

$\bar{t} = t/\sqrt[3]{C}$; $r = R/r_0$ (t — абсолютное время прихода фронта воздушной ударной волны в данную точку).

Данные таблицы свидетельствуют о том, что материал полупространства, а также положение заряда относительно свободной поверхности заметно влияют на распределение энергии контактного взрыва. Эти данные могут быть использованы в соответствующих формулах, при определении параметров волн, распространяющихся как в нижнем полупространстве, так и в воздухе.

В заключение автор благодарит С. С. Григоряна за сделанные в процессе выполнения работы ценные замечания, а В. Ф. Кашлева за помощь при проведении опытов.

Поступила в редакцию
11/VII 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Алексеенко. ПМТФ, 1963, 5.
2. М. А. Садовский. Физика взрыва. Изд-во АН СССР, 1952, 1.

УДК 541.126

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА «ПОЮЩЕЕ» ПЛАМЯ МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ ШЛИРЕН-СЪЕМКИ

С. А. Аbruков, В. В. Куржунов, В. Н. Мездриков
(Казань)

В работе [1] было исследовано влияние электрического поля на режим вибрационного горения газа. Установлено, что наложение достаточно сильного поля приводит к гашению акустических колебаний, возникающих в трубе-резонаторе, когда в ней находится «поющее» пламя пропана. Представляет интерес выяснить, почему нарушается работа колебательной системы при внешнем воздействии непосредственно на зону горения, без изменения конструкции трубы и соответствующих краевых условий. Наиболее подходящим методом экспериментального решения поставленной задачи является скоростная тепловизионная киносъемка исследуемого процесса.

Экспериментальная установка, использованная в данной работе, описана ранее [1]. Она включала в себя топливо-акустическую систему, позволяющую получать «поющее» пламя, источник высокого напряжения, звуковой генератор, осциллограф и другую контрольно-измерительную аппаратуру. Исследовались кинетические и диффузионные пламена пропана. Переменная составляющая давления в акустической системе фиксировалась пьезоэлектрическим датчиком. В обсуждаемых ниже экспериментах применялись плоские латунные электроды $12 \times 120 \text{ мм}^2$ на расстоянии 1,8 см друг от друга. Они находились внутри стеклянной трубы-резонатора, длина которой 173 см, внутренний диаметр 24 мм. Вертикальная труба-резонатор с «поющим» пламенем помещалась в рабочее пространство теневого прибора Теплера. Исследования проводились с горизонтальным и вертикальным ножом Фуко в фокальной плоскости прибора. Частота кадров при скоростной съемке достигала 1000 в секунду. Для просвечивания исследуемой неоднородности часть поверхности трубы-резонатора без нарушения герметизации была заменена двумя плоскопараллельными оптическими стеклами $2,4 \times 6 \text{ см}^2$. Расстояние от нижнего среза трубы до начала просвечиваемой секции 23,5 см. Стеклянная горелка устанавливалась на 26,5 см выше нижнего среза резонатора. Контрольные эксперименты показали, что замена части поверхности трубы плоскопараллельными стеклами не приводит к существенному сдвигу интервалов неустойчивости. Частота колебаний, возбуждаемых пламенем, была в пределах 98—101 гц.

Эксперименты позволили установить следующее. При наложении сильного электрического поля, когда происходит гашение акустических колебаний, тепловизионное изображение вибрирующего пламени, как диффузионного, так и кинетического — ушаряется, т. е. наложение поля приводит к расширению зоны градиентов. Фотографии, полученные с вертикальным ножом, отчетливо отражают процесс постепенного отклонения пламени к отрицательному электроду, усиливающегося по мере возрастания напряженности. Гашение колебаний не сопровождается раскачиванием фронта между электродами.

Шлирен-съемка показала, что когда в системе отсутствуют акустические колебания, фронт пламени устойчив, без признаков изменения формы и площади поверхно-

сти (рис. 1, а). При вибрационном горении появляются периодические изменения площади поверхности. На тепловоскопической картине процесса хорошо различимы волны (рис. 1, б, 2, а). Они зарождаются у основания горелки и бегут вверх по изображению.

Таким образом, шпирен-фотографии «поющего» пламени могут служить индикатором присутствия акустических колебаний. При наложении на вибрирующий фронт относительно слабого поля амплитуда указанных волн несколько возрастает. В то же время датчик отмечает увеличение амплитуд акустических колебаний. Этот эффект нельзя считать неустойчивым, переходным режимом, поскольку он не пропадает с течением времени, если напряженность электрического поля остается неизменной. Увеличение напряженности приводит к довольно быстрому уменьшению амплитуды описанных волн и, наконец, к прекращению волнообразования (при разности потенциалов около 3 кВ). Аналогичная картина фиксируется и датчиком: амплитуда акустических волн быстро падает, пока они не исчезнут совсем. Такое неоднозначное влияние поля на режим горения является, по-видимому, типичным. Оно характерно не только для вибрационного горения, но и для срыва пламени [2, 3]. Вначале поле снижает пределы устойчивости, а начиная с некоторого напряжения, устойчивость пламени возрастает.

По мере увеличения напряженности, когда начинается процесс исчезновения волн на тепловоскопическом изображении, происходит турбулизация диффузионного пламени, особенно хорошо заметная на снимках с горизонтальным ножом (рис. 2, б, отрицательный электрод



Рис. 1. Шпирен-фотографии «поющего» пламени, полученные с вертикальным ножом Фуко.

