

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 351.861:504.064:614.8

АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ
ЛЕГКОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ ВЕЩЕСТВ

© 2019 г. А. А. Левтеров*

Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевская 94, Харьков, 61023 Украина

*e-mail: alionterra@gmail.com

Поступила в редакцию 11.12.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 20.03.2019 г.

С использованием эффекта акустической эмиссии рассматриваются акустические излучения, сопровождающие горение легковоспламеняющихся веществ (спиртов, ацетона, сырой нефти и нефтепродуктов) и приводятся экспериментальные и расчетные результаты исследований. Сформирована совокупность временных рядов и пиковых амплитудно-частотных характеристик, характеризующих акустические сигналы, генерируемые указанными горящими веществами. Количество фиксируемых через каждые 22 микросекунды отсчетов выборки находится в пределах от 1.5×10^6 до 9.7×10^6 . С помощью фрактального R/S анализа временных рядов показана принципиальная возможность идентификации (распознавания) природы горящего вещества. Установлена зависимость показателя Херста H от природы вещества и получены его числовые значения.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, горение жидкостей, временные ряды, идентификация

DOI: 10.1134/S0320791919040105

ВВЕДЕНИЕ

Развитие микроэлектроники и информационных технологий, наряду с дальнейшим осмыслением физики и химии процессов горения, позволили в последние годы исследовать и использовать эффект акустической эмиссии (АЭ) в различных технологических процессах. Целесообразно рассмотреть этот эффект для раннего диагностирования возможного очага возгорания.

АЭ — это необратимый процесс излучения энергии в виде упругих волн, возникающий в результате локальной деструкции вещества под внешним, достаточно быстрым воздействием: при пластической деформации твердых материалов; при фазовых превращениях; при плавлении, сольватации и кристаллизации; при изменении границ магнитных участков (доменов). Частотный спектр АЭ лежит в пределах от инфразвука до десятков МГц. В макромасштабах — это землетрясения, гром; в микромасштабах — разрушение и возникновение кристаллов, фазовые превращения, коррозия. Метод АЭ является одним из ведущих среди надежных интегральных методов достоверного диагностирования технического состояния опасных производственных объектов и неразрушающего контроля зарождающихся дефектов. Для обнаружения дефектов в твердых материалах метод используется давно и востребован по сей день [1–3]. Свойство эффекта АЭ предла-

гается использовать и в качестве непрерывного контроля за радиоактивными отходами, хранящимися в специальных емкостях [4]. С помощью характерного сигнала АЭ наблюдается течение процесса насыщения металла водородом при гальваническом гидрировании, так, например, фиксируется момент формирования гидрида палладия [5].

Эффект возникновения акустических излучений в ходе химических реакций анализировался уже в 70-х и 80-х годах XX столетия [6, 7]. Дальнейшее осмысление и обоснование этого процесса позволило проводить тестирование, контроль и диагностику процессов в жидких и твердожидкотных реакционных средах, получать важную (часто уникальную) информацию относительно химической кинетики и физико-химических процессов [8, 9]. Интерес в этих работах представляет вывод об универсальности явления АЭ, т.е. о возникновении в любой реакционной среде или физико-химическом процессе генерации и синхронности акустических колебаний в отдельных участках системы. К индуцированию АЭ приводит образование газовой фазы в жидкости, что используется при импрегнировании [10]. Измерения АЭ в ходе экзотермического процесса органического самораспространяющегося высокотемпературного синтеза представляют эффективный инструмент физико-химического исследования

“твердофазного горения” смесей органических кристаллов [11]. Совместное использование методов физической акустики и ядерного магнитного резонанса дает возможность выявить влияние различных температурных режимов при изучении фазовых переходов в процессе плавления и кристаллизации эвтектических сплавов [12]. Процесс таяния (плавления) льда в природе играет важную роль, а результаты исследования этого процесса представляют интерес для использования в теории фазовых переходов, криобиологии и криобиохимии [13]. Применение инфразвукового мониторинга позволило существенно расширить информативность систем дистанционного наблюдения за деструкцией ледниковых покровов в Арктике [14]. Расширяются возможности применения эффекта АЭ в фармакологии как метода неразрушающего контроля процессов кристаллизации и формирования химических изделий в реальных производственных процессах, появляются новые возможности следовать за течением процесса кристаллизации, степенью агломерации и гранулометрического состава при различных условиях [15].

