

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕЯЩИХСЯ
ДИФФУЗИОННЫХ ПЛАМЕН УГЛЕВОДОРОДОВ
МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ**

*П. А. Теснер,
А. М. Цыбулевский, Т. Д. Снегирева*
(Москва)

Газовые диффузионные пламена образуются при горении струн топлива, вытекающей в неподвижный воздух или соосной поток окислителя. Ламинарные диффузионные пламена такого типа могут служить для исследования процессов образования и газификации дисперсного углерода [1—3]. Однако структура светящейся зоны пламени исследована недостаточно, и многие вопросы, связанные с образованием сажи и возникновением свечения, остаются невыясненными. В настоящей работе предпринята попытка применить метод высокоскоростной киносъемки для качественного изучения сажеобразования в диффузионном пламени, а также для измерения скоростей газа в пламени.

Съемку производили кинокамерой СКС-1М на негативную 16 мм пленку чувствительностью 180 единиц по ГОСТу. Скорость съемки 2800 кадр/сек. Отметка времени осуществлялась импульсным двухполупериодным источником света, питаемым током высокой частоты.

ИЗУЧЕНИЕ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ

Прямое скоростное фотографирование стационарных состояний пламен дает обычную проекцию факела. Некоторые новые результаты были получены при съемке нестационарных состояний: воспламенения, гашения, появления светимости.

В опытах фотографировались ранее достаточно изученные диффузионные пламена смесей ацетилен — азот, ацетилен — водород и диффузионное пламя природного газа, образующиеся на цилиндрических горелках диаметром 1 и 3 мм [1, 3, 4].

Воспламенение струй природного газа и ацетилен-азотной смеси. На рис. 1 показана кинограмма воспламенения струи природного газа. Рядом с горелкой диаметром 3 мм параллельно ее оси установлена масштабная линейка с номером опыта. В нижней части кадра видно освещенное устье горелки.

Первое, что фиксирует пленка, — появление светящегося грибовидного облака сажи, постепенно удаляющегося от устья горелки. Лишь после того как облако достигает нормальной высоты пламени (245 мм), появляется нижняя часть пламени с установившейся структурой: внешний светящийся конус с темной зоной неразложившегося топлива по оси. В этот момент облако отрывается от вершины пламени и сгорает.

Подобная кинограмма была получена и для воспламенения смеси ацетилен — азот.

Своеобразная картина, полученная на пленке, незаметна для невооруженного глаза. Это довольно просто объясняется. При истечении свободной невоспламененной струи топлива происходит молекулярно-диффузионное смешение топлива с воздухом. В результате образуется богатая топливо-воздушная смесь, которая взрывается при воспламенении. Взрыв приводит к образованию сажи в виде облака, которое скрывает структуру возникновения зон в неустановившемся процессе. Время протекания взрыва мало, и первоначально образовавшееся сажевое облако сгорает за время порядка нескольких миллисекунд.

Гашение пламени смеси ацетилен — азот (31,2% ацетилена). В опытах использовалась горелка диаметром 1 мм. Кинограмма съемки затухания пламени показана на рис. 2.



Рис. 1.

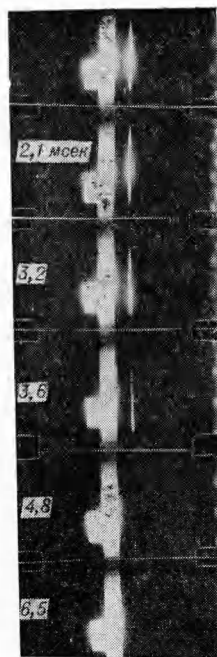


Рис. 2.

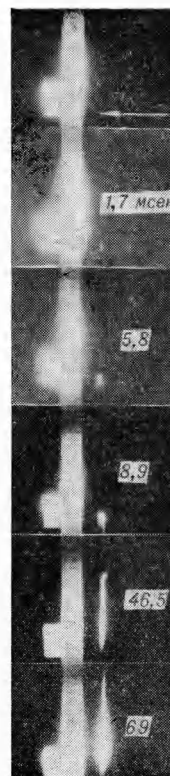


Рис. 3.

Пламя гасилось при быстром прекращении подачи ацетилена. Кинограмма показывает, что после прекращения подачи ацетилена пламя вначале почти не сокращается по длине, однако в верхней части происходит сужение пламени по направлению к оси, где остается лишь узкая светящаяся полоска по оси пламени. В дальнейшем исчезает и эта полоска, пламя резко сокращается по длине, но не садится на горелку. Исчезновение свечения происходит на расстоянии около 5 мм от устья горелки. Такая картина соответствует принятому представлению о са-

жеообразовании в диффузионном пламени. Образование сажи происходит исключительно в нижней части пламени, а в верхней она газифицируется [3]. Известно также, что сажеобразование протекает в основном в тонкой зоне, непосредственно прилегающей к фронту горения [5].

При прекращении подачи ацетилена уменьшается количество образующейся сажи и начинает сокращаться верхняя зона, где она догорает. Образование сажи прекращается в той нижней зоне, где она в основном образуется при стационарном процессе.

