

УДК 351.861:504.064:614.8

А.А. Левтеров, к.т.н., с.н.с., доцент, НУГЗУ

(представлен д.т.н.....)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ И ПОДАВЛЕНИИ ИСТОЧНИКА ПОЖАРА

РАЗРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ПОЖАРА ВНУТРИ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

Предложен метод обнаружения пожара, основанный на акустической эмиссии процесса горения. Предложен метод подавления пламени и тушения пожара, основанный на акустическом воздействии на очаг пожара на начальной стадии. Предложена методика определения параметров акустического воздействия на очаг пожара. Установлена связь параметров акустического воздействия на очаг загорания в зависимости от горящего вещества.

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

Постановка проблемы. Изучение и понимание механизма процессов горения находятся в постоянном внимании научных исследований и технологий. Это объясняется, с одной стороны, проблемой совершенствования систем преобразования энергии, которые по-прежнему остаются основным источником энергопотребления и, с другой, – пожарами, являющимися наиболее распространенной техногенной и бытовой опасностью. Во всем мире постоянно предпринимаются усилия, направленные на совершенствование и создание новых методов предупреждения, раннего обнаружения пожара и его ликвидации. Традиционные огнетушители успешно используются, но часто токсичны, наносят вред оборудованию, подвергнутому пожару.

Анализ последних исследований и публикаций. Среди множества современных технологий обнаружения огня и пожаротушения, внесших значительный прогресс в борьбу с пожарами, интересен подход к тушению огня с помощью водяного тумана (взвесь из капель воды менее 60 микрон), позволяющего гасить горение газа, бензинов, масла [1. Yu H Z, Zhou X and Carpenter J 2017 Physical scaling of water mist fire extinguishment in industrial machinery enclosures Fire Saf. J. 91 596–605 2. White J P, Verma S, Keller E, Hao A, Trouvй A and Marshall A W 2017 Water mist suppression of a turbulent line fire Fire Saf. J. 91 1–9]. Взвесь, полученная из дистиллированной воды, может применяться при

спасении от огня произведений искусства, архивов, библиотек. После запрещения огнетушителей на галогенных составах получила распространение конфигурация горячего аэрозольного огнетушителя и в некоторых странах разработаны стандарты на их производство и контроль [3. Zhang X, Ismail M H S, Ahmadun F R B, Abdullah N B H and Hee C 2015 Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies: A review Brazilian J. Chem. Eng. 32 707–24].

Несмотря на высокий технологический уровень новые методы имеют ряд недостатков. Все они по своей природе инвазивны. Кроме того, есть ограничения в применении в труднодоступных местах. Т.к. огонь представляет собой особую опасность в закрытых помещениях, в самолете и на подводных лодках. Наличие большого количества пожарной нагрузки характерно и для резервуаров с горючими веществами, химических предприятий, мест хранения боеприпасов, моторных отсеков кораблей, военной техники. Тушение посредством электромагнитных импульсов может вызвать сбои в работе электронного оборудования (например, электросетей).

Эти недостатки с успехом может преодолеть технология, использующая акустические волны для обнаружения и ликвидации пожара как в качестве альтернативы, так и в виде дополнения к уже известным методам.

В последние годы расширились исследования и разработано много технологий, использующих многогранность проявлений свойств акустических явлений в различных процессах, в том числе и экзотермических процессах горения. Частотный спектр излучения акустических волн лежит в пределах от инфразвука до десятков МГц.

