

ное устройство экраны. Однако для практических оценок можно с достаточной точностью пользоваться приведенными данными.

По косвенным оценкам скорости выгорания частиц угля и температурной кривой для топки можно по формуле (7) и кривым рис. 7 найти оптимальные параметры (α , T) сжигания угля в первой ступени, позволяющие снизить содержание топливных окислов азота на порядок. При этом температура и избыток окислителя выбираются с некоторым запасом с учетом реальных характеристик процесса. Точность выполненных расчетов тем выше, чем меньшая часть топлива остается в твердой фазе, т. е. чем выше температура и больше время пребывания. При дожигании продуктов неполного сжигания топлива во второй ступени скорость образования окислов азота будет определяться практически только термической моделью и рассчитывается относительно просто. При этом желательно понизить температуру сжигания во второй ступени за счет промежуточного отвода тепла, уменьшить время пребывания продуктов сгорания в топке второй ступени в связи с высокой реакционной способностью продуктов неполного сжигания, поступающих из первой ступени с высокой начальной температурой, и резко снизить температуру продуктов сгорания после второй ступени, например, введением конвективных поверхностей нагрева.

Поступила в редакцию 2/VII 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. Окисление азота при горении. М.: АН СССР, 1947.
2. Н. В. Лавров, Э. Н. Розенфельд, Т. П. Хаустович. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. М.: Металлургия, 1981.
3. G. De Soete. Riv. combust., 1975, 29, 2, 35.
4. D. W. Blair, O. L. Wendt, W. Bartok. 16-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1976.
5. B. W. Gerhold, C. P. Fenimore, P. K. Dederick. 17-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1978.
6. D. P. Rees, L. D. Smoot, P. O. Hedman. 18-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1981.
7. S. L. Chen, M. P. Heap, D. W. Pershing e. a. Fuel, 1982, 61, 12, 1218.
8. T. Takagi, T. Tatsumi, M. Ogasawara. Comb. Flame, 1979, 35, 17.
9. Y. H. Song, D. W. Blair, V. J. Siminski e. a. 18-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1981.
10. C. P. Fenimore. 17-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1978.
11. W. E. Kaskan, M. P. Nadler. J. Chem. Phys., 1973, 56, 2220.
12. C. J. Fisher. Comb. Flame, 1977, 30, 143.
13. Дж. Коул. Методы возмущений в прикладной математике. М.: Мир, 1972.

О ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ГОРЕНИИ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В. В. Афанасьев, Н. И. Кидин

(Чебоксары)

Известно, что резонансное горение возникает в результате взаимодействия процесса горения с динамическими процессами в резонансной системе [1, 2]. При этом происходит периодическое изменение объема пламени, а следовательно, и энергии, что позволяет поддерживать и усиливать акустические колебания.

В постоянном электрическом поле такая резонансная система должна генерировать (кроме постоянной составляющей тока [3]) и переменную вследствие периодического изменения проводимости между электродами. Основная причина колебания проводимости, по-видимому, состоит

в периодических изменениях объема плазмы пламени. Возможен также механизм зависимости электропроводности от колебания звукового давления [4].

В данной работе экспериментально исследовалось пламя, помещенное в постоянное электрическое поле между двумя электродами. Опыты проводились в двух характерных режимах: 1) вибрационное распространение пламени в канале с изолированными электродами и 2) стационарное поющее пламя. Цель экспериментов — регистрация переменной составляющей тока между электродами.

Вибрационное распространение пламени

Эксперименты проводили в поперечном электрическом поле на установке, описанной в [3]. В качестве горючего использовали пропановоздушную смесь, приготовленную динамическим способом.

На осциллограммах рис. 1 зарегистрированы сигналы тока смещения при напряжении на электродах 15 кВ (верхняя кривая) и акустического давления. Рис. 1, а получен при первом прохождении пламени в канале; рис. 1, б — при повторном, осуществленном после заполнения канала горючей смесью с закороченной внешней цепью, т. е. в остаточном электрическом поле [3]. Видно, что постоянная составляющая тока смещения существует все время распространения пламени в электрическом поле, а переменная, совпадающая по частоте с колебаниями акустического давления, как и следовало ожидать, — только при вибрационном распространении. Причем постоянная составляющая тока смещения в стехиометрических смесях по абсолютной величине почти в 2 раза меньше переменной. Из рассмотрения осциллограмм следует также, что ток смещения в остаточном поле имеет значение, которое не отличается по порядку величины от тока во внешнем поле, но противоположен по знаку.