Публикаций, связывающих АЭ и процессы горения жидких и твердых веществ, мало, по понятным причинам исключаются взрывные процессы с выделением большого количества энергии, сопровождающегося ударной волной, трансформирующейся в акустические колебания [16]. Процессы горения, как правило, рассматриваются применительно к энергетическим установкам, преобразующим энергию горения в механическую работу. Интересна работа [17]. Методами акустической эмиссии анализируется процесс горения твердого ракетного топлива в заданных диапазонах давления и температуры, сжигаемого в горелке, расположенной под водой. Исследования акустических спектрограмм позволило сделать выводы о важнейших характеристиках топлива: скорости горения, периоде задержки воспламенения, локальных угасаний.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, очевидно, что метод АЭ применительно к исследованию химических реакций и физико-химических процессов разного типа широко используется. АЭ просто и удобно регистрируется, позволяет в режиме реального времени осуществлять наблюдение за процессом, что особенно важно для быстрых реакций, к которым относятся реакции горения.

Процесс горения исследуемых однородных по структуре и составу легко воспламеняющихся веществ протекает в области перемешивания паров жидкости и окислителя. Будем считать его уста-

новившимся случайным процессом, сопровождающимся последовательным излучением акустического сигнала переменной интенсивности.

Физическая модель открытого горения реализуется с помощью лабораторной экспериментальной установки, содержащей измерительный микрофон (капсюль Panasonic WM-61A) с частотным диапазоном от 20 до 20000 Гц и малошумящим усилителем; не имеющее акустического шума устройство для воспламенения горючего вещества, находящегося на расстоянии 30 см от микрофона в специальной емкости с открытой поверхностью площадью 65 см²; и устройство для регистрации (записи) акустического сигнала с соотношением сигнал/шум 109 дБ.

Алгоритм обработки сигналов АЭ, сопровождающих химические реакции горения опытных образцов легко воспламеняющихся веществ, строится на условии существования временного ряда, полученного как множество наблюдаемых значений физических величин $X(t)$, регистрируемых по времени. Как правило, информация о поведении физически сложных динамических систем получается в виде именно таких экспериментальных данных, но далеко не все процессы, и особенно природные явления, можно описать аналитически: дифференциальными уравнениями, традиционными методами теории вероятностей и математической статистики. Описание таких процессов возможно на основе понятия фрактала [18], которое широко применяется в разных областях науки и в методах прогноза поведения систем как прикладной инструмент. Одним из основных инструментов изучения фрактальных объектов являются волны различной природы, в том числе акустические [19]. В обзоре излагаются основные идеи и результаты исследований в этой области, что позволило предположительно считать акустические сигналы, генерируемые в процессе горения веществ, имеющими фрактальную структуру. Развитие фрактальных моделей в акустике и высокий потенциал фрактального анализа с помощью оценочных показателей Херста и фрактальной размерности отмечается в разнонаправленных работах [20, 21], посвященных исследованию акустических волн.

Общая концепция фракталов создана Мандельбротом [18]. Основное свойство фракталов — дробная размерность в отличие от привычной одно-, двух- и трехмерной размерности. Фрактальный анализ временных рядов [22, 23] помогает выявить и охарактеризовать фрактальные особенности поведения явления в случае невозможности описания его аналитически; определяет степень стохастичности процесса; способен функционировать на всех уровнях: амплитудном, частотном, фазовом, поляризационном, поэтому

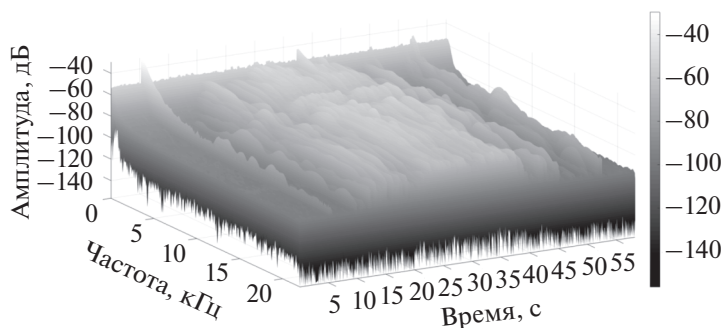


Рис. 1. Спектрограмма АЭ в процессе горения метанола.