Воспламенение ацетилен-водородных струй. В отличие от пламен смесей ацетилен — азот и пламени природного газа воспламенение пламени ацетилен-водородной смеси, как показывает кинограмма на рис. 3, происходит без взрывного разложения ацетилена. По-видимому, из-за значительного различия в скоростях диффузии происходит диффузионное разделение компонентов исходной смеси так, что более богатые водородом смеси располагаются по периферии струи. При зажигании происходит прежде всего воспламенение водород-кислородной смеси и образование фронта диффузионного горения водорода, а затем уже термический пиролиз ацетилена с образованием дисперсного углерода. Таким образом, киносъемка воспламенения ацетилен-водородной струи позволяет наблюдать формирование характерных зон светящегося диффузионного пламени.

На кинограмме (см. рис. 3) отчетливо видно, что образование сажи начинается на расстоянии 15 мм от устья горелки (диаметра 1 мм) в двух точках у внешней поверхности струи (показаны стрелкой). Пространство между точками заполнено еще неразложившимся ацетиленом. В первый момент светятся лишь эти своеобразные центры образования сажи, увеличивающиеся в диаметре. Через 2,5 мсек после появления эти центры начинают распространяться в высоту пламени, образуя элементы нормальной стационарной структуры пламени. Через 6 мсек внешние цилиндрические полоски смыкаются по оси пламени и лишь через 69 мсек после появления свечения пламя достигает своей нормальной высоты.

Образование сажи начинается на некотором расстоянии от устья горелки. Задержка в появлении свечения может быть вызвана двумя причинами: гидродинамической и кинетической. Поскольку ацетилен-водородная смесь значительно легче воздуха, должно происходить дополнительное ускорение смеси за счет архимедовой силы и возникновение микротурбулизаций у устья горелки. Попадание кислорода при этом, естественно, исключает возможность образования сажи.

Появление сажи не у самого основания пламени, а лишь на значительном расстоянии от устья горелки можно объяснить также наличием индукционного периода образования сажи из ацетилена [6].

Подача ацетилена в диффузионное пламя водорода. Диффузионное пламя водорода абсолютно бесцветно, так что при фотографировании его на пленке не остается какого-либо отображения. Можно было ожидать, что путем скоростной киносъемки пламени водорода при быстрой подаче в него ацетилена удаст-

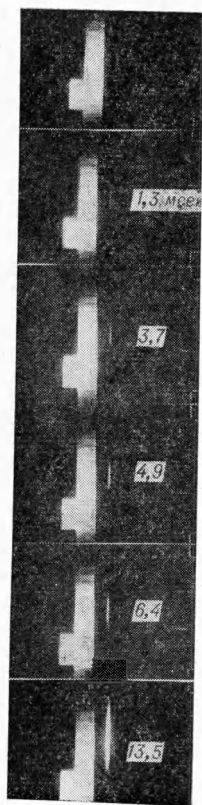


Рис. 4.

ся наблюдать возникновение зон образования сажи в диффузионном пламени.

В опыте свечение появляется в верхней части кадра (рис. 5), что соответствует вершущке стационарного диффузионного пламени смеси ацетилен — водород. Тонкая светящаяся полоска по оси пламени постепенно расширяется и удлиняется, распространяясь по направлению к горелке (диаметр горелки 1 мм). Лишь через 13,5 мсек после появления свечения вверху нижней части пламени образуется характерное раздвоение светящегося конуса с темной зоной в центре и светящимися образующими по периферии. Через 15 мсек пламя достигает своей нормальной длины.

Таким образом, при подаче ацетилена в диффузионное пламя водорода наблюдается картина, обратная той, которая видна при фотографировании воспламенения ацетилен-водородной струи. Сажа образуется в верхней части пламени, несмотря на то, что ацетилен поступает в пламя снизу и его концентрация в верхней части меньше, чем в нижней.

Образование сажи в рассматриваемом случае происходит при разложении ацетилена в уже сформировавшемся водородном пламени, и появление ее в верхней части этого пламени не объясняется, по-видимому, тем, что вершущка пламени имеет максимальную температуру.

ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ГАЗА В ПЛАМЕНАХ

В литературе не описаны какие-либо методы изменения или расчета линейных скоростей газа в диффузионных пламенах [7]. Совершенно отсутствуют также данные об этой важной характеристике. Можно лишь указать на работу [8], где методом стробоскопического освещения тразирующих частиц измерены профили скоростей в близких к диффузионным богатым бунзеновских пламенах смесей городского газа с воздухом и бутано-воздушных смесей. Оказалось, что скорости газа на больших расстояниях от устья горелки приблизительно равны скоростям в горелке.

Линейные скорости саже-газового потока в диффузионных пламенах измеряли путем высокоскоростной киносъемки быстрых последовательных рассечений пламен, которые осуществлялись при помощи пневматического рассекателя с частотой 150 рассечений в минуту. Для того чтобы свести возмущения пламени к минимуму, на конец рассекателя устанавливали тонкий цилиндрический нож. В зависимости от толщины светящейся зоны пламени диаметр ножа изменялся от 0,5 до 1,5 мм, с тем, чтобы он занимал небольшую часть сечения пламени.