Осциллограмма на рис. 1, в записана при вибрационном распространении пламени в стехиометрической смеси в отсутствие электрического поля. Тем не менее на кривой тока отчетливо видны колебания, совпадающие по частоте с колебаниями акустического давления. Аналогичные явления наблюдались в работе [5]. При введении в пламя двойного зонда без источника внешней ЭДС на нагрузочном сопротивлении, включенном между его электродами, в [5] фиксировалось появление переменного напряжения. Вопросам изучения и практического использования этого явления посвящена также работа [6].

Появление тока в отсутствие внешнего электрического поля объясняется тем, что происходит разделение зарядов в собственном электрическом поле пламени [7, 8], а его периодические изменения, очевидно, вызваны колебаниями проводимости между электродами в результате изменения объема плазмы при вибрационном распространении пламени.

На рис. 2 представлены зависимости величины переменного тока смещения от состава смеси. Видно, что их характер одинаков при наличии и в отсутствие внешнего поля. Ток максимален для составов, близких к стехиометрии, что связано, видимо, с большей скоростью ионизации и распространения пламени.

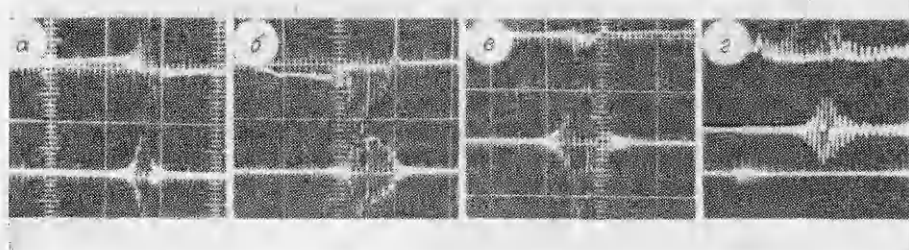


Рис. 1. Осциллограммы токов смещения во внешней цепи.

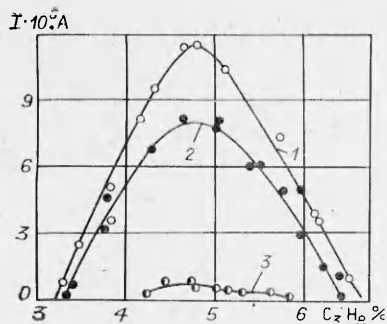


Рис. 2. Зависимость переменного тока смещения от состава смеси.

1 — внешнее и остаточное поля по 15 кВ; 2 — внешнее и остаточное поля по 10 кВ; 3 — внешнее поле отсутствует.

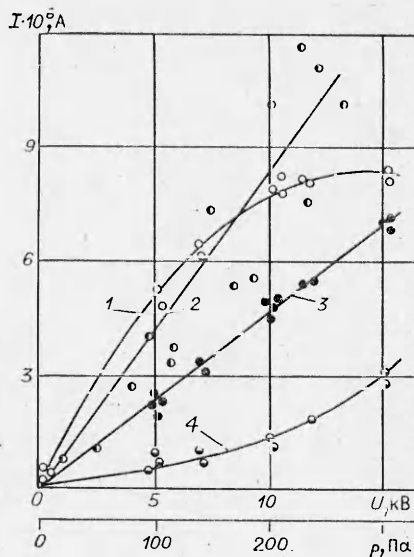


Рис. 3. Зависимость переменного тока от акустического давления (2) и приложенного внешнего напряжения (1, 3, 4).

1 — 4,6% C_2H_2 + воздух; 2 — внешнее напряжение 15 кВ; 3 — 3,8% C_2H_2 + воздух; 4 — 3,3% C_2H_2 + воздух.

Графическая зависимость величины переменного тока смещения от амплитуды акустического давления и приложенного внешнего напряжения представлена на рис. 3. Кривая 1 для смеси, близкой к стехиометрии, показывает, что при увеличении напряжения значение I вначале растет до некоторого максимума, а затем начинает убывать. Это объясняется тем, что в смесях, близких к стехиометрии, в электрическом поле наблюдается подавление вибрационного режима горения за счет уменьшения высоты волны на поверхности пламени (впервые описано в [10]) — эффект, который возрастает с увеличением U [9—11]. Ослабление вибрационного режима горения сопровождается уменьшением амплитуды колебаний объема пламени, что, в свою очередь, приводит к снижению переменной составляющей тока смещения между электродами.