как нельзя лучше подходит для обработки акустических сигналов [24].

Обработка получаемых спектров акустических колебаний из зоны процесса горения проводилась в соответствии с алгоритмом [25, 26] с помощью готовых компьютерных программ и программ, специально разработанных автором. Алгоритм включает в себя модуль проверки работоспособности системы обнаружения очага возгорания по эталонному сигналу и модуль записи фонового сигнала в среде, где проводится детектирование, с учетом особенностей частотно-амплитудных характеристик фона; модуль предварительной обработки сигнала; модуль записи полезного сигнала, его обработки и передачи информации на исполнение и для принятия решения.

Для записи звукового файла (временной ряд) и мгновенных срезов спектра использовалось программное обеспечение Adobe Audition CC v9.2, обработка и анализ спектра аудио-файла реализованы в среде MatLab R2016b. Таким образом обработаны спектры АЭ при горении всех образцов веществ, использованных в эксперименте. В результате для каждого испытываемого образца вещества сформировалось по 3–5 обработанных временных рядов, характеризующих акустический сигнал. Сигнал фиксировался каждые 2.2×10^{-5} с до момента прекращения горения, количество отсчетов находится в пределах от 1.5×10^6 до 9.7×10^6 . В результате получена совокупность временных рядов и их амплитудно-частотных характеристик.

В анализе временных рядов традиционно выделяются две задачи: идентификации (определение размерности вложения, породившей исследуемый ряд) и прогнозирование поведения ряда. Прогнозирование задач химической кинетики горения по отношению к динамике развития процесса (характеристики, интенсификация, затухание) на данном этапе не рассматривается. Рассматривается возможность распознавания типа образцов горящих веществ и, кроме того, мера

подобия между образцами одного класса, т.е. между результатами экспериментов, касающихся одного и того же вещества.

На рис. 1, 2 и 3 приведены типичная форма спектра излучения, временной ряд и амплитудно-частотная характеристика акустического сигнала, регистрируемого в процессе горения метанола.

Руководствуясь целью исследования, для определения параметров АЭ и идентификации вещества по акустическому сигналу воспользуемся фрактальным анализом каждого зарегистрированного временного ряда в соответствии с алгоритмом [23, 27]. Показатель Херста H , который определяет фрактальные свойства ряда, вычисляется методом нормированного размаха или фрактального R/S анализа, не содержащего требований к форме лежащего в основе распределения [23]:

$$(R/S)_n = cn^H,$$

где R – расстояние, на которое перемещается система за задаваемый период времени (количество отсчетов n), а S – стандартное отклонение.

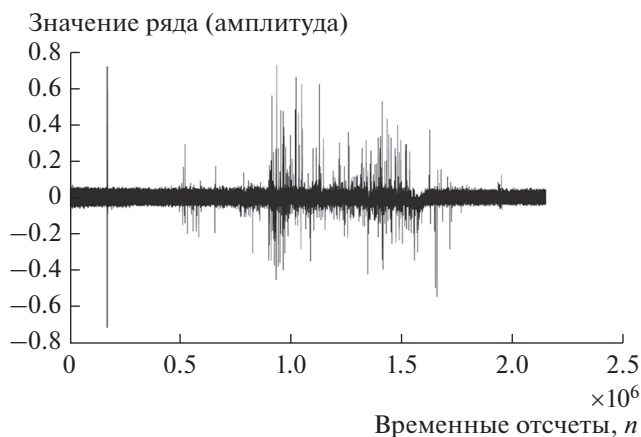


Рис. 2. Временной ряд звукового сигнала при горении метанола.

