

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

**АКУСТИЧЕСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ МЕТОД
ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ,
ВОЗНИКАЮЩИХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПОЖАРА ВНУТРИ
ПОТЕНЦИАЛЬНО-ОПАСНОГО ОБЪЕКТА**

(представлено д.т.н. Росохой С.В.)

В работе рассмотрены основные этапы формирования акустического инженерно-технического метода предупреждения чрезвычайных ситуаций возникающих в результате пожара внутри потенциально-опасных объектах. Последний основан на использовании в средствах обнаружения очага возникновения горения анализа акустической эмиссии процесса горения. Предложена методика определения параметров акустического воздействия на очаг горения, как основы для последующего формирования управляющего алгоритма инженерно-технического метода и процедур его реализации. Установлена связь параметров акустического воздействия на очаг возникновения чрезвычайной ситуации возникающей в результате пожара в зависимости от горящего вещества. На основании последней разработаны отдельные предложения по предупреждению чрезвычайной ситуации на начальной стадии ее развития.

Ключевые слова: инженерно-технический метод, акустическая эмиссия процесса горения, чрезвычайная ситуация, потенциально-опасный объект.

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, – чрезвычайными ситуация в результате возникновения пожара, являющимися наиболее распространенной техногенной опасностью потенциально-опасных объектов. Во всем мире постоянно предпринимаются усилия, направленные на совершенствование и создание новых методов предупреждения чрезвычайных ситуаций подобного рода. Последние, как правило, основаны на рассмотрении различных физико-химических процессов, которые сопровождают возникновение очага возможной чрезвычайной ситуации в результате пожара. Несовершенство управляющих алгоритмов традиционных методов предупреждения и процедур их реализации приводит к высокому проценту ложных срабатываний автоматических систем, как обнаружения, так и последующей ликвидации возможных очагов возгорания на потенциально-опасных объектах, что в дополнении с использованием традиционных огнетушащих составов наносит неоправданный экономический ущерб оборудованию потенциально-опасных объектов. Совокупность наведенных факторов составляет, не решенную на сегодня в рамках парадигмы гражданской безопасности, проблему.

Анализ последних исследований и публикаций. Несмотря на высокий технологический уровень новых методов предупреждения чрезвычай-

ных ситуаций в результате пожара [1] все они по своей природе инвазивны [2]. Кроме того, есть ограничения в применении в труднодоступных местах, в закрытых помещениях, в авиалайнерах и на надводных и подводных морских судах. Наличие большого количества пожарной нагрузки характерно и для резервуаров с горючими веществами, химических предприятий, мест хранения боеприпасов, моторных отсеков техники. Тушение посредством электромагнитных импульсов [3] может вызвать сбои в работе электронного оборудования (например, электросетей).

Эти недостатки с успехом может преодолеть технология, использующая акустические волны [4, 5] для обнаружения [6, 7] и ликвидации пожара [8, 9] как в качестве альтернативы [10], так и в виде дополнения к уже известным методам [11, 12].

Существенным недостатком, как выше приведенных исследований, так и проводимые ранее авторских экспериментальных исследования [13, 14], проявление акустического излучения при открытом горении твердых и легковоспламеняющихся жидких веществ, является отсутствие на их базе обоснованных предложений по дальнейшему практическому применению подобных подходов к предупреждению чрезвычайных ситуаций. Это, в свою очередь, невозможно без формирования единой методологии в виде совокупности акустических инженерно-технических методов предупреждения [15].

Таким образом, исследования направленные на разработку инженерно-технических методов предупреждения чрезвычайных ситуаций возникающих в результате пожара, которые основаны на анализе акустической эмиссии процесса горения, как инновационном подходе, обеспечивающем высокий процент устойчивости системы предупреждения к ложным срабатываниям, есть актуальная и своевременная задача.

Постановка задачи и ее решение. Задачей исследования есть определение основных этапов формирования акустического инженерно-технического метода предупреждения чрезвычайных ситуаций возникающих в результате пожара внутри потенциально-опасных объектов. 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, достигая 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 вы-

зывают 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.[16]. 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 [17, 18], 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.

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

где τ_c и τ_o временной масштаб диффузного смещения и временной масштаб химической реакции горения соответственно. При $D < 1$ 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 Струхала – критерий подобия потока движения жидкостей и газов [19].

