесса горения целлюлозосодержащих материалов и легковоспламеняющихся жидкостей по эффекту акустической эмиссии.

Анализ последних исследований и публикаций. 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 [2]. 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 [2, 3].

Публикаций, связывающих АЭ и процессы горения жидких и твердых веществ, мало, по понятным причинам, исключаются взрывные процессы с выделением большого количества энергии [3]. Процессы горения, как правило, рассматриваются применительно к энергетическим установкам, преобразующим энергию горения в механическую работу. Шум, сопровождающий горение в современных энергетических установках, как правило, вызывает неустойчивость сгорания топлива и отно-

сится к отрицательным факторам [4, 5].

В работе [6] описан метод, анализа акустической эмиссии процесса горения твердого ракетного топлива в заданных диапазонах давления и температуры. Акустический сигнал анализируется во временной и частотной области, установлена зависимость частоты пиков от природы материала, давления, начальной температуры. Анализ излучения позволил изучить важные особенности процесса горения конкретного топлива.

Использования АЭ для ранней идентификации открытого пламени, возникающего в материалах различной структуры, было заявлено в 1994 году. Исследования в Национальном Институте Стандартов и Технологий (США) [7] четко продемонстрировали, что акустическая эмиссия (АЭ) вызванная огнем может быть использована для обнаружения пожара. Эффект возникновения АЭ в работе продемонстрирован простым натурным экспериментом в специальной комнате из древесины. Природа возникновения акустических волн не оговаривается, явление АЭ связывается с деформацией материалов при повышении температуры в замкнутом объеме.

Использование АЭ в качестве раннего фактора на воздействие открытого огня на разные материалы рассматривается в работе [8]. Число событий АЭ в минуту и энергия, выделяемая во время нагревания, наблюдались уже до того, как заметно повысилась температура материалов. Измеренные сигналы варьировались по энергии и количеству в зависимости от типа материала, толщины образцов и теплового потока. Особенно восприимчивой оказалась древесина. Эти результаты доказывают состоятельность данной концепции, но необходима адаптация метода для его применения в сфере обнаружения пожара.

О возможности и целесообразности эффекта АЭ как прикладного инструмента для обнаружения огня в самолетах, различных складах идет речь в статье [9]. Тепловые и акустические характеристики лесного пожара с точки зрения горючего материала, излучающего акустические колебания, рассматриваются исследователями [10]. Проводились как лабораторные, так и полевые испытания по сжиганию мусора, листьев, валежника, кустарника с учетом внешних условий среды: влажности, ветра, солнечной радиации, рельефа местности. Целью исследований было получение оценки акустических спектров от сгорающих различных материалов по специальному алгоритму, оценивалось влияние теплового излучения на оптоволоконные датчики с открытыми кабелями. Предполагалось по результатам исследований создание новой системы мониторинга лесных пожаров.

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, идентификации горючего вещества в зоне очага возгорания с использованием 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 разработка модели идентификации горючего вещества в зоне очага воз-

горения по анализу спектра и фрактальной размерности АЭ процесса горения, что может быть положено в основу создания систем раннего обнаружения загораний по генерируемому акустическому излучению реакции горения различных горючих веществ.

Идентификация и регистрация связана с решением задачи измерений волновых процессов (акустика) и их последующей обработки. Проведение эксперимента, получение и обработка данных, обоснование данного метода идентификации приведено в статье автора [11]. Для оценки идентификационных признаков случайного стохастического процесса сгорания материалов, по результатам экспериментально обнаруженного эффекта излучения спектров АЭ, сформированы временные ряды, характерные для каждого из рассматриваемых материалов, и проведен их спектральный и фрактальный R/S анализ [12].

Для идентификации спектров АЭ процесса горения вещества необходимо провести ряд преобразований с полученным акустическим сигналом. 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:

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

где ω – частота, а k – номер гармоники [12].