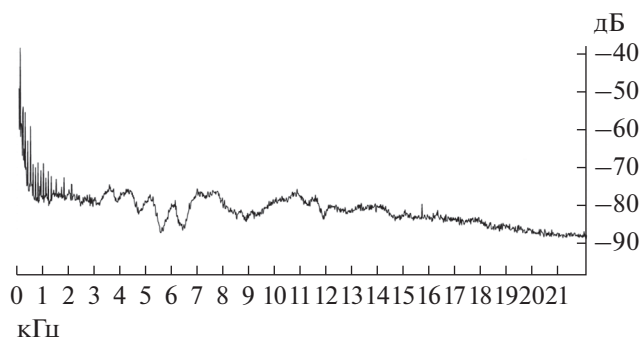


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика звукового сигнала при горении метанола.

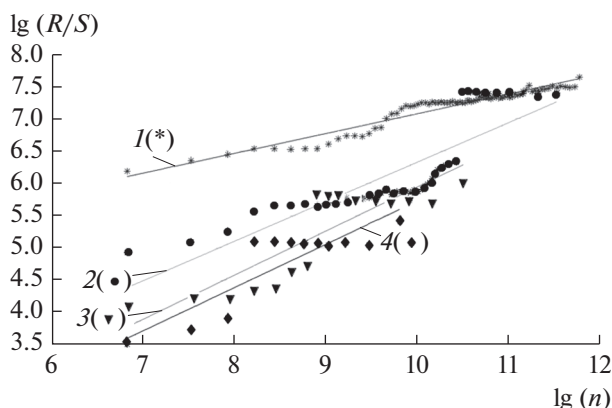


Рис. 4. Влияние на показатель Херста величины временного промежутка между значениями выборки звукового сигнала при горении метанола. $I(*)$ – $\tau = 22$, $2(\bullet)$ – $\tau = 110$, $3(\blacktriangledown)$ – $\tau = 550$, $4(\blacklozenge)$ – $\tau = 1100$ мкс.

Определения показателя Херста H проводится простой линейной аппроксимацией выражения

$$\lg(R/S)_n = \lg(c) + H \lg(n),$$

$$H = \lg(R/S) / \lg(n) - C,$$

где константа $C = \lg(c) / \lg(n)$.

Тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой и есть оценка показателя Херста, а отрезок, отсекаемый ею по оси ординат, – константа C .

Количество точек аппроксимации для каждого исследуемого образца определялось путем последовательного деления отсчетов всего временного ряда на число смежных участков A таким образом, чтобы со следующим делением количество отсчетов n в каждом участке увеличивалось, достигая по завершении процедуры деления величины $n = (N - 1) / 2$, где N – длина ряда [23].

Для каждого участка длины n из совокупности A :
– определялось математическое ожидание (среднее значение)

$$x_a^{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ia}; \quad a = 1, \dots, A;$$

– формировался временной ряд накопления отклонений

$$X_{ka} = \sum_{i=1}^k (x_{ia} - x_a^{cp}); \quad k = 1, \dots, n;$$

– определялся скорректированный размах

$$R_a = \max_{1 \leq k \leq n} (x_{ka}) - \min_{1 \leq k \leq n} (x_{ka});$$

– стандартное отклонение

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ia} - x_a^{cp})^2};$$

– и, наконец, среднее значение нормированного размаха для первого разбиения на A участков длиной n :

$$(R/S)_n = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A (R_a/S_a).$$

Процедура повторялась, формируя данные для аппроксимации зависимости показателя Херста методом наименьших квадратов. На показатель Херста существенно влияет величина временного промежутка между значениями выборки акустического сигнала. На рис. 4 показано, как меняется показатель H для значений временного ряда, характеризующих горение метанола при разных значениях интервала τ между соседними отсчетами выборки: степень точности аппроксимирующей показатель Херста прямой увеличивается с уменьшением временного промежутка. Во всех расчетах использована величина $\tau = 22$ мкс, регламентированная аппаратными возможностями регистрирующего устройства.

Фрактальная размерность D связана с показателем Херста соотношением $D = 2 - H$, которое справедливо, когда структура фрактальной функции исследуется с высоким разрешением [28].

Результаты R/S анализа временных рядов при горении спиртов, ацетона, нефти и нефтяных продуктов представлены на рис. 5, 6 и в табл. 1.

