

УДК 543.222.2

## О ВЛИЯНИИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ

Ильюшенок А.В., Гончаренко И.А., Лешенюк Н.С., Кулешов В.К., Терешенков В.И.

Дан краткий обзор ряда работ, посвященных изучению влияния акустических волн на процесс горения с целью повышения эффективности использования топлива, уменьшения вредных выбросов и тушения локальных возгораний.

*Ключевые слова:* звуковые волны, акустические поля, пламя, процессы горения, подавление процесса горения.

(Поступила в редакцию 15 июля 2016 г.)

Исследования влияния звуковых волн на процессы горения проводятся на протяжении длительного времени, что обусловлено рядом причин. Широкое использование в различных областях техники тепловых устройств предполагает наличие систем управления процессом горения. Принцип работы таких систем основан на регулировании количества, химического состава и скорости подачи топлива и окислителя, а также скорости удаления продуктов горения [1]. Для расширения условий управления процессами горения в последнее время исследуются возможности воздействия на эти процессы внешних факторов, а именно, электрических и магнитных полей, акустических волн. Эти исследования направлены главным образом на решения актуальных в плане практического применения задач: уменьшения содержания токсичных веществ в продуктах горения, повышение эффективности использования различных видов топлива и тушение локальных возгораний и пожаров. Преимуществами предполагаемых систем пожаротушения будут их компактность и отсутствие необходимости в тушащих веществах. В данной статье анализируется состояние исследований по акустическому воздействию на процесс горения. В работах, посвященных данной проблеме в качестве характеристик акустического воздействия используются следующие параметры:

- звуковое давление  $P$  [Па] – амплитуда изменения давления воздуха в результате колебательного движения частиц;
- уровень звукового давления  $N$  [дБ],  $N = 20 \lg(P/P_0)$ , где  $P_0 = 2 \times 10^{-5}$  Па – давление порога слышимости;
- акустическая плотность (интенсивность звука, сила звука)  $I$  [Вт/м<sup>2</sup>],  $I = P \cdot v / 2 = P^2 / (\rho c)$ , где  $\rho$  – плотность среды,  $c$  – скорость звука в ней;
- уровень интенсивности  $N$  [дБ],  $N = 20 \lg(I/I_0)$ , где  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> – пороговая интенсивность;
- амплитуда колебательного смещения  $\xi$  [мм],  $\xi = P / (\omega \rho c)$ , где  $\omega$  – частота звука;
- колебательная скорость  $v$  [м/с] – амплитудное значение скорости колебательного движения частиц в акустическом поле,  $v = P / (\rho c) = \omega \xi$ .

**Повышение степени сгорания и снижение загрязнения атмосферы.** Результаты первых исследований влияния акустических колебаний на процесс горения и их анализ представлены в монографии [1] где отмечается, что диффузионное пламя маленькой горелки может быть очень чувствительным к звуковым колебаниям. Даже слабые колебания могут приводить к резкому уменьшению длины пламени. При этом пламя реагирует только на определенные частоты звука, и эффективность воздействия звука зависит от размеров и формы горелки и вида топлива. Помимо этого, эффективность воздействия зависит от направления распространения звуковые колебания относительно пламени.

В этой работе [1] анализируется процесс горения пропан-воздушной смеси, вытекающей из сопла, причем поток смеси поступает из большого резервуара, в который помещен источник акустических волн. При амплитуде звуковых колебаний меньшей 0,01 мм (при частоте 5000 Гц) звук не оказывает никакого влияния на пламя. При этом первоначальная форма пламени представляла собой конус практически с прямолинейными образующими. С увеличением интенсивности звуковых колебаний форма пламени начинает существенно изменяться. При интенсивности звука от 0,14 до 1,5 Вт/см<sup>2</sup> образуется плоское пламя, которое гаснет при дальнейшем увеличении интенсивности.

При воздействии звука на пламя, распространяющееся по трубе, наблюдается следующее. При отсутствии звука пламя имеет полусферическую форму, характерную для не-

турбулентного пламени. При звуке умеренной интенсивности форма пламени изменяется, оно становится практически плоским, а сильный звук полностью гасит пламя.

Экспериментальное исследование влияния акустических воздействий на диффузионное горение метана описано в [2]. В эксперименте использовалась горелка, представляющая собой вертикальную трубку с открытым верхним концом и внутренним диаметром 3 мм. На конце трубки устанавливалось сопло подачи газа с выходным отверстием диаметром 1,25 мм. Подача горючего регулировалась в пределах от 0 до 1,4 л/мин, поток газа в трубке являлся ламинарным. Излучатель звука расположен на расстоянии 10 см от оси пламени. Частота акустических волн менялась в пределах от 0 до 7 кГц, а уровень звукового давления – от 0 до 120 дБ.