Термоакустические колебания возникают за счет обратной связи между флуктуацией скорости тепловыделения и акустическими возмущениями в горящем потоке. Процесс самовозбуждения акустических колебаний при горении в энергетических установках разного типа сопровождается шумом. Со временем шум стали называть акустической нестабильностью сгорания, термическим возбуждением звука, пульсационным горением или термоакустическими колебаниями. Эти проявления являются следствием самовозбуждаемой акустической энергии из-за неустойчивости тепловыделения, большей, чем потери акустической энергии в системе. [4. Ayo Oyediran, Douglas Darling, Krishnan Radhakrishnan/ Review of Combustion-Acoustic Instabilities// Prepared for the 31st Joint Propulsion Conference and Exhibit cosponsored by AIAA, ASME, SAE and ASEE San Diego, California, July 10-12, 1995.— 10p. 5. Афанасьев В. В., Кидин Н. И. Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок.—М.: Физматлит, 2008]. В многочисленных публикациях

чаще всего речь идет о преодолении неустойчивости сгорания, вызванного интенсивными звуковыми излучениями, о преодолении срыва пламени. [6. М.Ю. Егоров, Я.В. Егоров/ Численное исследование низкочастотной акустической неустойчивости в двухкамерном рдтг// Математическое моделирование систем и процессов. 2005. № 13.– С. 101–109. 7. Yu Liu, A. Dowling, T. Dunstan/ Modeling of combustion noise spectrum from turbulent premixed flames// Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference, 23-27 April 2012, Nantes, France.– P. 2321–2326 8. В. В. Голуб, Д. И. Бакланов, С. В. Головастов/Воздействие акустического поля на развитие пламени и переход в детонацию//Теплофизика высоких температур, 2010, том 48, № 6.– С.– 901-907].

Таким образом, процесс горения сопровождается волновым акустическим излучением, и оба эти процесса оказывают взаимное влияние друг на друга. С учетом этого целесообразно рассмотреть использование явления звукового излучения для раннего обнаружения очага пожара и возможной его ликвидации с помощью внешнего акустического воздействия.

Акустические колебания влияют на скорость распространения пламени, вызывают его колебания. В ультразвуковом диапазоне частот (270 – 500мГц) наблюдается отчетливое увеличение скорости распространения пламени, в диапазоне частот 5–40 кГц – звуковые излучения сказываются на его устойчивости (срыв и отрыв пламени, вновь присоединение) [9. Технические основы химмотологии. Под ред А. Браткова, 1985.–М.: Химия.– 320 с.]. О возможности и целесообразности использования эффекта АЭ как прикладного инструмента для обнаружения пожара в самолетах, складах различного назначения сообщается в [10. *Early fire detection using acoustic emissions*//C. Kwan, X. Zhang, and R. Xu, *IFAC Proceedings Volumes*, 2003.–P. 351 – 355]. В [11. K.Miked, P.Stavrakakis, A.Agapiou / Chemical, acoustic and optical response profiling for analysing burning patterns // *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 176, 2013, P.– 290-298] для синхронизированного химического, оптического и акустического мониторинга пожара лабораторного масштаба предлагается алгоритм обработки данных при горении хлопчатобумажного текстиля и древесины с помощью спектрального анализа для количественного определения гармоник. Анализ акустических сигналов, сопровождающих экспериментальный пожар из древесного сухостоя в открытом поле, представляет точную и своевременную реакцию на пожарное событие [12. P. Stavrakakis A. Agapiou K. Mikedi S. Karma M./ A scale-up field experiment for the monitoring of a burning process using chemical, audio, and video sensors// *Environ Sci Pollut Res Int.* 2014 Jan;21(2).– P.– 891-900].

Для осуществления подобных разработок необходимо знание об основных фундаментальных принципах процессов горения, распространения и затухания акустических волн. Горение материала связано с изменением его агрегатного состояния, с фазовыми переходами первого и второго рода в течение процесса горения. В природе в большинстве своем физические системы являются открытыми. Рассматривая открытое горение как открытую термодинамическую систему, в которой в результате термодеструкции вещества вследствие химических реакций окисления происходит высвобождение вещества и энергии в виде упругих волн и перераспределение масс. Таким образом, можно применить законы термодинамики и газодинамики, а для исследований излучений – методы анализа волновых процессов.