Поскольку АЧХ в каждый момент времени (временной отсчет – n) представляет собой функцию $A_n(f)$, где A – амплитуда, а f – частота, то путем известных математических преобразований [13] можно найти ее экстремумы и соответствующие им частоты, которые характеризуют спектр АЭ горения вещества. Количество таких экстремумов – K_{ex} , на соответствующих частотах (полученных экспериментально и хранящихся в базе данных), характеризует процесс горения конкретного вещества. Отсюда можно сделать вывод, что существует минимальное значение K_{exmin} при котором можно утверждать с высокой достоверностью, что обнаружен процесс горения.

На рис.1 приведены АЧХ, полученные от 5-ти опытов горения ацетона, где видно, что они имеют схожий характер. Для идентификации вещества был введен коэффициент допустимого отклонения значения частоты на экстремуме АЧХ – K_{vs} , значения которого находятся в диапазоне от 400 до 600 Гц.

Тогда модель идентификации горючего вещества в зоне очага возгорания по спектру АЭ процесса горения примет вид:

$$K_{exmin} \leq \left\{ \Delta f_n \mid \Delta f_n \leq K_{vs} \right\} \leq K_{exmax}, \quad (2)$$

где

$$\Delta f_n = |f_{nbd} - f_{ns}|, \quad (3)$$

Δf_n – допустимое отклонение между f_{nbd} (n -ая характерная частота базы

данных веществ) и соответствующая f_{ns} (n -ая характерная частота спектра АЭ процесса горения).

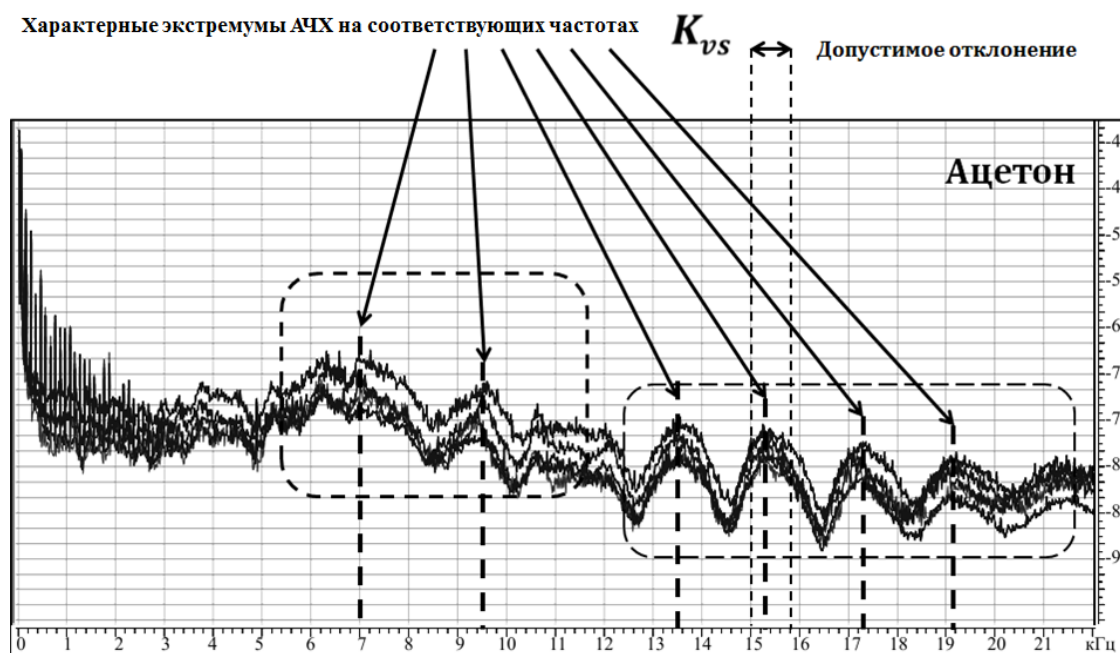


Рис. 1. Сравнение спектров горения жидкости (n опытов)