На рис. 1 приведены полученные авторами [2] фотографии пламени при акустическом воздействии. Скорость подачи метана составляла  $0,55 \pm 0,05$  л/мин. Плоскость источника звука перпендикулярна плоскости рисунка.

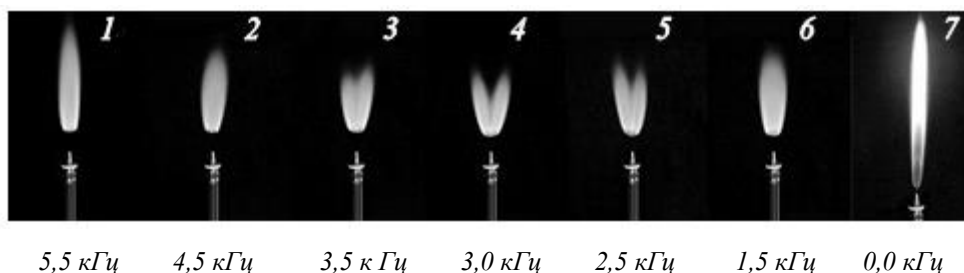


Рисунок 1 – Фотографии пламени при звуковом давлении 100

Эксперимент показал существенное влияние акустического поля на поведение пламени. В отсутствие акустического воздействия при скорости подачи метана  $1,10 \pm 0,05$  л/мин. наблюдается отсоединение пламени, обратное присоединение происходит при скорости  $0,60 \pm 0,05$  л/мин. При акустическом воздействии отрыв и присоединение пламени происходят при меньших скоростях подачи газа (соответственно  $1 \pm 0,05$  л/мин. и  $0,5 \pm 0,05$  л/мин). Это наблюдалось во всем исследуемом диапазоне частот.

Как следует из рис. 1, при определенных частотах звуковой волны происходит бифуркация пламени, т. е. раздвоение факела, причем в областях с повышенной температурой факел расширяется. Как отмечается в [2], наблюдаемые области повышенной температуры являются следствием конвективных потоков, вихревых структур, находящихся за пределами видимой зоны пламени. Эти вихревые структуры вызывают локально интенсивное перемешивание горючего с окислителем, что приводит к росту температуры и увеличению поперечного размера факела. В раздвоении факела, по мнению авторов, участвуют два механизма: развитие гидродинамической неустойчивости в потоке еще не прореагировавшего газа и взаимодействие вихревых структур за пределами пламени.

Тепловизионная съемка факела позволила получить информацию о локализации и динамике областей повышенной температуры. Без акустического воздействия области высокой температуры движутся вверх по потоку с частотой  $\nu = 4$  Гц и скоростью  $v = 0,2$  м/с, при акустическом воздействии изменяется частота и скорость следования этих областей, и наблюдаются колебания степени раздвоения факела с частотой  $\nu = 2,5$  Гц.

Результаты описанных в [2] экспериментов по измерению токсичных выбросов в продуктах горения представлены на рис. 2. Прямая линия соответствует концентрации оксидов азота  $\text{NO}_x$  в отсутствие акустических возмущений. Из рисунка видно, что концентрация  $\text{NO}_x$  существенно зависит от частоты акустических колебаний и уровня звукового давления. Эта концентрация минимальна при частоте  $\sim 3$  кГц. Увеличение звукового давления усиливает эффект снижения концентрации. Так, при уровне звукового давления 110 дБ концентрация  $\text{NO}_x$  в два раза меньше, чем в случае отсутствия акустических воздействий.

Как видно из результатов эксперимента, раздвоение пламени приводит к улучшению перемешивания топлива с воздухом, при этом концентрация  $\text{NO}_x$  в продуктах горения снижается. Хотя условия образования оксидов азота при горении до сих пор не изучены в достаточной мере, известны «термический», «быстрый» и «топливный» механизмы образования  $\text{NO}$ . Образование «топливных» оксидов азота связано с наличием азота в топливе, а «термический» и «быстрый» механизмы непосредственно связаны с кинетикой реакций, протекающих при горении. Выход «быстрых» оксидов азота зависит от соотношения топ-

ливо – воздух, в то время как выход «термических» оксидов азота зависит от температуры. Увеличение температуры и концентрации воздуха должно приводить к увеличению выхода NO. Бифуркация пламени, вызванная акустическим воздействием, приводит к снижению концентрации NO<sub>x</sub> в продуктах горения за счет снижения концентрации «термических» и «быстрых» NO, т. е. снижения температуры пламени и улучшения перемешивания топлива с воздухом. Однако роль того и другого процессов требует дополнительного изучения.