Автором на основе физической модели открытого горения, реализованной на лабораторной установке, проведен ряд экспериментов по исследованию проявления акустического излучения при открытом горении твердых и легковоспламеняющихся жидких веществ сделан многосторонний анализ полученных результатов и разработан метод, который позволяет фиксировать пожар на ранней стадии [13 моя ПБ].

Сигналы акустических излучений, сопровождающие открытое горение целлюлозосодержащих материалов и легковоспламеняющихся жидких веществ, регистрировались и обрабатывались в соответствии с разработанным алгоритмом. Алгоритм включает в себя модуль проверки работоспособности системы обнаружения очага возгорания по эталонному сигналу; 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 принятия решения.

Таким образом обработаны спектры АЭ при горении всех образцов веществ, использованных в эксперименте. В результате для каждого испытываемого образца вещества сформировалось по 3 – 5 зарегистрированных и обработанных последовательностей, характеризующих акустический сигнал [14_ моя скопус]. Сигнал фиксировался каждые $2,2 \cdot 10^{-5}$ с в продолжение всего периода горения, количество зарегистрированных отсчетов находится в пределах от $1,5 \cdot 10^6$ до $9,7 \cdot 10^6$. В результате получена совокупность временных рядов и амплитудно-частотных характеристик для серии экспериментов каждого образца.

Фрактальный и спектральный анализ временных рядов, характеризующих горение исследуемых материалов позволил

выделить характерные особенности каждого горящего материала и установить пиковые амплитуды на соответствующей частоте, характерные для фактического загорания [14_моя скопус]. Получение данных об акустических сигналах из очага возгорания и их анализ представляют точную и своевременную реакцию на воспламенение или начальную стадию пожара. По массивам результатов эксперимента создана база фрактальных характеристик показателей Херста и разработан алгоритм идентификации ряда горючих материалов и веществ [15].

Влияние акустического поля на пламя интересно для анализа пламени, свойственного открытому горению при пожарах. Кумагаи [16. Кумагаи Горение, М.: Химия, 1979. — 256 с.] экспериментально подтвердил увеличение скорости горения под действием ультразвуковой волны частотой 270 и 500 кГц, которая генерировалась с помощью кварцевого генератора. Интерес к возможности подавления пламени с помощью звуковой волны вызван жизненно важной проблемой борьбы с пожаром в закрытых пространствах и помещениях и в разных средах, когда использование других традиционных методов невозможно или затруднено. Высотные строительные сооружения специального и бытового назначения имеют, как правило, сложный интерьер и требуются новые методы для предотвращения и подавления потенциального возгорания. Влияние акустики на струйные течения и пламя отмечено уже в 1858 году [17. Le Conte // Phil. Mag. 1858. V. XV. – С.– 235.].

Как пробный альтернативный способ тушения пожара с помощью акустического давления и скорости вовлекаемого воздуха анализируется распространение звуковой волны, влияние ее частотного диапазона на пламя от различного топлива в коллиматоре и окружающей среде. [18. S. M. Karodil , Mr. Bhushan Patil , Mr. Rinkesh More и др./ Quenching of flames by sound // 2017 IJARISE-ISSN(O)-2395-4396 Vol-3 №1 – С.– 1440-1446].

Постановка задачи и ее решение. Очевидно, что механизм взаимовлияния пламени и акустического возмущения может быть связан с соотношением окислитель/горючее, конвективными силами переноса вещества, скоростью химических реакций, турбулентностью и типом горючего материала или вещества. Подвергая воздействию акустическими волнами пламенный поток, можно управлять процессом устойчивости горения, в том числе и целенаправленно достигать срыва пламени, то есть его угасания. Даже рассматривая только продольные акустические волны, согласно уравнению газового состояния $PV = nRT$ при определенном значении давления можно достичь значительного понижения температуры.

Чтобы использовать эффект акустического воздействия с целью подавления огня, обратимся к многочисленным исследованиям горения отдельной капли горючего. Скорость турбулентного горения интенсифицируется с ростом пульсаций. Наложение акустических волн определенной частоты и амплитуды увеличивают колебательный процесс и вызывают эффекты изменения формы пламени в зависимости от резонансных частот и звукового давления. Интенсивность научных исследований в этой области не уменьшается, что говорит об актуальности проблемы.