Показатель Херста исследуемых временных рядов H находится в пределах $0 < H < 1$. Значение $0 < H < 0.5$ характеризует изменяемую систему, при значении $0.5 < H < 1$ система более устойчива [23]. Переходя к фрактальной размерности, имеем $1 < D < 2$, т.е. размерность хаотичности временных рядов, регистрируемых при сгорании легковоспламеняющихся веществ, лежит между кривой ($D = 1$) и плоскостью ($D = 2$).

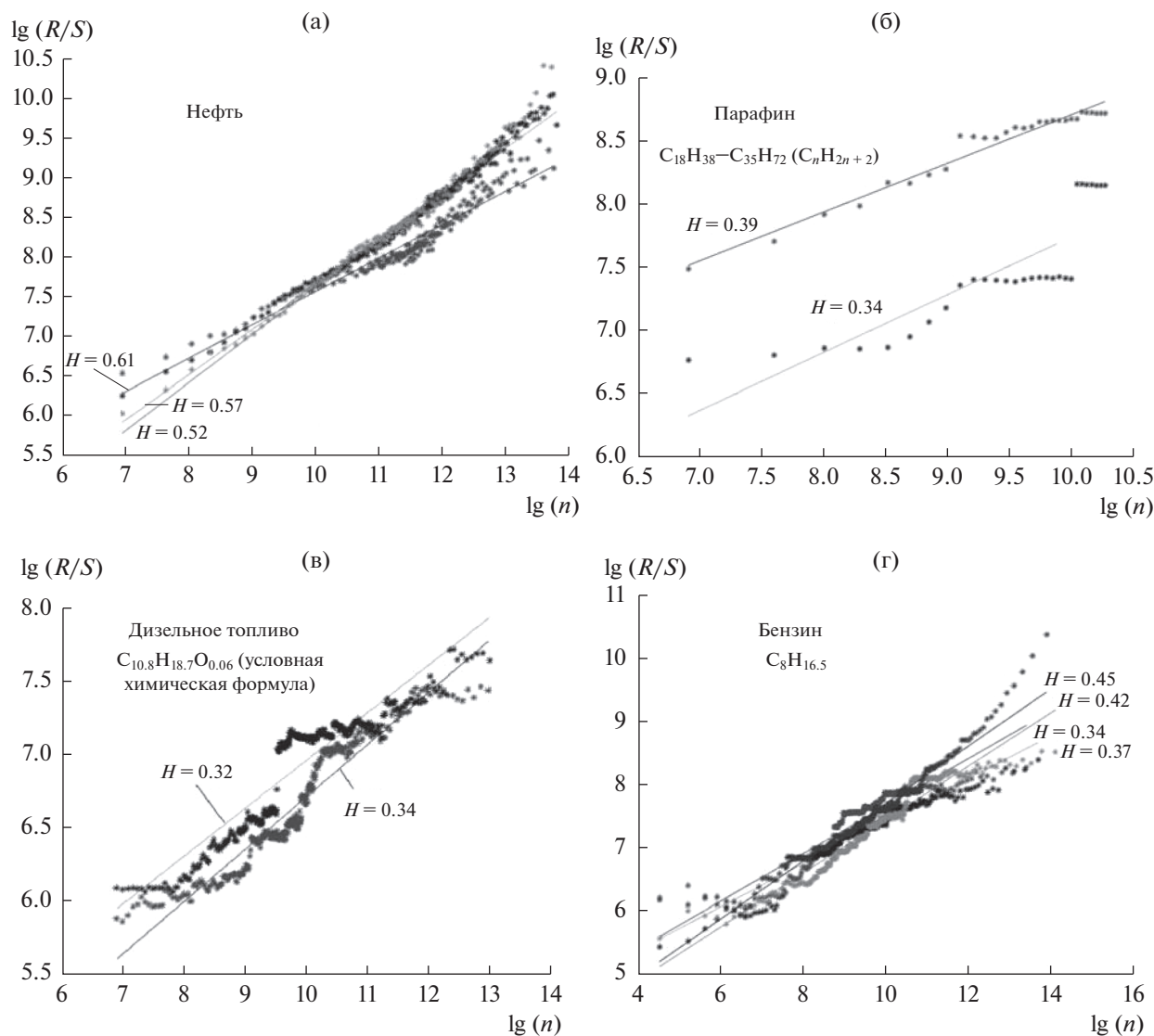


Рис. 5. Результаты R/S анализа временных рядов, полученных в процессе горения нефти и нефтепродуктов: (а) сырая нефть; (б) парафин; (в) дизельное топливо; (г) бензин.

