

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛАМИНАРНОГО КИНЕТИЧЕСКОГО ПОЮЩЕГО ПЛАМЕНИ

В. В. Афанасьев, С. А. Абруков, Н. И. Кидин*, А. К. Кузьмин

*Чувашский государственный университет, 428015 Чебоксары
Институт проблем механики РАН, 117527 Москва

Экспериментально изучены концентрационные и температурные интервалы возбуждения и молчания звуковых колебаний ламинарного кинетического поющего пламени при изменении концентрации, расхода и начальной температуры пропановоздушной смеси. Измерением интенсивности распределения переменной составляющей излучения радикала СН на длине волны $4315 \text{ \AA}$ и разности фаз между колебанием давления и скорости тепловыделения по высоте пламени показано, что основная часть переменного тепловыделения для поддержания и усиления колебаний давления в соответствии с критерием Рэлея происходит в результате периодического изменения площади поверхности пламени на вершине его конуса. Установлена прямая связь между появлением концентрационных и температурных интервалов возбуждения и молчания звуковых колебаний с изменением разности фаз.

Изучением автоколебательного режима горения поющих пламен занимаются многие исследователи уже не один десяток лет. Однако до сих пор нет единого мнения о механизме возникновения и поддержания вибрационного режима горения. Особенно мало сведений о кинетическом поющем пламени, хотя оно является удобной моделью, позволяющей исключить влияние таких факторов, как распыление, испарение и перемешивание компонентов топлива, и определить роль собственно горения в механизме изучаемого процесса.

В [1] впервые показано, что при изменении концентрации топлива в пропановоздушной смеси от 3 до 15 % наблюдаются концентрационные области самовозбуждения колебаний давления (до 3–4 зон) и молчания кинетического поющего пламени. Причем общее количество и местоположение концентрационных интервалов возбуждения зависят от длины трубы-резонатора, а ширина концентрационных интервалов и интенсивность излучения акустических колебаний — от добротности трубы. Отмечается также влияние начальной температуры смеси на концентрационные области возбуждения, но не приводится физический механизм наблюдаемых явлений.

Цель данной работы — изучение влияния состава и начальной температуры горючей смеси на концентрационные области возбуждения колебаний давления и молчания кинетического поющего пламени. Эксперименты проводились с трубами диаметром 36 мм и длиной от 1,2 до 1,8 м. Горючая смесь готовилась подачей пропана и воздуха в необходимой пропорции из баллонов через понижающие редукторы и игольчатые краны в смеситель. Концентрация и расход смеси контролировались интерферометром Рэлея и ротаметрами. Горелки с внутренним диаметром 6,5 мм и длиной 60 см из меди или нержавеющей стали вводили на глубину $1/4$ длины трубы-резонатора от нижнего ее конца.

Смесь подогревали нихромовой проволокой, намотанной с внешней стороны горелки с отступлением на 30 мм от верхнего ее среза и подключенной к стабилизированному источнику питания. Температуру горючей смеси измеряли термопарой, заделанной заподлицо с внутренней стороны горелки.

Акустическое давление регистрировали у нижнего конца трубы-резонатора конденсаторным микрофоном через узкополосный фильтр шумомером фирмы «Роботрон».

Оптическую визуализацию проводили на теневом приборе Теплера методом щели и нити. В ходе экспериментов измеряли уровень акустического давления, скорость тепловыделения и разность фаз между ними в зависимости от концентрации, расхода и температуры горючей смеси. Скорость тепловыделения, согласно [2], отождествляли с интенсивностью излучения промежуточного радикала СН на длине волны $4315 \text{ \AA}$ и регистрировали фотоумножителем через интерференционный светофильтр. Разность фаз между акустическим давлением и переменной составляющей скорости тепловыделения измеряли фазометром.

Косвенно методику [2] подтверждает синфазное изменение излучения радикала СН и площади поверхности пламени, рассчитанной по кинокадрам с одновременной регистрацией на одной пленке теплереограммы и осциллограммы излучения. При этом предполагается, что нормальная скорость горения не меняется из-за малой интенсивности звуковых колебаний в условиях эксперимента.