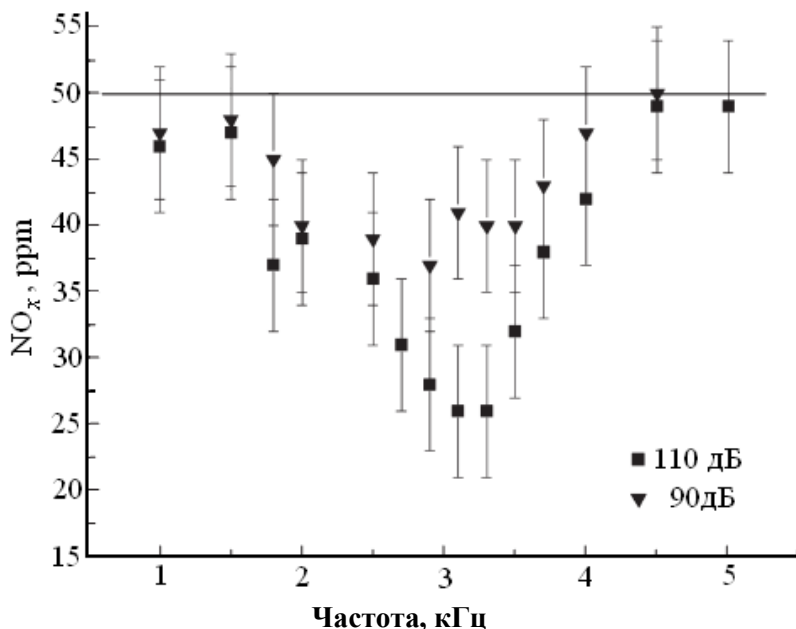


Рисунок 2 – Концентрация NO<sub>x</sub> в продуктах горения в зависимости от частоты звука

Помимо эффекта снижения концентрации оксидов азота при акустическом воздействии наблюдается снижение концентрации сажи и увеличивается эффективность сгорания топлива.

Акустическое поле может способствовать ускорению или торможению фронта распространения пламени, что может быть использовано для управления скоростью сгорания топлива в двигателях и регулирования выхода продуктов сгорания. Изучение этих эффектов, которые наблюдаются при распространении пламени в трубах при акустическом воздействии, проведено, в частности, в [3]. В этой работе приводятся результаты экспериментов по исследованию влияния внешнего акустического поля на распространение пламени в 4% пропано-бутано-воздушной смеси в закрытых трубах. Эти эксперименты показали, что при относительно высокой энергии поджига (0,46 Дж), внешнее акустическое звуковое поле практически не влияет на динамику пламени. При малой энергии поджига (0,06 Дж), это влияние становится существенным. Во внешнем ультразвуковом поле на начальной стадии горения средняя скорость распространения фронта пламени снижается на 30 %, и такое падение скорости сохраняется на протяжении всего процесса горения.

На основе экспериментов по распространению пламени в горючей смеси (пропан-бутан-воздух) в закрытом и полуоткрытом каналах теоретически проанализировано влияние собственной (сгенерированной самим пламенем) акустической волны на распространение пламени в трубах. Для оценки воздействия собственного акустического поля на динамику пламени проведено моделирование процесса распространения пламени в полуоткрытом канале и в закрытой секции той же длины. В качестве горючего были выбраны стехиометрические водородо-воздушная и водородо-кислородная смеси, нормальная скорость горения которых в несколько раз превышает скорость горючей смеси, использованной в экспериментах. Однако, по мнению авторов [3], это не должно качественно влиять на динамику горения. При расчетах считалось, что пламя возникало у закрытого конца канала и далее распространялось по направлению к противоположному открытому либо закрытому торцу. В качестве начальных условий предполагалось, что выбранный объем заполнен горючей смесью при нормальном давлении и температуре. Как было показано, в отсутствие внешних источников само пламя генерирует достаточно сильные акустические возмущения, влияние которых на динамику пламени существенным образом зависит от длины канала. При длине каналов меньше 0,1 м, горение водородо-кислородной и водородо-воздушной

смесей проходит аналогичным образом. Для более длинных каналов ход процесса горения различен. При распространении пламени в водородо-воздушной смеси в каналах длиной меньше 0,1 м и диаметром не более 25 мм перехода горения в детонацию не происходит. В водородо-кислородной смеси в каналах длиной более 0,1 м, наблюдается резкая смена режимов горения – переход к детонации, которая возникает за волной сжатия перед фронтом горения.

Отметим, что частотный спектр акустических возмущений, излучаемых ускоряющимся фронтом пламени в водородо-воздушной смеси в осесимметричном канале постоянного сечения, экспериментально определен в [4].

