

6. A. Masek. Comb. Sci. Techn., 1979, 21, 1/2.
7. Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, А. В. Нванов. ФГВ, 1981, 17, 6.
8. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 159.
9. M. Herzberg. Bureau of Mines. RI-8127. Washington, 1976.
10. Ф. А. Вильямс. Теория горения. М.: Наука, 1971.
11. V. Bregeon, A. S. Gordon, F. A. Williams. Comb. Flame, 1978, 33, 1.
12. T. Mutani, F. A. Williams. Comb. Flame, 1980, 39, 2.
13. В. Н. Кривулин, Е. Н. Кудрявцев и др. ФГВ, 1981, 17, 1.
14. А. М. Бадалян, В. С. Бабкин и др. ФГВ, 1981, 17, 3.
15. В. Т. Монахов. Методы исследования пожарной опасности веществ. М.: Химия, 1979.
16. D. J. Parks. Fire Safety J., 1980, 2, 4.
17. В. Н. Кривулин, Е. А. Кудрявцев и др. ФГВ, 1978, 14, 6.
18. В. Н. Кривулин, Л. А. Ловачев и др. ФГВ, 1975, 11, 6.
19. В. С. Бабкин, А. М. Бадалян, В. В. Никулин.— В сб.: Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка, 1977.
20. Э. А. Штессель. ФГВ, 1979, 15, 3.

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗОНА ФРОНТА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАМЕН.

### VII. СТРУКТУРА ФРОНТА ПЛАМЕНИ ГЕКСАНА С АЭРОЗОЛЬНЫМ СПОСОБОМ ВВЕДЕНИЯ ТОПЛИВА

*В. К. Манжос, Б. Я. Колесников, А. К. Мурзагалиев  
Г. И. Ксандопуло*

(Алма-Ата)

В большинстве исследований структуры фронта пламен горючую смесь получают введением топлива в виде газа или пара. Для легких углеводородов этот способ единственный. При изучении пламен тяжелых углеводородов удобнее использовать метод впрыска (как в двигателе внутреннего сгорания) либо постоянного ввода топлива в виде аэрозоля в газовую смесь (например, форсунки). Наличие мелких капель вместо пара, естественно, влияет на процесс горения. Однако, согласно [1], механизм распространения пламени для аэрозолей углеводородов с размером капель менее 0,01 мм аналогичен механизму распространения пламени, когда эти же углеводороды находятся в горючей смеси в паробразном состоянии. В литературе структура фронта пламени при различных методах введения топлива не анализировалась.

Цель данной работы — исследование структуры богатых пламен гексана: 1) при введении паров гексана в газовую смесь  $O_2 + Ar$  ( $\alpha = 1,42$ ), 2) при введении гексана в виде аэрозоля в ту же газовую смесь ( $\alpha = 1,26$ ).

На рис. 1 приведены схемы экспериментальных установок для получения горючей смеси. В случае пламени с вводом топлива в виде пара (см. рис. 1, а) гексан из термостатированной ячейки уносится током аргона и затем смешивается с кислородом и дополнительным количеством аргона. Для поддержания постоянных условий испарения гексана в ячейке предусмотрена мешалка, вращающаяся со скоростью 1 об/с, ось которой уплотнена ртутным затвором. Уровень гексана в ячейке поддерживается постоянным с помощью переливного устройства. Принцип его действия заключается в следующем: при снижении уровня жидкости в ячейке за счет испарения по закону сообщающихся сосудов гексан переливается из переливного устройства в ячейку. В этом случае в переливном устройстве создается некоторое дополнительное разрежение, которое компенсируется пробулькиванием газа через конец капилляра в жидкости. В результате уровень в ячейке восстанавливается на заданной отметке, а в переливном устройстве новое положение столба жидкости уравнивается установившимся разрежением в газовой фазе. Во избежание непосредственного влияния меняющегося атмосферного давле-

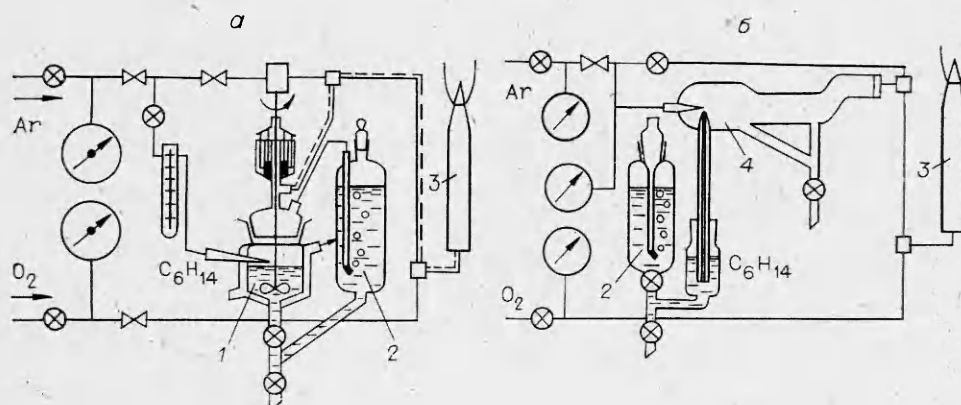


Рис. 1. Схемы экспериментальных установок для получения горючей смеси.  
 а) введение топлива в виде пара; б) введение топлива в виде аэрозоля. 1 — термостатированная ячейка; 2 — переливное устройство; 3 — горелка; 4 — распылитель.