На рис. 1 показаны зависимости уровня интегрального (по объему пламени) оптического излучения I , уровня акустического давления p и сдвига фаз φ между колебаниями давления и излучения от концентрации пропана в смеси. Вертикальными линиями на рисунке показаны границы концентрационных областей возбуждения пламени. Заштрихованные области соответствуют гистерезису по составу горючей смеси. Под гистерезисом понимается несовпадение уровня акустического давления при прямом и обратном ходе изменения состава горючей смеси, т. е. при варьировании состава от бедных до богатых смесей и обратно, концентрационные пределы возбуждения и исчезновения вибрационного режима горения не совпадают. Причина гистерезиса не исследовалась.

Из рис. 1 видно, что кривые распределения акустического давления и интенсивности оптического излучения имеют куполообразный вид в зависимости от состава смеси, а сдвиг фаз во всех зонах разнохарактерный и по величине меньше 90° . Причем колебания давления опережают по фазе колебания излучения, и формально во всех трех областях существующие колебания давления могут усиливаться за счет периодического тепловыделения в результате переменного изменения площади поверхности пламени

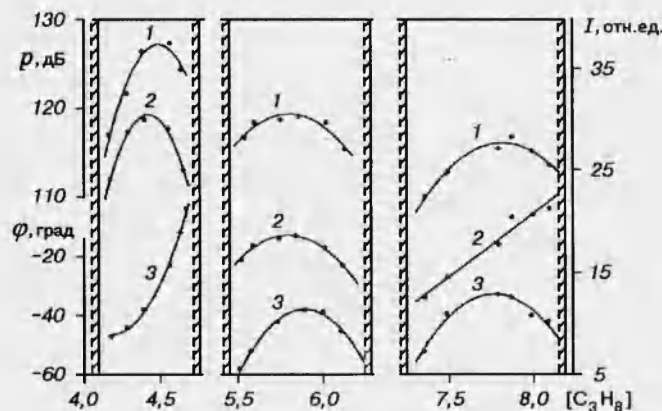


Рис. 1. Изменение переменной составляющей оптического излучения (1), колебаний давления (2), и разности фаз (3) от концентрации пропана в воздухе при расходе горючей смеси $30 \text{ см}^3/\text{с}$.

в соответствии с критерием Рэлея. Однако, если придерживаться строго критерия Рэлея, то максимум колебаний давления должен соответствовать нулевому сдвигу фаз, что не согласуется с результатами экспериментов.

С целью объяснения такого противоречивого явления поставлены специальные эксперименты по определению φ между колебаниями давления и оптического излучения на длине волны $4315 \text{ \AA}$ с определенных участков пламени по его высоте. Для этого перед входным зрачком фотоумножителя устанавливали горизонтальную щель шириной 1 мм , которую перемещали с шагом 2 мм по изображению пламени, формируемому системой из двух линз в натуральный размер. Опыты показывают, что действительно происходит изменение φ по высоте пламени от 100 до 1140° . Причем наибольший сдвиг фаз наблюдается в третьей области возбуждения, а наименьший — в первой. Следует отметить, что точность определения φ с возрастанием порядкового номера области возбуждения уменьшается из-за влияния излучения сажистых частиц с увеличением концентрации пропана в смеси. Это влияние в большей степени сказывается на вершине конуса пламени. Поэтому сдвиг фаз в основном определяли для первой и реже для второй областей возбуждения.

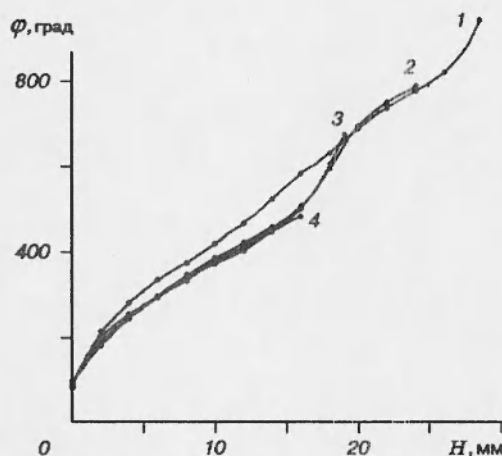


Рис. 2. Распределение разности фаз между колебаниями скорости тепловыделения и акустического давления во второй (1) и первой (2–4) концентрационных областях возбуждения.