Типичная кинограмма показана на рис. 5. Здесь справа — светящееся пламя, слева — масштабная линейка с номером опыта, размещенная параллельно оси пламени. Нож рассекателя, проходя через пламя, оставляет после себя как бы область разуплотнения, хорошо заметную на негативе. (На первом кадре показана белой стрелкой.) По движению этой области снизу вверх и определяли скорости газа в пламени. Обработка сводилась к определению длины пути, проходимого пометкой, произведенной рассекателем, и подсчету световых отметок. В каждом случае производилось не менее 8 параллельных измерений; расхождение составило не более 10%.

В таблице представлены результаты измерений, а также приведены линейные скорости исходных смесей в горелке. Сопоставление показы-

вает, что скорости в пламенах, верхняя часть которых управляется законами диффузионной модели, приблизительно равны средним скоростям в горелке. Это согласуется с результатами, полученными для богатых бунзеновских пламен [8].

Верхняя часть пламен ацетилен — водород, ацетилен — водяной пар, как было показано ранее [9], не имеет фронта горения, и по ее сечению устанавливается относительно равномерная концентрация кислорода. Кроме того, в пламенах смесей ацетилен — водород вследствие высокой скорости диффузии водорода образуется вторичное пламя водорода, окружающее пламя ацетилена. Расхождение между скоростями в пламени и горелке для пламен смесей ацетилен — водород, ацетилен — водяной пар объясняется этими причинами.

Как видно из таблицы, для пламен смесей ацетилен — азот скорости газа в горелке выше скорости в пламени. Аномальное поведение пламен этих смесей объясняется тем, что струи истекают и горят в среде, аналогичной по гидродинамическим и диффузионным характеристикам. Особенно большое различие, характерное для пламен, образующихся на горелке диаметром 1 мм, связано, очевидно, с сильной кривизной параболы скоростей в узкой трубке и значительным различием между осевыми и средними скоростями.

Интересно, что с повышением содержания сажи скорость саже-газового потока в ацетилен-азотном пламени увеличивается и в пламени с содержанием ацетилена 23% в исходной смеси (почти коптящее пламя) приближается к средней скорости в горелке.

Сравнение линейных скоростей пламен смесей одинакового состава, но горящих в воздухе с различным содержанием кислорода, показывает, что повышение температуры пламен путем



Рис. 5.

Линейные скорости газа в пламени (W_F) и горелке (W_B)

Диаметр горелки, мм	Состав исходной смеси	W_B , м/сек	W_F , м/сек
3	30% C_2H_2 + 70% CO_2	4,06	4,05
	25% C_2H_2 + 37,5% CO_2 + 37,5% N_2	4,70	4,72
	20% C_2H_2 + 30% N_2 + 50% H_2O	4,25	4,36
	25% C_2H_2 + 37,5% CO_2 + 37,5% H_2O	4,70	4,45
	14% C_2H_2 + 86% N_2	5,80	2,60
	20% C_2H_2 + 80% N_2	4,70	3,64
	23% C_2H_2 + 77% N_2	4,10	4,36
	22% C_2H_2 + 78% N_2^*	4,84	3,34
	22% C_2H_2 + 78% N_2^{**}	4,84	3,17
	25% C_2H_2 + 37,5% CO_2 + 37,5% N_2^*	4,70	3,45
	25% C_2H_2 + 37,5% CO_2 + 37,5% N_2^{**}	4,70	3,30
	12% C_2H_2 + 88% H_2	5,65	3,40
	20% C_2H_2 + 80% H_2O	5,35	3,75
1	31,2% C_2H_2 + 68,8% N_2	24,8	9,97
	46% C_2H_2 + 54% N_2	16,9	5,31

* $VO_2 = 5$ см³/сек.

** $VO_2 = 10$ см³/сек.

обогащения кислородом воздуха, в котором происходит горение, приводит к снижению средней скорости газа в пламени, по-видимому, за счет уменьшения количества азота, диффундирующего в пламя из окружающей среды.

*Поступила в редакцию
12/VII 1967*

ЛИТЕРАТУРА

1. P. A. Tesner, T. D. Snegyreva, V. F. Soorovikin. Preprinted for Eleventh Symposium (International) on Combustion.
2. E. R. Place, F. J. Weinberg. Preprinted for Eleventh Symposium on Combustion.
3. А. М. Цыбулевский, П. А. Теснер. ФГВ, 1966, 2.
4. А. М. Цыбулевский. Газовая промышленность, 1966, 12.
5. А. Г. Гейдон, Х. Г. Вольфгард. Пламя. Его структура, излучение и температура. М., Metallurgizdat, 1959.
6. В. Ф. Суровикин, П. А. Теснер. Газовая промышленность, 1965, 5.
7. Физические измерения в газовой динамике и при горении. Под ред. Р. Ладенбурга и др., ИЛ, 1957.
8. D. Troy. Chem. Eng. M. S. Thesis, Univ. Delaware, 1948.
9. П. А. Теснер, А. М. Цыбулевский. ФГВ, 1967, 3, 2.