В [5] изложены результаты экспериментов и численного моделирования влияния звуковых волн на процесс горения водородо-воздушной и водородо-кислородной смесей в цилиндрической камере сгорания. При расчетах очаг пламени задавался как область полностью сгоревшей смеси с температурой 2000 К и диаметром порядка 1 мм. Было установлено, что на начальной стадии процесса воспламенения акустические волны ускоряют процесс остывания очага горения, а затем приводят к более быстрому нарастанию температуры и развитию неустойчивости фронта пламени. Картина падения и роста максимальной температуры в очаге возгорания слабо зависит от частоты волны. В то же время при расширении площади, охваченной пламенем, такая зависимость имеет место. Волны с большей частотой приводят к более быстрому расширению очага возгорания. В случае бедных смесей наблюдается существенно более сильное влияние акустических волн на развитие процесса горения. В частности, возможно дробление пламени и возникновение локальных очагов горения.

**Возможность тушения пламени акустическим полем.** Обширный материал, посвященный результатам исследования влияния низкочастотных звуковых волн на пламя, содержится в [6]. В экспериментах звук от громкоговорителя с помощью модульного коллиматора, представляющего собой трубу из нержавеющей стали длиной 155 см и диаметром 46 см, направлялся на пламя, находящееся на расстоянии 15 см от коллиматора. Датчики колебательной скорости и звукового давления располагались на расстоянии 5 см от горелки. Коллиматор обеспечивал звуковую волну с практически плоским волновым фронтом и направлял ее на пламя. Исследуя воздействие на 15 сантиметровое метановое пламя звуковых волн с частотами в интервале 35–150 Гц и звуковым давлением от 0,2 Па до 112 Па авторы [6] нашли, что максимум подавления пламени достигается при частоте  $\nu \approx 60$  Гц. Помимо этого, ими было показано, что для гашения пламени более важно достижение определенного порога скорости акустических колебаний, чем определенная частота или акустическое давление. Пороговая скорость гашения (колебательная скорость, при которой достигается гашение) является также функцией стабильности пламени. При использовании газообразного топлива стабильность пламени зависит от скорости потока и, следовательно, от числа Рейнольдса выходящей струи топлива.

Авторы [6] утверждают, что доминирующим фактором, влияющим на горение, является локальная скорость воздуха, проникающего в пламя. Можно достигнуть пороговой скорости гашения при больших частотах, если акустическое давление является достаточным. На рис. 3 представлен профиль гашения малого метанового пламени горелки диаметром 1,6 мм. Данные представляют пороговые значения усредненных значений звукового давления и колебательной скорости частиц воздуха вблизи пламени при гашении.

Из рисунка видно, что при гашении минимум давления наблюдается при частоте 60 Гц, что практически совпадает с одной из резонансных мод комнаты, в которой проводили эксперименты. Следует отметить, что при увеличении частоты для гашения пламени необходимо более высокое акустическое давление. При этом наблюдалось уменьшение колебательной скорости частиц воздуха, минимальное значение которой  $\nu \approx 0,5$  м/с. В условиях резонанса ( $\nu \approx 60$  Гц) тушащее значение колебательной скорости достигается при небольшом значении звукового давления и выходной мощности динамика, в то время как на других частотах для достижения такого значения колебательной скорости необходимы значительно большие величины звукового давления и выходной мощности.