$[\text{C}_3\text{H}_8]$, %: 1 — 5,8, 2 — 4,6, 3 — 4,4, 4 — 4,2.

На рис. 2 представлены распределения сдвига фаз по высоте пламени для первой и второй областей возбуждения. Видно, что в первой области возбуждения наблюдаются две зоны, а во второй — три, в которых $\varphi \approx 0$, т. е. в этих зонах фазовые соотношения благоприятны для усиления колебаний давления в соответствии с критерием Рэлея. При этом в обеих областях возбуждения для среднего положения вершины колеблющегося конуса пламени $\varphi \approx 0$. Сдвиг фаз во второй области больше на 2π . Из приведенных результатов можно сделать вывод, что в общем случае для любой области возбуждения на вершине конуса пламени для смесей, развивающих максимальные колебания

давления, $\varphi = (n + 1) 2\pi$, где n — порядковый номер области возбуждения. Это соотношение показывает, что число благоприятных зон для усиления существующих колебаний давления по высоте пламени превышает порядковый номер концентрационной области возбуждения на единицу.

Чтобы ответить на вопрос, почему при изменении состава или температуры горючей смеси появляются области возбуждения и молчания, необходимо выявить участок пламени, который внесет основной вклад в поддержание и усиление существующих колебаний давления. Особый интерес представляет изменение фазовых соотношений на этом участке пламени при варьировании состава и расхода горючей смеси. С этой целью двумя способами определялась зависимость переменной составляющей скорости тепловыделения по высоте пламени. Фиксировалось распределение переменной составляющей интенсивности излучения радикала CN по высоте

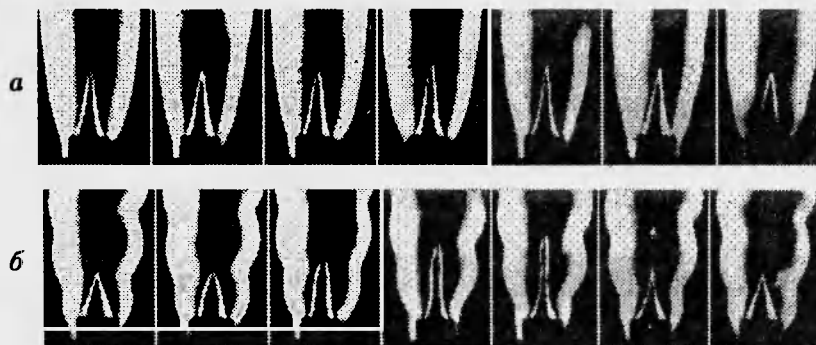


Рис. 3. Фрагменты теневого фильма возбуждения кинетического поющего пламени для первой концентрационной области:

a — начало колебаний; *b* — развитые колебания.

пламени и находилась зависимость переменной составляющей площади поверхности пламени от ее высоты. Последняя рассчитывалась по кинокадрам (рис. 3) как разность между максимальным и минимальным значениями площади боковой поверхности усеченного конуса высотой 2 мм за один период колебаний. При этом в силу малой интенсивности стоячих звуковых колебаний в трубе-резонаторе колебания тепловыделения однозначно связывали с гидродинамическим влиянием звуковых колебаний на форму поверхности пламени.

Результаты экспериментов

(рис. 4) показали, что колебания интенсивности излучения и распределение переменной составляющей площади поверхности пламени по высоте пламени имеют колоколообразный вид с максимумом, координата которого совпадает со средним положением вершины колеблющегося пламени. Причем ΔS и I на вершине конуса почти в 5 раз больше, чем у основания. Из зависимостей $\varphi(H)$ и $\Delta S(H)$ следует, что для рассматриваемого состава смеси имеются две благоприятные зоны (на рис. 4 заштрихованы), в которых переменное тепловыделение в соответствии с критерием Рэлея подпитывает термоакустические колебания давления в трубе-резонаторе. Площадь второй зоны, прилегающей к вершине конуса пламени, по абсолютной величине больше площади первой в ~ 3 раза, откуда можно сделать вывод о том, что более 70 % переменного тепловыделения наблюдается на вершине конуса пламени.