Кривая 4 получена для смеси, близкой к пределу вибрационного распространения пламени (эффект одинаков как для нижнего, так и для верхнего предела). Известно, что в смесях, близких к предельным, наблюдается вибрационное распространение пламени с характерной гладкой поверхностью (рис. 4, а). В электрическом поле вытянутость пламени увеличивается (см. рис. 4, б). Это, в свою очередь, приводит к росту амплитуды колебаний объема пламени и тока, что подтверждается ходом кривой 4.

Линия 3 получена для смеси, в которой увеличение вытянутости пламени компенсируется уменьшением высоты волны на ее поверхности,

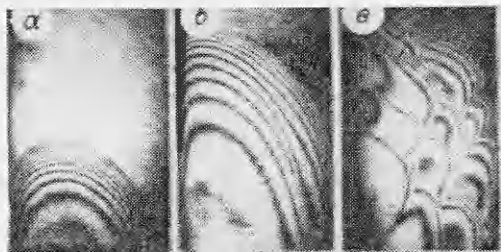


Рис. 4. Кадры интерференционного и теневого фильмов вибрационного распространения пламени типа I и II в канале.

а, б — тип I, 3,4% C_2H_2 + воздух, $U = 0$ (а) и 5 кВ (б); в — тип II, 4,8% C_2H_2 + воздух, $U = 5$ кВ; г — тип II, 4,6% C_2H_2 + воздух, $U = 10$ кВ (за период колебаний).



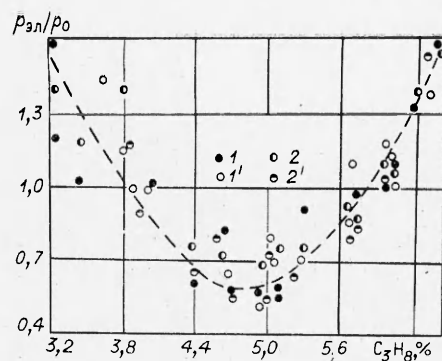


Рис. 5. Зависимость безразмерного акустического давления от состава смеси.
 $U = 10$ (1) и 15 кВ (2); 1', 2' — остаточное поле.

т. е. внешнее электрическое поле практически не влияет на вибрационное распространение пламени, а следовательно — и на объем пламени. Поэтому кривая 3 имеет линейный характер.

Графическая зависимость изменения величины переменного тока смещения от амплитуды акустического давления (см. рис. 3, 2), как и следовало ожидать, линейна, так как колебания проводимости между электродами и акустического давления падаются в прямой зависимости от изменения объема пламени. Учитывая влияние электрического поля на объем пламени и то, что вибрационное горение — это автоколебательный процесс с обратной связью акустического типа, сопровождающийся периодическим изменением объема пламени, тепловыделения и давления [1, 2, 12], можно сделать заключение о влиянии электрического поля и на амплитуду акустических колебаний.

Эксперименты по влиянию электрического поля на амплитуду акустического давления показали, что во внешнем поле и в остаточном наблюдается одинаковый эффект влияния поля. Результаты обработки осциллограмм представлены на рис. 5 в виде зависимости отношения амплитуд акустического давления в электрическом поле и без поля ($p_{эл}/p_0$) от состава смеси. Из графика следует, что в смесях, близких к предельным, происходит увеличение амплитуды акустического давления до 200%, которое согласуется с поведением переменного тока смещения в предельных смесях (см. рис. 3, 4), а в смесях, близких к стехиометрии, — уменьшение акустического давления на 40—50%, что также согласуется с кривой 1 на рис. 3. Смеси, содержащие около 3,8 и 5,8% C_3H_8 , влияния на вибрационное распространение со стороны поля практически не испытывают (см. рис. 3, 3).