Определение условий, при которых под воздействием звука на открытое пламя изменяется не только интенсивность горения, но сужается область устойчивости, происходит укорочение пламени, изменение его формы, достигая максимума на резонансных частотах, проводилось уже в 1976 году. [19. В. Кондратьев, А. Сушков/ Физика горения и взрыва, 1976.–№5.– С.–783–785]. Согласно проведенным оценкам установлена величина отношения пульсационной скорости u к средней скорости потока v , когда воздействие звука эффективно $u/v \cong 0,08$ и величина отношения, когда происходит сначала отрыв пламени от форсунки, а затем и срыв при $u/v \cong 0,3$.

Многочисленные исследования самовозбуждаемых и вызываемых внешним акустическим воздействием явлений локального срыва пламени, образования «дыр» и затухания пламени при горении отдельной капли или с помощью горелки Бунзена [20. Ю. А. Литвиненко, А. Б. Балбуцкий, В. В. Вихорев, Г. В. Козлов, М. В. Литвиненко /Экспериментальное исследование развития гидродинамической неустойчивости в круглой микроструе пропана при воздействии внешнего акустического поля с горением и без горения// Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 4С. 21–28. 21. Ильющонок А.В., Гончаренко И.А., Лешенюк Н.С./ О влиянии звуковых волн на процессы горения// Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, Т. 1, № 1, 2017.– С.– 26–33 22. М.С. Кривокорытов, В.В. Голуб, В.В. Володин /Влияние акустических колебаний на диффузионное горение метана //Письма в ЖТФ, 2012, том 38, вып. 10.– С.–57 – 63 23. Dubnishchev Y., Lemanov V., Lukashov V. and другие Hydrodynamic Vortex Structures in a Diffusion Jet Flame//Swirling Flows and Flam, 2018.– с.–33–53 24. K. M. Lyons, K. A. Watson, C. D. Carter / Upstream Islands of Flame in Lifted-Jet Partially Premixed Combustion//Combust. Sci. and Tech., 2007, 179:–С.– 1029–1037], помогают понять суть процесса и дают возможность использовать этот эффект для подавления звуковой волной очага загорания.

При изучении сложных физических процессов удается избежать больших трудностей описания, проводя эксперимент на модельной

системе, свойства и размеры которой легко изменять, а затем с помощью законов подобия перенести полученные на модели данные на исследуемую исходную физическую систему.

Существует несколько критериев подобия, которые характеризуют неустойчивость нестационарных течений химически реагирующих потоков жидкостей и газов.

Скорость химической реакции открытого горения соизмеряется с процессами переноса в реагирующем потоке, когда смешиваются окислитель и горючее, то есть пропорционально зависит от скорости смешивания реагентов. Критерием скорости является число Дамкёлера [25. A. Mikelić, V. Devigne, C.J. van Duijn, Rigorous upscaling of the reactive flow through a pore, under dominant Peclet and Damkohler numbers, SIAM J. Math. Anal., Vol. 38 (2006), p. 1262-1287.]

$$D = \tau_c / \tau_o, \quad (1)$$

где τ_c и τ_o – временной масштаб диффузного смешения и временной масштаб химической реакции горения соответственно. При $D \ll 1$ горение возможно и интенсивное, при $D < 1$ – процесс затухает. Существует предположение, что акустическое взаимодействие с пламенем является основным механизмом гашения в турбулентных диффузионных потоках. Локальное угасание пламени может быть результатом деформации зоны реакции, налагаемой потоком и препятствующей горению, что вызывает падение числа Дамкёлера ниже критического.