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

Условия возникновения свободной и вынужденной (под действием внешних сил) конвекции, интенсивность конвективного теплопереноса в потоке характеризуется числом Рэлея (Ra) [20].

Этот безразмерный критерий характеризует отношение потока тепла в жидкости или газе за счет подъемной силы, возникающей вследствие неравномерности градиента температур и теплопроводности среды:

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

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

Критическое значение числа Рэлея 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 R_a , 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 [21]. Распространение пламени определяется скоростью расхода несгоревшей газовой массы. Из баланса массы перпендикулярно фронту пламени имеет место следующее соотношение:

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

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 $v_{ср}$, при которой пламя срывается, и диаметр капли связаны соотношением $v_{ср} / d = \text{const}$ [23].

Исследование влияния акустических полей на сгорание капель n -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 [24].

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

При горении твердых веществ, частота импульсов акустического воздействия, направленного на прекращение процесса горения, составляет от 40 до 80 Гц. При этом, более значительным влиянием, приводящим к прекращению (замедлению) процесса горения является уровень мощности (звуковое давление), составляющий около 70 дБ.

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 [25]. 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 [26], и должна быть близкой к меандру вида:

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

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

При горении жидкостей частота акустического излучения имеет диапазон от 19 до 37 Гц, 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:

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

где z :

$$z = P(t) - T \cdot [P(t)/T], \quad (9)$$

где 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 80 дБ 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 подхода позволяет в дальнейшем сформировать управляющий алгоритм и процедуры его реализации, что в свою очередь наряду с математической моделью предупреждения чрезвычайных ситуаций подобного характера, составляю основу акустического инженерно-технического метода предупреждения чрезвычайных ситуаций в результате пожара на потенциально-опасных объектах. Реализация последнего прогнозируемо повысит эффективность обнаружения воспламенения в очаге возможной чрезвычайной ситуации на основе идентификации горящего вещества по индивидуальному спектру и фрактальной размерности, что, во-первых, существенно уменьшить

число ложных срабатываний уже имеющихся систем автоматического пожаротушения, и во-вторых, сформирует параметры акустического воздействия на очаг возгорания для предупреждения процесса перерастания чрезвычайной ситуации на более высокие уровни распространения без использования традиционных огнетушащих веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu H.Z., Zhou X., Carpenter J. Physical scaling of water mist fire extinguishment in industrial machinery enclosures. *Fire Saf. J.* 2017. Vol. 91. P. 596-605. URL:<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.033>.
2. White J.P., Verma S., Keller E. Water mist suppression of a turbulent line fire. *Fire Saf. J.* 2017. Vol. 91. P.1–9
3. Zhang X., Ismail M., Ahmadun F. Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies. A review *Brazilian J. Chem. Eng.* 2015. no. 32. P. 707–724.
4. Oyediran A., Darling D., Radhakrishnan K. 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. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с. ISBN 978-5-9221-0964-2.
6. Егоров М.Ю., Егоров Я.В. Численное исследование низкочастотной акустической неустойчивости в двухкамерном РДТД. Математическое моделирование систем и процессов. 2005. № 13. С. 101–109.
7. Liu Y., Dowling A., Dunstan T. Modeling of combustion noise spectrum from turbulent premixed flames. *Proceedings of the Acoustics 2012. Nantes. Conference, 23-27 April 2012, Nantes, France.* 2012. P. 2321–2326
8. Голуб В.В., Бакланов Д.И., Головастов С.В. Воздействие акустического поля на развитие пламени и переход в детонацию. *Теплофизика высоких температур*, 2010, том 48, № 6. С. 901-907.
9. Технические основы химмотологии. Под ред А. Браткова, 1985. Москва. Химия. 320 с.
10. Kwan C., Zhang X., Xu R. Early fire detection using acoustic emissions. *IFAC Proceedings.* 2003. P. 351–355.
11. Miked K., Stavrakakis P., Agapiou A. Chemical, acoustic and optical response profiling for analysing burning patterns. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 176, 2013. P. 290-298.
12. Stavrakakis P., Agapiou A., Mikedi K., Karma S.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. No. 21(2). P. 891-900.
13. Левтеров А.А. Разработка модели идентификации горючего вещества в зоне очага возгорания. Проблемы пожарной безопасности. НУЦЗУ, 2019. Вып. 45. С. 92-97.
14. Levterov A.A. Acoustic research method for burning flammable

substances. Acoustical physics, 2019. vol. 65. issue 4, P. 444–449. DOI 10.1134/S1063771019040109