Можно также оценить переменное тепловыделение по абсолютной величине. Для этого общее тепловыделение в результате сгорания определенного состава и расхода пропановоздушной смеси необходимо умножить на безразмерный параметр, равный отношению переменной составляющей к общей площади поверхности пламени. Для условий данных опытов на вершине конуса пламени переменное тепловыделение составляет при-

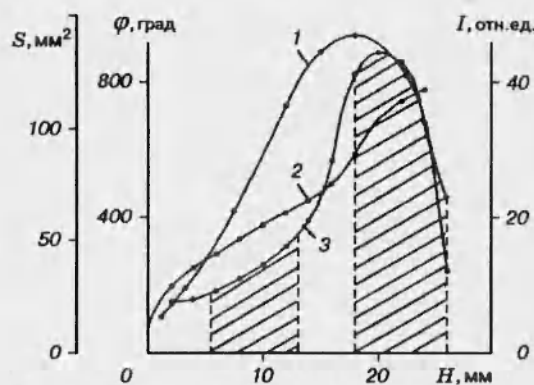


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения (I), разности фаз (φ) и переменной составляющей площади поверхности пламени (ΔS) от высоты пламени для смеси с 4,4 % C_3H_8 при расходе $30 \text{ см}^3/\text{с}$.

мерно 20 Дж. Если же принять во внимание то обстоятельство, что на вершине конуса бунзеновской горелки нормальная скорость горения из-за повышения температуры свежей смеси, согласно [3], больше в несколько раз по сравнению с другими участками пламени, то можно предположить, что переменное тепловыделение на вершине конуса пламени может достигать 80 %. Причем, как было показано на рис. 2, вблизи этой координаты $\varphi \approx 0$. Поэтому можно предположить, что уменьшение уровня колебаний давления вплоть до полного исчезновения звука при увеличении или уменьшении концентрации пропана в смеси, т. е. появление концентрационных интервалов возбуждения и молчания, связано с изменением фазовых соотношений между колебаниями давления и скорости тепловыделения на вершине конуса пламени.

Результаты экспериментов для первой области возбуждения представлены на рис. 2. Видно, что при варьировании состава пропана в сторону бедных (кривая 4) или богатых (кривая 2) смесей, действительно, происходит изменение сдвига фаз, т. е. условия возбуждения колебаний давления ухудшаются и колебания давления прекращаются на концентрационных границах возбуждения.

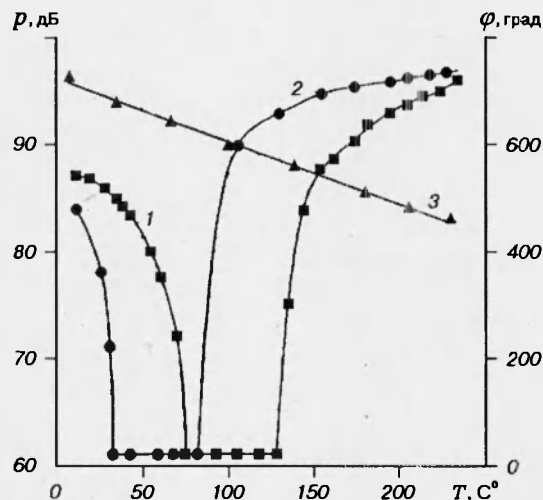


Рис. 5. Зависимость уровня акустического давления (1, 2) и разности фаз на вершине конуса пламени (3) от температуры горючей смеси:

1 — нагревание; 2 — охлаждение.