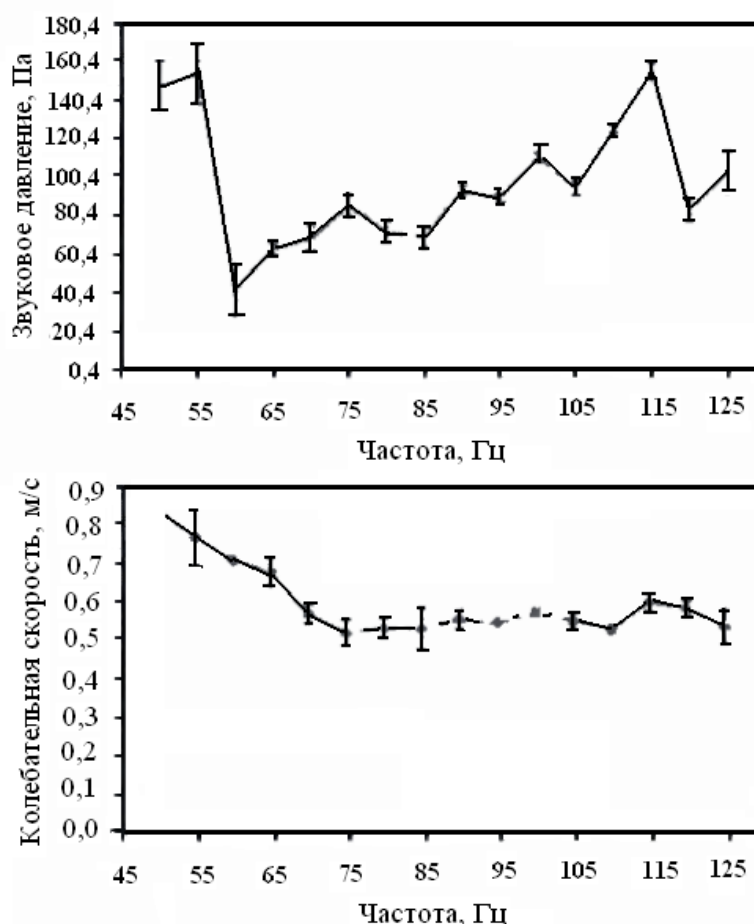


Рисунок 3 – Профиль акустического гашения малого метанового пламени

На рис. 4 представлены пороговые значения колебательной скорости при гашении пламени акустическими волнами с частотой 75 Гц в зависимости от скорости топлива, поступающего в метановую горелку. Пламя переходит из ламинарного режима горения в турбулентный при скорости потока 18,1 м/с. когда значение числа Рейнольдса  $Re \approx 2000$ .

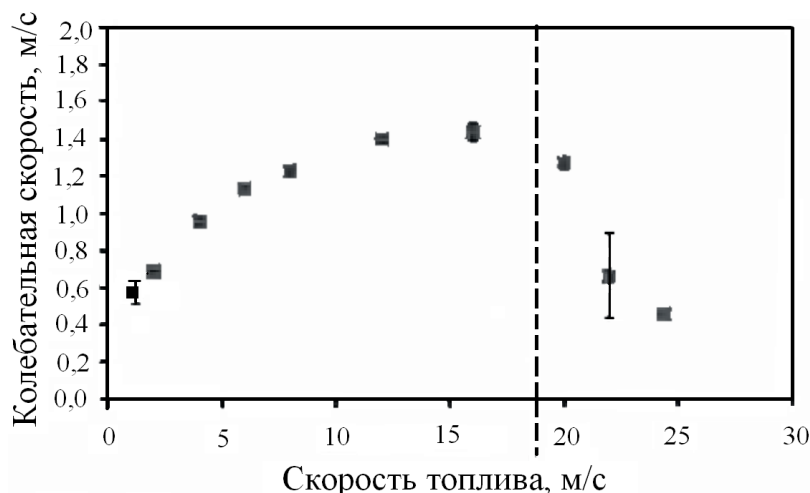


Рисунок 4 – Зависимость порогового значения акустической скорости от скорости топлива

При ламинарном горении наблюдается увеличение колебательной скорости, необходимой для гашения, при увеличении скорости топлива. Когда скорость топлива превышает 18,1 м/с, пламя становится турбулентным, а колебательная скорость, необходимая для тушения, быстро падает. Это наблюдается при разных частотах, подтверждая гипотезу о том, что на гашение пламени влияет как акустическая скорость, так и стабильность пламени.

При увеличении площади горения сложно добиться гашения при использовании одного источника звука, поскольку колебательная скорость частиц воздуха быстро падает при удалении от коллиматора. Эта скорость может быть увеличена путем увеличения мощности громкоговорителя. Однако это приводит к искажению звукового сигнала, который становится нерегулярным и немонотонным. Нужно иметь несколько громкоговорителей, причем их акустические поля должны перекрываться в области горения. Помимо этого, тушение эффективно при частотах звуковых колебаний, совпадающих с резонансными частотами колебаний воздуха в помещении.

Эксперименты показали, что акустическое давление, необходимое для тушения, в большей степени зависит от вида топлива, нежели от площади пламени. Результаты экспериментов представлены на рис. 5.