Результаты экспериментов и обработки данных можно разделить на две группы. В одном ряду находятся спирты ($0.271 < H < 0.38$), в другом — нефтепродукты: бензин, дизельное топливо и парафин ($0.32 < H < 0.45$). Из общей картины выделяются сырая нефть ($0.52 < H < 0.61$) и ацетон (кетон) ($0.67 < H < 0.71$).

На наш взгляд, показатель Херста зависит от строения молекул горящего вещества, содержания в нем различного вида углеводородов, гидроксильных и карбонильных групп и от особенностей образования каждой горючей смеси, которое, главным образом, связано с испаряемостью вещества. Нефть состоит в основном из ациклических, парафиновых, циклических предельных и ароматических углеводородов, в процессе пере-

работки нефти появляется ряд других более легких углеводородных фракций. Поэтому горение нефтяных фракций (бензин, дизельное топливо) и парафина, способного самовозгораться в состоянии кипения, когда идет его интенсивное испарение, сопровождается похожими акустическими излучениями и соответственно близкими значениями показателя Херста.

Распознавание природы вещества в случае поступления сигнала о возгорании осуществляется специальными аппаратными средствами, которые разрабатываются для конкретного хранилища, склада и отличаются простой настройкой программы микроконтроллера в соответствии с видом хранящейся продукции.

Таблица 1. Значения величины показателя Херста временных рядов звукового сигнала при горении образцов исследуемых легко воспламеняющихся веществ

		Наименование вещества						
Показатель Херста в экспериментах	метанол	изоамиловый спирт	октанол	ацетон	сырая нефть	бензин	дизельное топливо	парафин
	0.271	0.33	0.34	0.71	0.61	0.45	0.32	0.39
	0.307	0.36	0.36	0.67	0.57	0.34	0.34	0.34
	0.288	0.38	0.33	0.70	0.52	0.42		
	0.310	0.37				0.37		