Аналогичные процессы наблюдаются и при предварительном подогреве горючей смеси. Результаты экспериментов по измерению уровня акустического давления на первой гармонике при нагревании, которое достигалось увеличением напряжения на нихромовой проволоке, и охлаждении до комнатной температуры горючей смеси, а также разности фаз между колебаниями давления и излучения на вершине конуса пламени представлены на рис. 5. Нагревание горючей смеси сопровождается как подавлением, так и усилением вибрационного режима горения в зависимости от ее температуры. Причем, как и в случае изменения концентрации пропана

в смеси, кривые охлаждения и нагревания не совпадают, т. е. наблюдается гистерезис. Наличие температурных интервалов возбуждения и молчания также можно объяснить изменением φ , т. е. в соответствии с критерием Рэлея температурные интервалы возбуждения находятся в фазе, а молчания — в противофазе.

Отличие состоит в том, что при повышении температуры горючей смеси уменьшается величина φ между колебаниями давления и скорости тепловыделения, а при увеличении содержания пропана в смеси возрастает.

При прочих равных условиях местоположение концентрационных интервалов возбуждения и молчания практически не меняется в диапазоне расходов горючей смеси, в котором реализуется ламинарный режим горения поющего пламени. Иными словами, существует минимальный расход, начиная с которого возможен вибрационный режим горения. Сверху же

расход может ограничиваться турбулизацией или срывом пламени с горелки. Для объяснения наблюдаемых явлений измеряли φ по высоте пламени для различных расходов горючей смеси при неизменном ее составе. Результаты экспериментов представлены на рис. 6 в виде $\varphi (H/H_0)$, где H — текущая высота пламени, H_0 — среднее положение вершины колеблющегося пламени. Видно, что в пределах ошибок эксперимента увеличение расхода горючей смеси в 2 раза не приводит к какому-либо изменению φ между колебаниями давления и скорости тепловыделения.

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что в зависимости от соотношения пропана в горючей смеси имеются концентрационные области возбуждения и молчания кинетического поющего пламени. Показано, что основное переменное тепловыделение для поддержания и усиления существующих колебаний давления в соответствии с критерием Рэля происходит в результате периодического колебания площади поверхности пламени на вершине конуса пламени. Установлена прямая связь между появлением областей возбуждения и молчания при варьировании состава или температуры горючей смеси с изменением разности фаз между колебаниями давления и скорости тепловыделения. Показано, что местоположение концентрационных областей возбуждения не зависит от расхода горючей смеси.

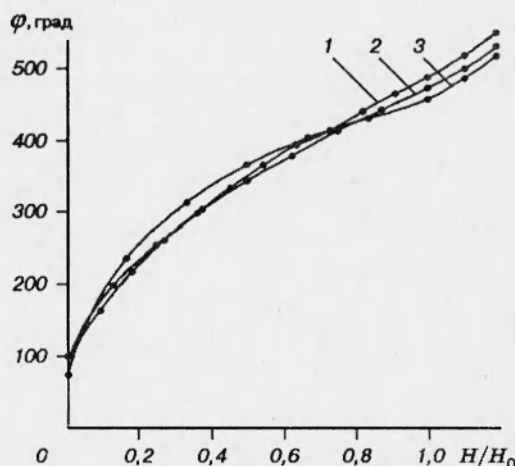


Рис. 6. Зависимость разности фаз от безразмерного параметра по высоте пламени для различных расходов, $\text{см}^3/\text{с}$: 1 — 20, 2 — 30, 3 — 40.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В. В., Кузьмин А. К., Аbruков С. А. Влияние состава смеси и температуры на возбуждение поющего пламени // Горение и электродинамические явления. Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1990. С. 14–19.
2. Сильвестров В. М., Скляр В. А., Фурлетов В. И. Исследование возможности применения метода регистрации излучения радикалов CH и C к определению скорости тепловыделения и состава смеси в камере сгорания // Горение газов и натуральных топлив: Матер. VI Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черногловка: Объед. ин-т хим. физики АН СССР, 1980. С. 114–118.
3. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1957.

Поступила в редакцию 10/X 1994 г.,
в окончательном варианте — 27/XII 1994 г.