Экспериментально было установлено, что у всех исследуемых твердых и жидких веществ $K_{exmin} = 4$. На основании этого можно сделать предположение, что при выделении из спектра АЭ горения четырех характерных частот, процесс акустического излучения идентифицируется как «ГОРЕНИЕ», не прибегая к сравнению с другими веществами в базе данных. Для идентификации же конкретного вещества, коэффициент примет следующие значения: $K_{exmin} = 4$ – для твердых материалов и $K_{exmin} \geq 8$ для горючих жидкостей. Что же касается K_{exmax} – максимальное число характерных частот спектра, то $5 \leq K_{exmax} \leq 7$ для твердых материалов и $10 \leq K_{exmax} \leq 14$ для воспламеняющихся жидкостей.

Поскольку данная идентификация дает грубое определение: твердое (древесина и другие целлюлозосодержащие материалы) или жидкое горючее вещество, то предлагается использовать значение фрактальной дробной размерности [12] акустического сигнала из очага загорания. Дробная размерность сигнала, полученная в данном случае, – совокупность фона и АЭ соответствующая процессу горения. Методика основана на фрактальном анализе свойств временного ряда [12] АЭ горения и состоит в индивидуальных особенностях для каждого вещества. На рис.2 приведены результаты расчетов фрактальной дробной размерности D горящих веществ твердых: дерева, бумаги, ваты, бинта и картона, а также жидких: ацетона, нефти, парафина, метанола и построены средние значения для 3 опытов.

Методика идентификации заключается в сравнении значения фрактальной размерности АЭ горения образца вещества полученного экспериментально, хранящегося в базе данных, со значением фрактальной размерности АЭ горения из очага загорания.

На основании изложенного, модель идентификации вещества по фрактальной размерности примет следующий вид

$$|D_{bd} - D_s| \leq K_{SL}, \quad (4)$$

где D_{bd} – значение фрактальной размерности, хранящееся в базе данных; D_s – значение фрактальной размерности принятого сигнала из очага загорания; K_{SL} – коэффициент идентификации материала для твердых – 0,014 и 0,027 для жидких горючих веществ.

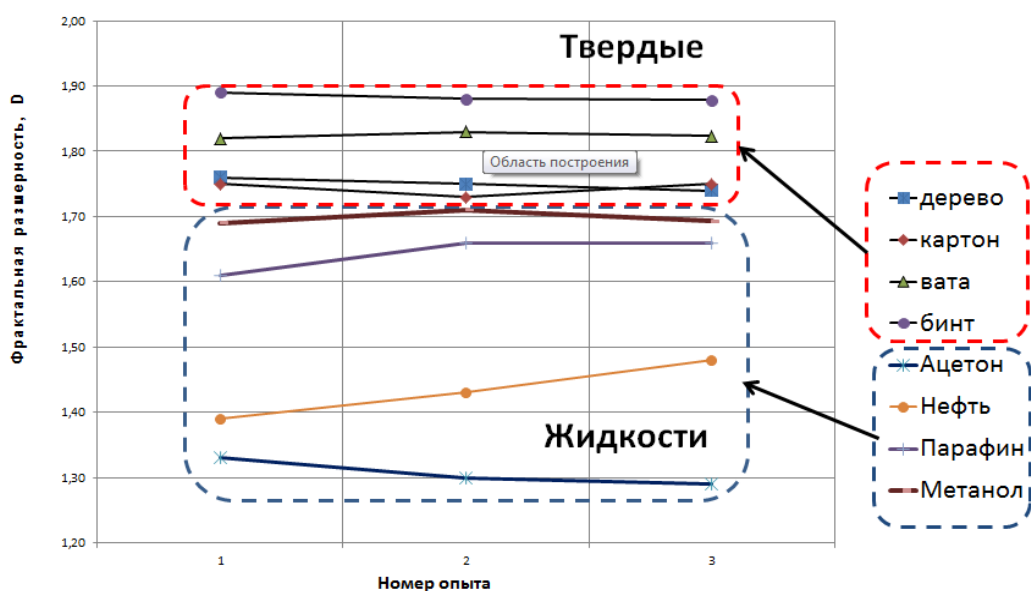


Рис. 2. Сравнение фрактальной размерности АЭ горения различных веществ

Для повышения эффективности и достоверности данного способа идентификации необходимо задействовать две модели одновременно. Если же не требуется точной идентификации горящего вещества, а требуется только подтверждение обнаружения процесса горения, достаточно применение первой модели.