Аналитические исследования взаимодействий акустических волн и пламени показали, что доминирующим параметром, контролирующим реакцию флуктуаций площади пламени, длины пламени и осевой скорости потока на акустические возмущения, является число Струхалия – критерий подобия потока движения жидкостей и газов [26. Journal of propulsion and power Vol. 19, No. 5, September–October 2003.–Premixed Flame Kinematics in a Longitudinal Acoustic Field Doh-Hyoung Lee[□] and Tim C. Lieuwen[†]Georgia Institute of Technology Atlanta, Georgia 30332-0150].

Число Струхалия в нестационарном движении учитывает влияние возмущений на скорость движения потока. Нормированная частота возмущения

$$Sh = fl / u, \quad (2)$$

где f – частота возмущения потока, l – характерный линейный размер, u – скорость течения. Число Струхалия является функцией

числа Рейнольдса Re , в диапазоне $200 < Re < 200000$ действует эмпирический закон постоянства числа Струхаля: $Sh \cong 0,2 - 0,3$.

Условия возникновения свободной и вынужденной (под действием внешних сил) конвекции, интенсивность конвективного теплопереноса в потоке характеризуется числом Рэля (Ra) [27. Ahlers, Guenter; Grossmann, Siegfried; Lohse, Detlef "Heat transfer and large scale dynamics in turbulent Rayleigh-Bénard convection". *Reviews of Modern Physics*. 81 (2): 2009.–503–537.]. Этот безразмерный критерий характеризует отношение потока тепла в жидкости или газе за счет подъемной силы, возникающей вследствие неравномерности градиента температур и теплопроводности среды

$$Ra = gl^3\beta\Delta T / \nu a, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, l – характерный линейный размер, β – температурный коэффициент объемного расширения, ΔT – разность температур со средой, ν – коэффициент кинематической вязкости, a – коэффициент теплопроводности.

Критическое значение числа Рэля является точкой бифуркации для динамики реагирующего потока. Начало неустойчивости горения объясняется циклом обратной связи между колебаниями временной скорости u , колебаниями давления p и колебаниями тепловыделения q . Когда колебания давления и тепловыделения не совпадают по фазе относительно друг друга, предполагается стабильность сгорания. Неустойчивость горения может быть математически описана в течение влияния акустического воздействия за время T по координате x :

$$Ra(x) = \frac{1}{T} \int_T p(x,t) \cdot q(x,t) dt. \quad (4)$$

Стабильное сгорание соответствует отрицательному значению числа Ra , положительное значение – неустойчивости горения.

Влияние акустического поля на распространение пламени исследовано с помощью численного моделирования и эксперимента по двум направлениям: диффузного и конвективного эффектов увеличения скорости горения [28. Acoustic Field // Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, 2009 Volume 7 – P. 87-92]. Распространение пламени определяется скоростью расхода несгоревшей газовой массы. Из баланса массы перпендикулярно фронту пламени имеет место следующее соотношение:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_u S \Leftrightarrow S = \frac{1}{\rho_u} \cdot \frac{dm}{dt} \quad (5)$$

Здесь $\frac{dm}{dt}$ – скорость массового выгорания смеси, ρ_u – плотность несгоревшей массы, S - скорость горения. В зависимости от акустического воздействия на пламя процесс смещается влево или вправо согласно уравнению (5).

Влияние звуковой частоты f , скорости V и числа Рейнольдса (Re) при наложении акустического воздействия с одинаковым уровнем звукового давления (100 дБ) на горение диффузного факела представлено в [22]

Известно, что массовая скорость горения капли (диаметром d) жидкого топлива растет до определенного предела с увеличением скорости обдува капли потоком окислителя, после наступает момент срыва пламени с лобовой поверхности капли. Скорость v_{cp} , при которой пламя срывается, и диаметр капли связаны соотношением $v_{cp} / d = const$ [29. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения, М.– Л.: Госэнергоиздат, Под ред. Вырубова Д.Н. – 1959.–320с.].