Явление усиления и ослабления акустических колебаний объясняется тем, что, с одной стороны, в электрическом поле понижаются высота волн на поверхности пламени и объем пламени (см. рис. 4, в, г), что обуславливает уменьшение переменной составляющей тепловыделения. С другой стороны, электрическое поле увеличивает площадь поверхности пламени за счет изменения вытянутости (см. рис. 4, б), вследствие чего переменная составляющая тепловыделения возрастает. В смесях, близких предельным, в электрическом поле уменьшение поверхности пламени, вызванное подавлением волнообразования на ней, происходит в меньшей степени, чем увеличение ее за счет изменения вытянутости, поэтому акустические колебания усиливаются. В стехиометрических же смесях роста вытянутости пламени недостаточно для того, чтобы скомпенсировать уменьшение площади поверхности пламени, обусловленное сглаживанием волнообразования, что приводит к ослаблению акустических колебаний.

Поющее пламя

Экспериментальная установка представляет собой вертикальную стеклянную трубу-резонатор диаметром 40 мм и длиной $L = 1,2$ м, в которую вводилась на глубину $1/4L$ газоподводящая трубка-горелка из

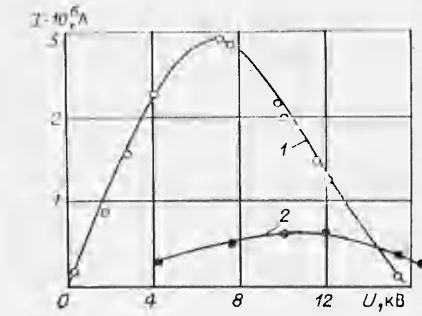
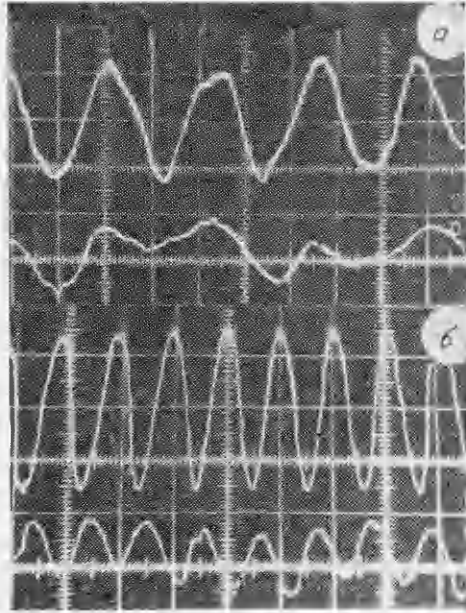


Рис. 7. Влияние внешнего напряжения на величину переменного тока.

1 — основной тон; 2 — первая гармоника.

Рис. 6. Осциллограммы переменного тока и акустического давления, генерируемых поющим пламенем, в постоянном электрическом поле.

меди с внутренним диаметром 8 и длиной 100 мм. Продольное электрическое поле создавалось между горелкой и кольцом из пержавеющей стали с внутренним диаметром 36 мм. В качестве горючего использовалась пропано-воздушная смесь, состав которой контролировался интерферометром Рэля, а расход — реометром.

На рис. 6 представлены осциллограммы переменного тока во внешней цепи (нижняя кривая) и акустического давления при наложении напряжения на электроды 10 кВ. Осциллограмма на рис. 6, а получена при расходе горючей смеси 24 см³/с и соответствует основному тону резонатора (200 Гц); на рис. 6, б — при расходе 46 см³/с и соответствует первой гармонике (400 Гц). Видно, что колебания тока и акустического давления происходят с одной и той же частотой. Причем экспериментальное значение удовлетворительно согласуется с расчетным, полученным по известной формуле [1]

$$f = \frac{1}{l_1/a_1} + \frac{1}{l_2/a_2},$$

где l_1 и l_2 — длины холодной и горячей части резонатора; a_1 и a_2 — скорости звука в холодной и горячей части резонатора.