Выводы. Особенности процесса акустической эмиссии при горении различных веществ, позволяет идентифицировать процесс горения и вещество, что указывает на высокую эффективность возможного обнаружения и установления фактов возгорания. Идентификация горящего вещества позволяет в условиях сложной пожарной нагрузки, где требуется несколько видов огнетушащих веществ, выбрать необходимую систему пожаротушения. В работе предложены модели идентификации АЭ по значению фрактальной размерности и характерным частотам спектра АЭ. Результаты проведенных экспериментов подтверждают, что процесс АЭ может быть использован как новый фактор для обнаружения раннего возгорания.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Fire Statistics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report22_world_fire_statistics_2017.pdf.

2. 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>

3. 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.

4. Culick F.E. Unsteady motions in combustion chambers for propulsion systems / F.E. Culick // RTO Agardograph, NATO / AG-AVT-039, 2006. – 664 p.

5. Warren C. Strahle /Combustion noise// joint institute for aeronautics and acoustics / C. Warren//.– 1977 .– 71 p

6. Bossi I., Ferriello P., De Luca L. Acoustic emission of underwater burning composite solid rocket propellants / I. Bossi, P. Ferriello, L. De Luca // XVI Congresso Nazionale AIDAA, 2001, 24-28 September, Palermo,–Pa,–ITALY.–12p.

7. Grosshandler W., Braun E. /Early Detection Of Room Fires Through Acoustic Emission // Fire Safety Science. Proceedings of the Fourth International Symposium, T. Kashiwagi, cd., IAFSS, USA, 1994, 4, P. – 773-784

8. Grosshandler, W., Jackson M./Acoustic Emission of Structural Materials Exposed to Open Flames // Fire Safety Journal 22, 1994, 22. – P. – 209–228.

9. Kwan C.. Early fire detection using acoustic emissions//C. Kwan, X. Zhang, and R. Xu, IFAC Proceedings Volumes, 2003.–P. 351 – 355

10. Viegas D. Acoustic and thermal characterization of a forest fire event / L. Pita, F. Nielsen, K. Haddad и др. // Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires , 2008, Vol 119. – P. 171–179

11. Левтеров А.А. Методы идентификации процесса горения целлюлозосодержащих материалов на основе эффекта акустической эмиссии. / В.Д. Калугин, В.В. Тютюник // Проблемы пожарной безопасности. – Харків: НУЦЗУ, 2017. Вип. 42. С. 72 – 84

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

13. Ильин В.А. Основы математического анализа (в двух частях) / В.А. Ильин, Позняк Э. Г. // М.: Физматлит, 2005. – 648 с.

Получено редколлегией 13.03.2019

А.А. Левтеров

Розробка моделі ідентифікації палаючі речовини в зоні осередку загоряння

Запропоновано модель ідентифікації горючої речовини в зоні осередку загоряння на основі аналізу акустичної емісії процесу горіння. Описано особливості застосування даної моделі для ідентифікації горючої речовини в зоні осередку загоряння.

Ключові слова: процес горіння, акустична емісія процесу горіння, раннє виявлення загоряння, фрактальна розмірність.

A. Levterov

Identification model development of the burning substance in the zone of the burning seat

A model for the identification of combustible material in the zone of the burning seat ignition based on the analysis of acoustic emission combustion process has been proposed. The features of the use of this model to identify combustible substances in the zone of the burning seat ignition have been described.

Keywords: combustion process, acoustic emission of the combustion process, early ignition detection, fractal dimension.