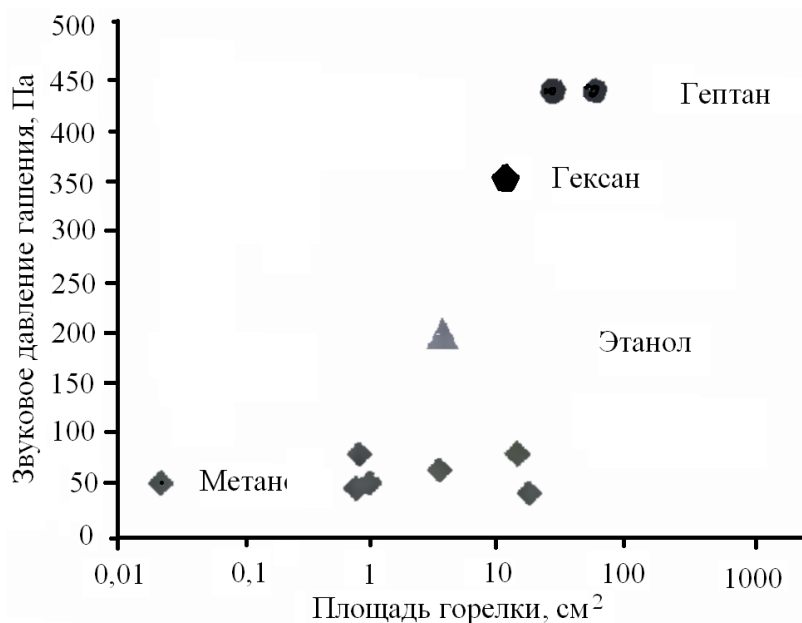


Рисунок 5 – Зависимость акустического давления от площади горелки при гашении пламени

В работе [7] затрагивается важный вопрос о влиянии силы тяжести на процесс горения. Автор отмечает следующее. При горении в воздухе в поле силы тяжести высокотемпературные газообразные продукты горения вследствие естественной конвекции поднимаются вверх. Образующийся при этом восходящий поток воздуха увлекает за собой вверх газообразные продукты сгорания и тем самым способствует дальнейшему процессу горения. В невесомости, при полете летательного аппарата по инерции, процесс горения протекает иначе. В невесомости не может возникать естественная конвекция, поэтому перемешивание газообразных продуктов горения с воздухом может осуществляться только путем диффузии. При этом, так же как и при горении твердых тел, поступление кислорода в зону горения становится недостаточным, газообразные продукты сгорания обволакивают горящее тело и это приводит к подавлению процесса горения. Автор вспоминает трагический случай с американским кораблем «Апполон-1», когда небольшое возгорание внутри космического корабля на пусковой установке во время предстартовой подготовки мгновенно привело к пожару и катастрофе. Вероятность такой катастрофы практически была бы равна нулю, если бы космический корабль уже находился в полете в состоянии невесомости.

Влияние силы тяжести на процесс горения скрыто за вторичными явлениями и проявляется опосредованно. Поэтому для фундаментальных исследований горения нужно проводить эксперименты в невесомости.

Воздействие звуковых волн на пламя в условиях микрогравитации изучалось в работе [8]. На пламя зажигалки осуществлялось воздействие звуковыми волнами низких частот. Результаты экспериментов представлены на рис. 6.