15. Левтеров О.А. Виявлення надзвичайної ситуації техногенного характеру за акустичним випромінюванням осередку небезпеки. Комунальне господарство міст, 2019. Т. 5, Вип. 151. С. 100-106. DOI 10.33042/2522-1809-2019-5-151-100-106

16. Кондратьев В., Сушков А. Воздействие звука на открытое пламя. Физика горения и взрыва, 1976. №5. С. 783–785

17. Литвиненко Ю. А., Балбуцкий А. Б., Вихорев В. В., Козлов В. Г., Литвиненко М. В. 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. 4. С. 21–28.

18. Ильюшонок А.В., Гончаренко И.А., Лешенюк Н.С. О влиянии звуковых волн на процессы горения. Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, 2017. Т. 1. № 1. С. 26–33.

19. Doh-Hyoung L., Tim C. L. Premixed flame kinematics in a longitudinal acoustic field. Journal of propulsion and power, Georgia Institute of Technology Atlanta, Georgia, 2003. Vol. 19, No. 5. P. 30332-0150.

20. Ahlers, G., Grossmann S., Lohse, D. Heat transfer and large scale dynamics in turbulent Rayleigh-B. Inward convection. Reviews of Modern Physics. 2009. №81(2). P. 503–537.

21. Numerical Analysis on Premixed Flame Propagation in Acoustic Field. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, 2009. Vol. 7. P. 87-92.

22. Кривокрытов М.С., Голуб В.В., Володин В.В. Влияние акустических колебаний на диффузионное горение метана. Письма в ЖТФ, 2012. т. 38. Вып. 10. С. 57–63.

23. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения. Москва.-Ленинград. Госэнергоиздат, Под ред. Вырубова Д.Н., 1959. 320с.

24. Tanabe M., Morita T., Aoki K. Influence of standing sound waves on droplet combustion. Proceedings of the Combustion Institute, 2000. Vol. 28, Issue 1. P. 1007–1013.

25. Петерс Э. Фрактальный анализ финансовых рынков: Применение теории Хаоса в инвестициях и экономике, 2004. Москва. Интернет-трейдинг. 304 с.

26. Instant Flame Suppression Phase TI – Final Report / DARPA. Defense Advanced Research Projects Agency, 2012. P. 1–23.

Получено редколлегией 10.10.2019

А.А. Левтеров

Розробка акустичного інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій виникаючих в результаті пожежі всередині об'єкта контролю

В роботі розглянуто основи формування акустичного інженерно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій що виникають в результаті пожежі на потенційно-небезпечних об'єктах. Останній заснований на використанні в засобах виявлення

пожежі виникнення загоряння аналізу акустичної емісії процесу горіння. Запропоновано методику визначення параметрів акустичного впливу на осередок займання, як основи для подальшого формування керуючого алгоритму інженерно-технічного методу і процедур його реалізації. Встановлено зв'язок параметрів акустичного впливу на осередок надзвичайної ситуації, що виникає в результаті пожежі в залежності від палаючої речовини. На підставі останнього розроблено окремі пропозиції щодо гасіння осередку пожежі на початковій стадії розвитку надзвичайної ситуації.

Ключові слова: інженерно-технічний метод, акустична емісія процесу горіння, надзвичайна ситуація, потенційно-небезпечний об'єкт.

A. Levterov

Development of acoustic engineering and technical method for preventing emergency situations arising as a result fire of inside a controlled object

The article the basics of the formation of an acoustic engineering method for the prevention of emergency situations arising from a fire at potentially hazardous objects have been discusses. The latter on the use of acoustic emission analysis of the combustion process in means of detecting a source of burning has been based.

A technique is proposed for determining the parameters of the acoustic impact on the combustion seat. It is the basis for the subsequent formation of the control algorithm engineering method and procedures for its implementation. The association between the parameters of the acoustic impact on the source of an emergency occurring as a result of a fire, depending on the burning substance has been established. Based on the latter, individual proposals have been developed to extinguish the fire at the initial stage of development emergency.

Keywords: engineering method, acoustic emission of the combustion process, emergency situation, potentially hazardous object.