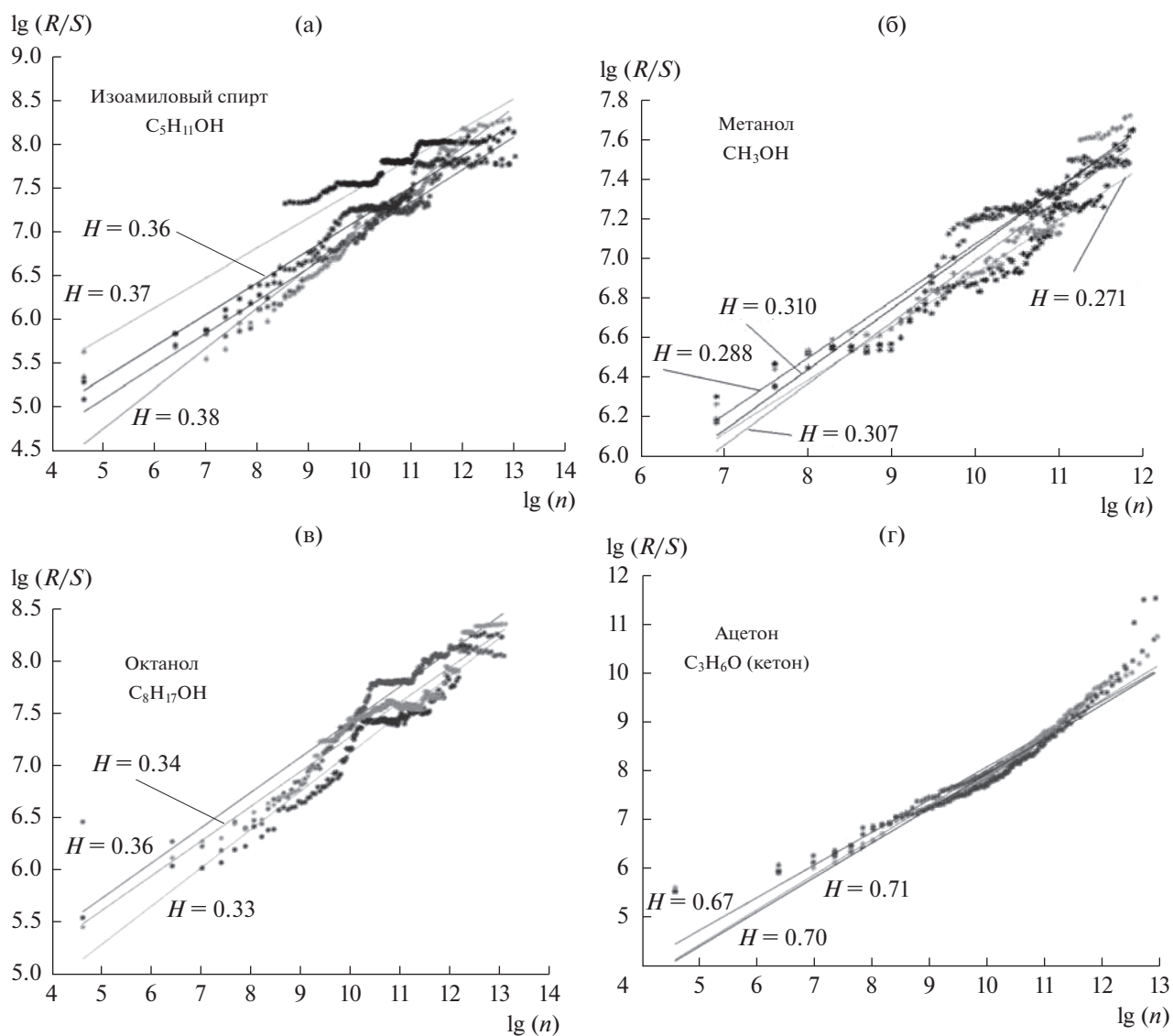


Рис. 6. Результаты R/S анализа временных рядов, полученных в процессе горения спиртов и ацетона: (а) изоамиловый спирт; (б) метанол; (в) октанол; (г) ацетон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате натурального эксперимента получена совокупность временных рядов и амплитудно-частотных характеристик, характеризующих параметры акустической эмиссии, генерируемой при горении каждым из исследуемых веществ – спиртов, ацетона, сырой нефти и нефтепродуктов. С помощью фрактального R/S анализа показана принципиальная возможность идентификации полученных временных рядов и временного множества, на котором отражен исследуемый временной ряд. Установлена зависимость показателя Херста H от природы вещества и получены его числовые значения. Акустический метод, обладая рядом преимуществ (высокая чувствительность, легкость регистрации в режиме реального времени, широкая область покрытия, возможность получения быстрой ответной реакции, классификация степени опасности), расширяет круг известных методов раннего обнаружения источника горения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грешников В.А., Дробот Ю.Б.* Акустическая эмиссия. М.: Изд-во Стандартов, 1976.
2. Jun Zhou. A study of acoustic emission technique for concrete damage detection // Michigan Technological University. A Report, 2011. 62 p.
3. *Семашко Н.А., Шпорт В.И., Марьин Б.Н. и др.* Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Под общ. ред. Семашко Н.А. М.: Машиностроение, 2002. 240 с.
4. *Spasova L.M., Ojovan M.I.* Characterisation of Al corrosion and its impact on the mechanical performance of composite cement wasteforms by the acoustic emission technique // J. Nuclear Materials. 2008. V. 375(3). P. 347–358.
5. *Piao J., Shoji H., Murakami T., Shiina R., Harada S.* Acoustic Emission Measurements on Metal-Hydrogenation Process by Using Electrochemical Charging Cell // Materials Transactions. 2015. V. 56. № 9. P. 1496–1500.
6. *Задумин С.Н., Хоконов Х.Б., Шокаров Х.Б.* Акустический эффект кристаллизации и плавления вещества // Журн. эксп. теор. физ. 1975. Т. 68. Вып. 4. С. 1316–1319.
7. *Смирнов А.Н., Дементьев А.Н.* // Журн. физ. химии. 1985. Т. 59. Вып. 7. С. 1719–1721.
8. *Буйло С.И., Кузнецов Д.М.* Акустико-эмиссионный контроль и диагностика кинетики физико-химических процессов в жидких средах // Дефектоскопия. 2010. № 9. С. 74–80. [Рус. J. NDT. 2010. V. 46. № 9. P. 684–689].
9. *Смирнов А.Н.* Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах // Росс. хим. ж. 2001. Т. 45. С. 29–34.
10. *Кузнецов Д.М., Гапонов В.Л., Гайдукова Ю.А., Маслова Е.Е.* Изучение процессов дегазации в жидкости методом акустической эмиссии // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 4. С. 74–79.
11. *Климчук Е.Г., Парахонский А.Л.* Акустическая диагностика процессов “твердофазного горения” смесей органических кристаллов // Ученые записки физического факультета. 2014. № 6. С. 146322-1–146322-5.