Результаты обработки осциллограмм представлены на рис. 7. С увеличением напряжения переменный ток вначале растет до максимума, а затем убывает практически до нуля. Это объясняется тем, что наряду с разделением зарядов в зоне горения в электрическом поле уменьшается также амплитуда колебаний объема пламени (плазмы) вследствие стабилизации пламени и подавляются акустические колебания вплоть до полного исчезновения с увеличением приложенного напряжения. Из рис. 7 также видно, что амплитудное значение тока на основном тоне в несколько раз больше, чем на первой гармонике. Это свидетельствует о том, что на низких частотах на колебания проводимости между электродами в основном влияют периодические изменения объема плазмы пламени (рис. 8), а не электропроводность от звукового давления. Последнее подтверждается определением акустического давления на основном тоне и на первой гармонике (измерительный микрофон шумомера располагался на расстоянии 1 м от открытого конца резонатора). Уровень звукового давления на основном тоне составляет ~70 дБ, а на первой гармонике — 90 дБ. Следует также отметить, что максимальная амплитуда акустического давления на первой гармонике наступает с

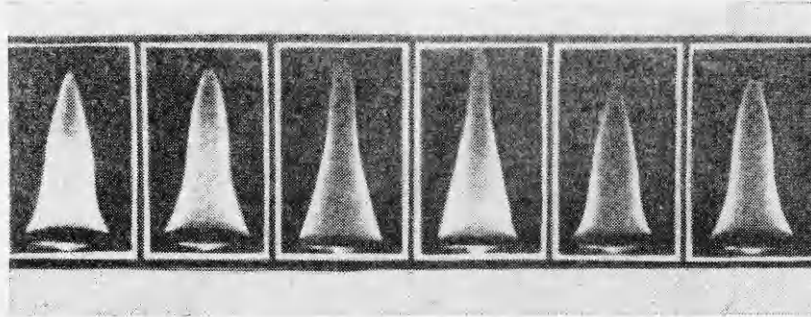


Рис. 8. Прямая съемка поющего пламени за период колебаний для основного тона.

увеличением расхода горючей смеси в 2 раза по сравнению с расходом на основном тоне.

Эксперименты показали, что частота акустических колебаний существенно зависит от расхода горючей смеси (скорости потока). Периодические колебания появляются при некотором расходе горючей смеси, частота которых плавно возрастает с увеличением расхода, но не пропорциональна ему. Затем в некотором интервале колебания исчезают и далее с повышением расхода возникают вновь, но с частотой, в 2 раза большей частоты основного тона, увеличивающейся с расходом. Похожие явления наблюдались в экспериментах с аэродинамической трубой [13].

Выводы

Экспериментально подтверждено наличие переменного тока при вибрационном распространении пламени в постоянном электрическом поле. Вибрационное распространение пламени сопровождается перестройкой поля заряженными частицами, вызывает ток смещения во внешней цепи и появление остаточного поля. Показано, что при вибрационном распространении пламени в электрическом поле с изолированными электродами может наблюдаться как увеличение, так и ослабление акустических колебаний в зависимости от содержания горючей смеси. В случае поющего пламени также происходит генерация переменного тока из-за периодического изменения проводимости в межэлектродном пространстве в электрическом поле. Установлено, что частота колебаний поющего пламени существенно зависит от расхода горючей смеси.

Поступила в редакцию 19/XII 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Раушенбах. Вибрационное горение. М.: Физматгиз, 1961.
2. Нестационарное распространение пламени/Под ред. Дж. Маркштейна. М.: Мир, 1968.
3. С. А. Аbruков, В. В. Афанасьев, В. П. Борисов и др. ФГВ, 1981, 17, 3, 31.
4. H. Bickert, V. Garbis, H. Krause. Chem. Phys. Lett., 1976, 40, 3, 433.
5. V. S. Marsden. 4-th Symp. (Intern.) on Combustion (Combustion and Detonation Waves), Baltimore, 1953.
6. Б. С. Фалков и др. ФГВ, 1971, 7, 3, 383.
7. Н. И. Кидин. Канд. дис. МФТИ, 1975.
8. И. И. Кидин, В. Б. Либрович.— В кн.: Физика горения и методы ее исследования/Под ред. С. А. Аbruкова. Чебоксары, 1976.
9. Н. А. Медведев, В. В. Афанасьев, С. А. Аbruков. Там же.
10. Г. Д. Саламандра.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
11. С. А. Аbruков, В. В. Афанасьев, В. П. Борисов.— В кн.: Физика горения и методы ее исследования/Под ред. С. А. Аbruкова. Чебоксары, 1981.
12. И. А. Чучкалов, С. А. Аbruков. Вибрационное распространение пламени. Чебоксары, 1975.
13. Г. А. Бендриков, С. П. Стрелков, Э. П. Шубин. ЖТФ, 1941, 11, 13—14, 1194.