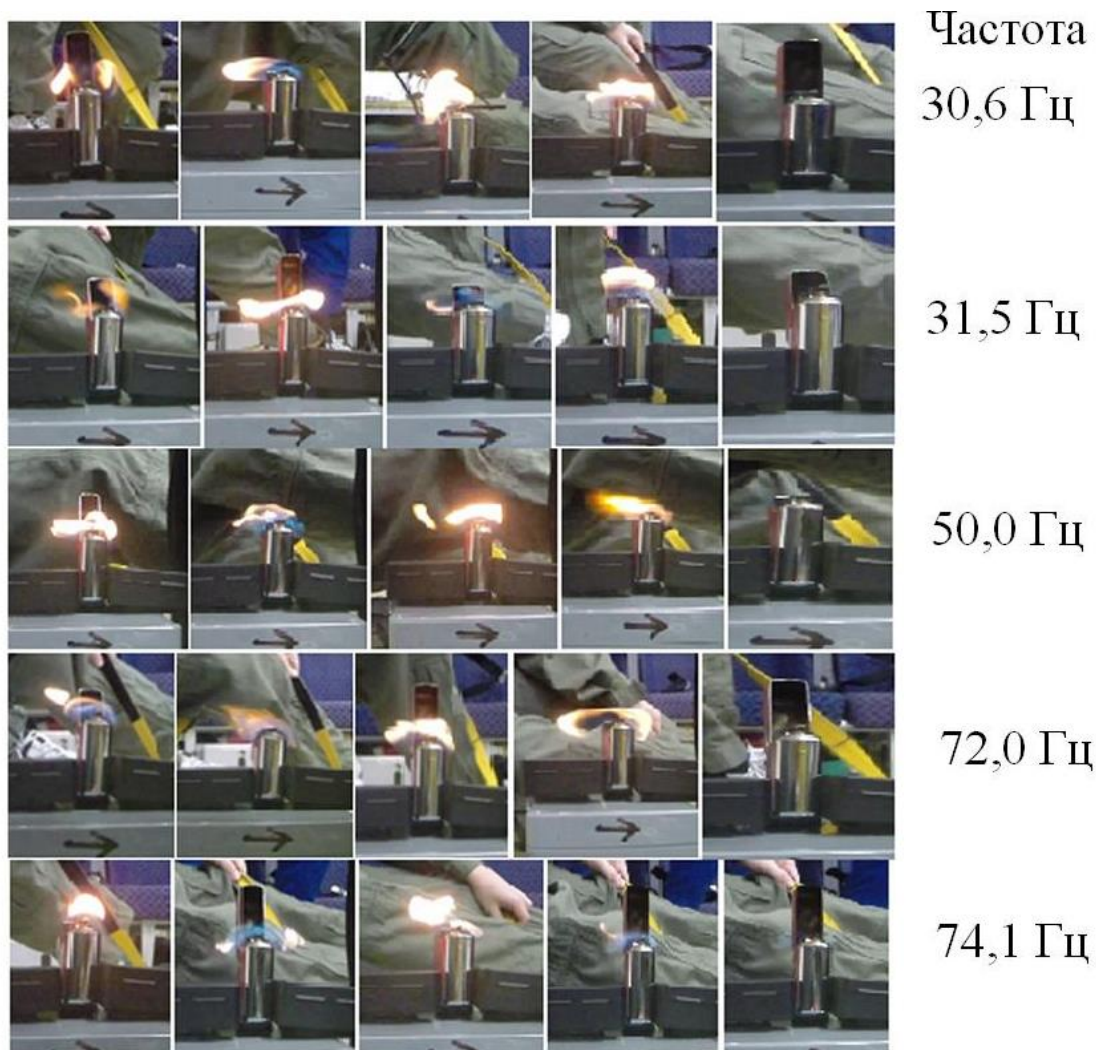


Рисунок 6 – Эффект влияния звуковых волн на пламя в условиях микрогравитации

Из экспериментов следует, что гашение пламени звуком более эффективно в условиях микрогравитации, нежели в условиях нормальной гравитации. В частности, гашение достигается за меньшее время. Гашение звуком может быть эффективным методом тушения возгораний в условиях невесомости.

Результаты теоретических исследований физики взаимодействия акустических волн с пламенем, а также результаты компьютерного моделирования протекающих при этом процессов, можно найти, в частности, в работах [9], [10] и цитируемой в них литературе. Обсуждение этих вопросов выходит за рамки данной публикации.

**Заключение.** Анализ опубликованных работ показывает возможность применения акустических волн для управления режимом горения с целью повышения эффективности использования топлива и уменьшения выброса загрязняющих веществ. Несмотря на многообразие физических и химических процессов, протекающих при горении, эффективность использования топлива и концентрация поллютантов в продуктах сгорания определяются, главным образом, скоростью перемешивания топлива и воздуха. Современный уровень знаний в этой области вполне позволяет приступить к экспериментальным и теоретическим исследованиям для решения данной проблемы с целью разработки инженерных методов расчета акустических систем регулирования режима горения конкретных тепловых устройств. Перспективность таких исследований обусловлена тем, что для управления режимом горения требуется небольшая энергия акустического излучения, которая по оценкам заметно меньше увеличения энергии, достигаемой в результате изменения режима горения. В то же время, следует отметить, что вследствие многообразия протекающих при горении процессов, оптимальные условия для максимального сгорания топлива и минимальной концентрации загрязнений, скорее всего, реализуются при разных режимах горения.

Проведенные исследования продемонстрировали также возможность тушения возгораний посредством акустического воздействия. Однако механизм тушения остается неопределенным, что говорит о необходимости значительного объема теоретических и экспериментальных исследований. В частности, можно отметить важность экспериментальных исследований по тушению поверхностного горения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гейдон, А.Г. Пламя, его структура, излучение и температура / А.Г. Гейдон, Х.Г. Вольфгард. – М., 1959. – 333 с.
2. Кривокорытов, М.С. Влияние акустических колебаний на диффузионное горение метана / М.С. Кривокорытов, В.В. Голуб, В.В. Володин // Письма в ЖТФ, 2012. – Т. 38, вып. 10. – С. 57–63.
3. Голуб, В.В. Воздействие акустического поля на развитие пламени и переход в детонацию / В.В. Голуб, Д.И. Бакланов, С.В. Головастов, К.В. Иванов, М.Ф. Иванов, А.Д. Киверин, В.В. Володин // ТВТ, 2010. – Т. 48. – № 6. – С. 901–907.
4. Володин, В.В. Влияние отраженных акустических возмущений на ускорение фронта пламени / В.В. Володин, А.Е. Коробов, С.В. Головастов, В.В. Голуб // Письма в ЖТФ, 2015. – Т. 41, вып. 21. – С. 60–65.
5. Голуб, В.В. Влияние акустических волн на зону воспламенения и переход горения в детонацию: эксперимент и расчет / В.В. Голуб, М.Ф. Иванов, В.В. Володин, Д.В. Благодатских, С.В. Головастов // ТВТ, 2009. – Т. 47. – № 2. – С. 315–317.
6. DARPA: Instant flame suppression. – Harvard University, 2008. – P. 1-23.
7. Кумагаи, С. Горение / С. Кумагаи. – М.: Химия, 1979. – 256 с.
8. Beisner, E. Acoustic flame suppression mechanics in a microgravity environment / E. Beisner, N.D. Wiggins, K.-B. Yue, V. Rosales, J. Penny, J. Lockridge, R. Page, A. Smith, L. Guerrero // Microgravity Sci. Technol. – 2015. – V. 27. – P. 141–144.
9. Tanabe, M. Numerical simulation on the flame propagation in acoustic fields. / M Tanabe, T. Yano, T. Kuwahara // Proceeding of the Combustion Institute, 2002. – V. 29. – P. 1817-1824.
10. Lieuwen, T. Analysis of acoustic wave interactions with turbulent premixed flames / T. Lieuwen // JASMA, 2008. – V. 23. – P. 371-375.