справа). Турбулизации кинетического пламени в настоящих экспериментах обнаружено не было. На фотографиях, полученных перед срывом диффузионного факела полем, непосредственно перед затуханием пламени, хорошо видна сильно развитая турбулентность зоны горения (рис. 2, в). Было выяснено, что тепловые неоднородности после затухания пламени рассасываются за $0,05\text{--}0,06\text{ сек}$. При достаточно сильных полях, когда наступает гашение акустических колебаний, турбулизация прекращается, пламя вытягивается к отрицательному электроду, волны на тепловоскопическом изображении отсутствуют, у основания горелки со стороны отрицательного электрода возникает вихрь, вблизи положительного электрода существуют тепловые неоднородности, поднимающиеся от горелки вверх по электроду (рис. 1, в). Иногда эти неоднородности имеют периодический характер.

Поведение кинетического пламени в поле качественно не отличается от поведения диффузионного пламени. В наших экспериментах, так же как в работе [2], не было зафиксировано отклонение внутреннего конуса. В противоположность этому Калькоут [4] пришел к выводу, что внутренний конус хорошо отклоняется к отрицательному электроду. По-видимому, поведение внутреннего конуса должно зависеть от его высоты, состава смеси и степени ионизации в пламени. Внутренность проводящего пламени эффективно экранируется от внешних электростатических полей [5]. Напряженность поля, а следовательно, и силовое воздействие внутри такого пламени невелики, и при малой высоте внутреннего конуса его отклонение может оказаться незначительным.

Полученные данные позволяют высказать некоторые суждения о механизме гашения электрическим полем исследованного случая вибрационного горения. Известно, что оно является автоколебательным процессом, характеризующимся теми или иными механизмами обратной связи [6]. Описанные эксперименты, так же как и ранее проведенные исследования [7], позволяют заключить, что обратной связью в рассматриваемом случае является периодическое изменение площади поверхности



Рис. 2. Шпирен-фотографии «поющего» пламени, полученные с горизонтальным ножом Фуко.

пламени. При наложении поля под воздействием электрических сил это изменение прекращается. Периодическое возмущение скорости тепловыделения вследствие изменения площади поверхности фронта значительно ослабляется, и как следствие этого прекращается вибрационный режим.

Диффузионное горение пропана во внешнем поле сопровождается турбулизацией зоны горения. Единый фронт пламени отсутствует. Моли холодной смеси перемешиваются с молями продуктов сгорания. Это вносит дополнительный вклад в уменьшение периодических возмущений скорости тепловыделения.

Однако рассмотренный механизм гашения колебаний будет эффективным только при определенных концентрациях ионов, когда поле способно оказывать макроскопическое воздействие на пламя. Например, вибрационное горение CO — воздушных смесей, организованное в тех же условиях, что и горение пропана, не может быть подавлено наложением внешнего поля. Было установлено, что увеличение напряженности до 10 kv/cm не отражается на поведении «поющего» пламени CO и не приводит к изменению амплитуд акустических колебаний. Напротив, диффузионный факел ацетилена чувствителен к электрическому полю.

Таким образом, при определенной степени ионизации пламени электрическое поле существенно влияет на форму и структуру зоны горения. Периодическое изменение поверхности фронта, сопровождающее вибрационный режим, прекращается, одновременно наблюдается турбулизация диффузионного факела. Как следствие этого нарушается обратная связь в автоколебательной системе и происходит гашение вибрационного режима горения.

Поступила в редакцию
6/VII 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Аbruков, В. В. Куржунов, В. Н. Мездриков. ФГВ, 1966, 2, 68.
2. А. Е. Потапенко, П. П. Костенко. Инж.-физ. ж., 1962, 5, 10, 73.
3. H. Colcote, R. Peas. Industrial and Engineering chem., 1951, 43, 12.
4. H. Colcote. 3-th Symposium on Combustion. Williams and Wilkins, 1949.
5. H. Dimmock. Magnetohydrodynamics, Evans. Northwest Univ. Press., 1962, 159.
6. В. В. Раушенбах. Вибрационное горение. М., Физматгиз, 1961.
7. С. К. Асланов, В. В. Куржунов. Инж.-физ. ж., 1964, 7, 8, 124.

УДК 536.461+541.126

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ПЛОСКОГО ГОМОГЕННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ФАКЕЛА

И. Л. Кузнецов, Ю. В. Игнатенко
(Новосибирск)

В пламенах однородных углеводородо-воздушных смесей светимость продуктов сгорания пренебрежимо мала по сравнению со светимостью зоны реакции. В любом случае, пользуясь различием спектров излучения, можно регистрировать только излучение, характерное для зоны реакции. Тогда для плоского турбулентного факела, если размер зоны реакции мал по сравнению с размерами факела (поверхностная или микрообъемная модель горения), светимость некоторой точки факела будет пропорциональна плотности вероятности присутствия ламинарного фронта (поверхностная модель) или зоны реакции (микрообъемная модель).

Следовательно, располагая нормально экспонированными негативами пламен, а также осредненными линиями тока в зоне горения, можно, при известной зависимости плотности почернения негатива от светимости объекта, построить распределение плотности вероятности присутствия реакции вдоль линии тока $p = p(L)$ (рис. 1). Осредненные линии тока можно сравнительно легко получить путем трассирования. Заметим, что зависимость плотности почернения негатива от светимости объекта следует получать, используя в качестве источника света подлежащее изучению пламя.

Физическая полнота выгорания вдоль линии тока будет определяться выражением

$$P(L) = \int_0^L p(L) dL. \quad (1)$$