12. *Пирозерский А.Л., Чарная Е.В., Lee M.K., Chang L.J., Недбай А.И., Кумзеров Ю.А., Фокин А.В., Самойлович М.И., Лебедева Е.Л., Бугаев А.С.* Акустические и ЯМР-исследования плавления и кристаллизации индий-галлиевых сплавов в порах синтетических опаловых матриц // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 3. С. 295–301.
13. *Кузнецов Д.М., Смирнов А.Н., Сыроешкин А.В.* Акустическая эмиссия при фазовых превращениях в водной среде // Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII. № 1. С. 114–121.
14. *Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н.* Использование инфразвукового метода для мониторинга деструкции ледников в арктических условиях // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 5. С. 582–591.
15. *Serris E., Cameirao A., Gruy F.* Monitoring industrial crystallization using acoustic emission // 32nd European Conference on Acoustic Emission Testing (EWGAE 2016), Czech Republic, Prague, September 07–09, 2016 // J. Nondestructive testing. 2016. P. 451–460.
16. *Андреев К.К.* Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М.: Наука, 1966. 346 с.
17. *Bossi I., Ferriello P., De Luca L.* Acoustic emission of underwater burning composite solid rocket propellants // XVI Congresso Nazionale Aidaa, 2001, 24–28 September, PALERMO, Pa, ITALY. 12 p.
18. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. Пер. с англ. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
19. *Зосимов В.В., Лямшев Л.М.* Фракталы и скейлинг в акустике (обзор) // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 5. С. 709–737.
20. *Копыл Е.А., Лысанов Ю.П., Лямшев Л.М.* Рассеяние звука случайными фрактальными неоднородностями в океане // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 4. С. 517–522.
21. *Mięsowicz K., Staszewski W., Korbiel T.* Analysis of Barkhausen Noise Using Wavelet-Based Fractal Signal Processing for Fatigue Crack Detection // Int. J. Fatigue. 2016. V. 83. Pt 2. P. 109–116.
22. *Федер Е.* Фракталы. М.: Мир, 1991. 258 с.
23. *Петерс Э.* Фрактальный анализ финансовых рынков: Применение теории Хаоса в инвестициях и экономике. М.: Интернет–трейдинг, 2004. 304 с.
24. *Потапов А.А.* Современное состояние радиофизических применений фракталов, дробных операторов и скейлинга // III Всероссийская конференция “Радиолокация и радиосвязь”, 26–30 октября 2009 г. С. 842–876.
25. *Левтеров А.А., Тютюник В.В., Калугин В.Д., Ольховиков С.В.* Использование эффекта акустической эмиссии при раннем обнаружении возгорания целлюлозосодержащих материалов объектовой подсистемой универсальной системы мониторинга чрезвычайных ситуаций в Украине // Прикладная радиоэлектроника. 2017. Т. 16. № 1. 2. С. 23–40.
26. *Левтеров А.А., Калугин В.Д., Тютюник В.В.* Методы идентификации процесса горения целлюлозосодержащих материалов на основе эффекта акустической эмиссии // Проблемы пожарной безопасности. Харків: НУЦЗУ, 2017. Вип. 42. С. 72–84.
27. *Hurst H.E.* Long-term storage capacity of reservoirs // Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 1951. 116. P. 770–808.
28. *Басараб М.А., Строганов И.С.* Обнаружение аномалий в информационных процессах на основе мультифрактального анализа // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 4(7). С. 30–40.