## ON THE INFLUENCE OF ACOUSTIC WAVES ON COMBUSTION PROCESSES

**Alexander Il'ushonok**, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor

**Igor Goncharenko**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor

**Nikolay Leshenyuk**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor

**Vladimir Kuleshov**, Candidate of Physics and Mathematics Sciences

**Vladimir Tereshenkov**, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

*Purpose.* The purpose of the paper is to present the brief survey of the state of research in the field of interaction of flame with acoustic waves.

*Findings.* The acoustic waves could be effectively utilized for controlling the combustion process for the purpose of increasing the fuel using efficiency and decreasing the pollutant emission.

*Application field of research.* The obtained results could be used for the development of alternative methods of fire control and extinguishing.

*Conclusions.* The presented researches showed the possibility of fire extinguishing by the use of acoustical action. However, the mechanism of extinguishing remains uncertain. Therefore, the substantial extent of theoretical and experimental researches is still needed. In particular, one can note the importance of experimental research on extinguishing of surface combustion.

*Keywords:* sound waves, acoustic fields, flame, combustion process, extinguishing of combustion.

(The date of submitting: 15 jule 2016)

## REFERENCES

1. Geidon A.G., Wolfguard H.G. *Plamia, ego struktura, izluchenie i temperature* [Flame, its structure, radiation and temperature]. Moscow, 1959. 333 p. (rus)
2. Krivorytov M.S., Golub V.V., Volodin V.V. Vlianie akusticheskikh kolebaniy na difuzionnoe gorenje metaya [Influence of acoustic vibrations on diffusion combustion of methane]. *Pisma v ZhTF*, 2012. Vol. 38, No. 10. Pp. 57-63. (rus)
3. Golub V.V., Baklanov D.I., Golovastov S.V., Ivanov K.V., Ivanov M.F., Kaverin A.D., Volodin V.V. Vozdejstvie akusticheskogo polya na razvitie plameni i perehod v detonaciju [Impact of acoustic field on flame extension and conversion to detonation] *TVT*, 2010. Vol. 48. No. 6. Pp. 901-907. (rus)
4. Volodin V.V., Korobov A.E., Golovastov S.V., Golub V.V. Vlianie otrazhennykh akusticheskikh vozmuschenij na uskorenie fronta plameni [Influence of reflected acoustic perturbations on acceleration of flame front]. *Pisma v ZhTF*, 2015. Vol. 41. No. 21. Pp.60-65. (rus)
5. Golub V.V., Ivanov M.F., Volodin V.V., Blagodatskih D.V., Golovastov S.V. Vlianie akusticheskikh voln na zonu vosplamenenia i perehod gorenja v detonaciju [Influence of acoustic waves on ignition zone and conversion the combustion into detonation: experiment and calculations]. *TVT*, 2009. Vol. 47. No. 2. Pp. 315-317. (rus)
6. DARPA: Instant flame suppression. *Harvard University*, 2008. Pp. 1-23.
7. Kungai S. *Gorenje* [Combustion]. Moscow: Chemistry, 1979. 256 p. (rus)
8. Beisner E., Wiggins N.D., Yue K.-B., Rosales V., Penny J., Lockridge J., Page R., Smith A., Guerrero L. Acoustic flame suppression mechanics in a microgravity environment. *Microgravity Sci. Technol.* 2015. Vol.27. Pp. 141-144.
9. Tanabe M., Yano T., Kuwahara T. Numerical simulation on the flame propagation in acoustic fields. *Proceeding of the Combustion Institute*, 2002. Vol. 29. Pp. 1817-1824.
10. Lieuwen T. Analysis of acoustic wave interactions with turbulent premixed flames. *JASMA*, 2008. Vol. 23. Pp. 371-375.