Исследование влияния акустических полей на сгорание капель н-декана в условиях микрогравитации, без учета переменной и естественной конвекции, на звуковой частоте от 66,5 до 3353 Гц и с уровнями звукового давления до 135 дБ показало увеличение скорости горения с увеличением амплитуды, значительное деформирование пламени и сажевое кольцо вместо сажевой оболочки [30. M.Tanabe, T. Morita, K. Aoki/ Influence of standing sound waves on droplet combustion // Proceedings of the Combustion Institute, Volume 28, Issue 1, 2000, Pages 1007-1013. 31. Fernando Lima, Luis Gilberto, Pedro Teixeira / Experimental Aspects of Soot Presence in Pulsating Diffusion Flame// J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng., 138 , Vol. XXXI, №. 2, 2009. –P.– 137–141].

Акустическая волна частотой от 0 до 400 Гц и амплитудой от 0 до 1400Па **укорачивает длину пламени, что экспериментально установлено**, а критическая частота, меньшая 190 Гц, приводит к уменьшению времени реакции на образование NO_x [31. Kai Deng, Mingxiao Wang / Effect of Different Acoustic Parameters on NO_x Emissions of Partially Premixed Flame// Appl. Sci. 2019, 9, 1490; 12 стр doi:10.3390].

В экспериментальных исследованиях [32. John W. Bennowitz, Miguel A. Plascencia, Dario Valentini и др. // Periodic partial extinction in acoustically coupled fuel droplet combustion// Combustion and Flame, 2018.– Vol 89.– P.–:46-61] поведение горящих капель жидкого

топлива (этанола, JP-8, жидкого синтетического Фишера-Тропша) были получены оценки скорости деформации, испытываемой пламенем во время акустического возбуждения. Эти оценки помогли интерпретировать взаимосвязь между акустическим (частота, амплитуда), химическим и жидкостно-механическим влиянием на частичное исчезновение и повторное возникновение пламени, полное затухание при очень высоких амплитудах возбуждения. Измерения локального временного давления позволяют количественно определить акустическую связь горения через локальный индекс Рэлея. пламя исчезало при частоте акустического влияния в 10 и 90 Гц при концентрации этилена 40 и 0 % соответственно [33. Wei-Chieh Hu, Shanti Kartika Sari, Shuhn-Shyurng Hou, Ta-Hui Lin / Effects of Acoustic Modulation and Mixed Fuel on Flame Synthesis of Carbon Nanomaterials in an Atmospheric Environment// Materials 2016, 9 (11), 939.– 1-14].

Для минимизации затухания звуковой энергии и передачи ее в конкретную точку (область) используется диффузор с акустической линзой.[34. К. М. Lyon , К. А. Watson, С. D. Carter / Upstream Islands of Flame in lifted-Jet Partially Premixed Combustion // Combust. Sci. and Tech., 179: 1029–1037, 2007]

Научно-исследовательский институт звуковой инженерии им. Сори (SSERI) активно исследует Sound Fire. Акустический огнетушитель был впервые представлен, для применения на военных объектах США, Агентством перспективных исследовательских проектов (DARPA), где низкочастотные акустические волны гармонического типа взаимодействуют с пламени, что приводит к тушению, и, кроме того, SSERI разрабатываются устройства для использования в реальных условиях пожаротушения. [35. D.A.R.P.A. Defense Advanced Research Projects Agency, “Instant Flame Suppression Phase TI - Final Report,” 2012.– pp. 1–23], продемонстрировало, что огонь можно потушить, окружив его двумя большими звуковыми колонками. Первый звуковой огнетушитель, был очень большим и основывался на теории начальных принципов, что затрудняло его коммерциализацию. В ходе исследования установили фиксирование погасания 15-сантиметрового диффузного метанового пламени, подверженного акустическому возбуждению в диапазоне от 35 до 150 Гц с давлением в диапазоне от 0,2 Па (80 дБ) до 112 Па (135 дБ). Источником звука был коммерческий громкоговоритель[35].

Автором статьи, для устранения недостатков, приведенных выше, предлагается следующий метод акустического воздействия.

Воздействие, особой формы акустического импульса (волны), на основе заведомо определенных спектров акустического излучения процесса горения веществ [14] направленного в области горения на

границу раздела сред приводит к резкому снижению температуры газовой смеси (снижение температуры воспламенения) и увеличение концентрации продуктов горения на границе раздела фаз. Дальнейшее воздействие такой волны приводит к постепенному прекращению процесса горения.

Для эффективного применения предлагаемого способа тушения необходимо определить вид горящего материала (вещества). Потому, что для жидких и твердых веществ характерны различные частоты акустического воздействия (акустическое излучение) для эффективного подавления горения до полного прекращения.

При горении твердых веществ, частота импульсов акустического воздействия, направленного на прекращение процесса горения, составляет от 40 до 100 Гц. При этом, более значительным влиянием, приводящим к прекращению (замедлению) процесса горения является уровень мощности (звуковое давление), составляющий около 70дБ.

Поскольку, акустические сигналы, которые сопровождают химические реакции горения строятся на основании временных рядов то можно получить данные для идентификации горящего или воспламенившегося вещества. Воспользуемся фрактальным анализом временного ряда. Показатель Херста - H , который определяет фрактальные свойства ряда, исчисляется методом нормированного размаха или фрактального R / S анализа, не содержит требований к форме распределения [36. Э. Петерс Фрактальный анализ финансовых рынков: Применение теории Хаоса в инвестициях и экономике, 2004.— М.: Интернет–трейдинг.— 304 с.]. Предварительные результаты экспериментов можно разделить на две группы. В одном ряду находятся древесина и бумага ($0.3 < H < 0.32$), в другом - вата, картон ($0.16 < H < 0.27$). Это позволяет выявить пожар на начальной стадии.

Также, стоит отметить, что форма импульса при акустическом воздействии оказывает значительное влияние на подавление процесса горения и повышает энергетические показатели воздействия, в отличие от случая использования гармонического сигнала [35], и должна быть близкой к меандру вида:

$$rect(t) = \Pi(t) \begin{cases} 0, |t| > t_n/2 \\ \frac{A}{2}, |t| = t_n/2 \\ A, |t| < t_n/2 \end{cases} \quad (6)$$

где A – значение амплитуды (мощность импульса-звуковое давление)
 t_u - длительность импульса.

При горении жидкостей частота акустического излучения имеет диапазон от 19 до 37Гц, а форма импульса должна быть по фронту прямоугольной функцией (6), а по срезу:

$$f=Ae^{-kt}, \quad (7)$$

где k – коэффициент, полученный экспериментально и зависит от химического состава жидкости. Так же имеет значение такой параметр как - скважность.

Частота, скважность и форма импульса задаются с помощью периодической импульсной функции вида:

$$y =f(d), \quad (8)$$

где $d = P(t)-T \cdot [P(t)/T]$; T - период функции, в состав которой входят функция фронта и среза импульса в виде результирующего полинома $P(t)$.

При мощности акустического воздействия от 60 до 80дБ наблюдается полное прекращение процесса горения при площади очага пламени около 250 см² и расстояния от очага от 30 до 100 см.

ВЫВОДЫ. Таким образом, реализация предложенного способа позволяет повысить эффективность обнаружения воспламенения или пожара на основе идентификации горящего вещества по индивидуальному спектру и фрактальной размерности, что позволит сформировать параметры акустического воздействия для тушения. Тушение пожара акустическим воздействием на очаг возгорания позволяет не использовать огнетушащее вещество и как следствие не приводит к порче оборудования (серверные, шкафы распределительные) даже при ложном срабатывании системы автоматического пожаротушения. снизить энергозатраты и длительности акустического воздействия. Также уменьшает материальные затраты на тушение пожара и открывает возможность создания портативных устройств для тушения пожаров акустическим воздействием.

Метод акустического тушения пожара является экологически безопасным.

ЛИТЕРАТУРА

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.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