ния выход капилляра из переливного устройства соединен с газовой фазой термостатированной ячейки. Количество уходящего гексана в горючей смеси можно регулировать либо изменением температуры термостатирующей воды, либо изменением расхода аргона через ячейку. Газовая линия от ячейки до горелки прогревалась во избежание конденсации гексана.

При аэрозольном методе введения топлива часть аргона подавалась на угловой распылитель (см. рис. 1, б). Поскольку количество распыляемой жидкости зависит от глубины погружения капиллярной трубки распылителя в жидкости, то здесь также использовалось переливное устройство более простой конструкции, работающее аналогично использованному для ввода гексана в виде пара. В горючей смеси требовалось присутствие капель, поэтому линия горелки не прогревалась. Максимальный размер капель составлял приблизительно 10 мкм. Полученный аэрозоль гексана затем смешивался с кислородом и дополнительным количеством аргона. Условия испарения и распыления поддерживались постоянными в течение эксперимента.

В предыдущих работах использовался метод разового отбора проб для масс-спектрального анализа [2]. В описываемых опытах применялся метод непрерывного отбора пробы. Проточная система напуска, сконструированная для источника ионов масс-спектрометра МХ-1304 (рис. 2), позволяет количественно анализировать некоторые полярные соединения, в частности воду (ранее ее концентрация определялась расчетным способом).

Проточная система состоит из двух ступеней. На первой ступени откачки пробы отбираются кварцевым микрозондом. Режим натекания вязкостный. При прохождении пробы в промежуточный откачиваемый объем она омывает кварцевый накататель, через который часть ее попадает непосредственно в ионизационную камеру источника ионов. Режим натекания молекулярный. Оставшаяся часть пробы откачивается. Таким образом, при отборе пробы через некоторое время на стенках системы напуска устанавливается динамическое равновесие процессов адсорбции и десорбции. Проба в ионном источнике масс-спектрометра может считаться идентичной пробе на входе в пробоотборник. Для паров воды время полного установления равновесия составляет максимально до 30 с.

Анализировать отобранные пробы по масс-спектрам достаточно трудно. Тем не менее даже для смеси близких углеводородов (гексан, пропан, пропилен, этилен, ацетилен и метан) ошибка определения концентрации оценивается в 8—10%. Методика анализа и расчета подробно описана в [2] на примере изучения пламен пропана. В данной работе приводятся сглаженные профили концентраций, поскольку они далее используются в расчетах.

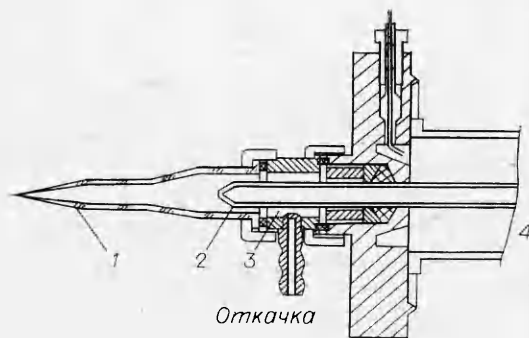


Рис. 2. Схема системы непрерывного отбора проб из пламени.

1 — микрозонд; 2 — нагреватель; 3 — промежуточный объем; 4 — источник ионов.

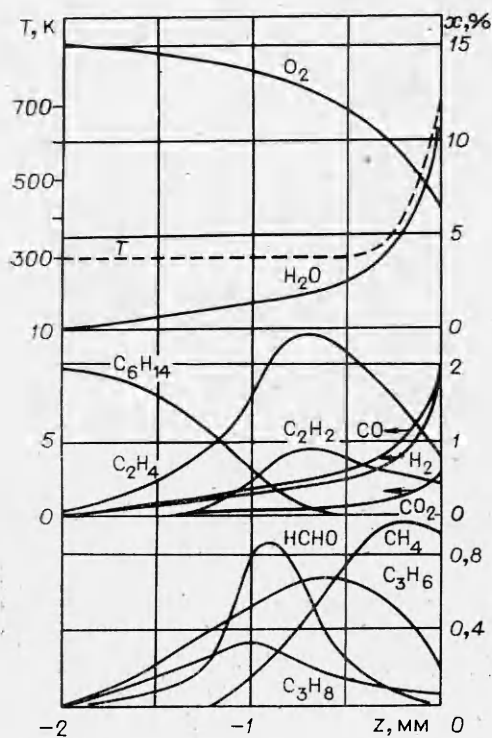


Рис. 4. Структура фронта пламени 2 при введении гексана в виде аэрозоля.

высоте 5—6 мм от среза горелки, где положение фронта пламени наиболее стабильное (отклонение не более 20 мкм). В этом случае можно пользоваться квазиоднородным приближением фронта пламени [3].

При изучении пламени 1 найдено [4], что ширина низкотемпературной зоны реакции (условно — до внутренней границы светящегося конуса) составляет приблизительно 2,1 мм (рис. 3). Состав продуктов отвечает изученному ранее более богатому пламени гексана [5]. В предпламенной области происходит образование промежуточных продуктов: углеводородов, кислородных продуктов. Причем, как и для пропана [2], здесь имеется не только CO и HCHO, но и конечные продукты: CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O. Не очень понятно отсутствие в пробах продуктов, содержащих 4 и 5 атомов углерода в цепи. В случае очень небольших количеств этих соединений при малом превращении гексана их масс-спектры в смеси могут маскироваться полностью налагаемым на их спектр спектром гексана. Однако и при больших степенях превращения гексана в пробах отсутст-

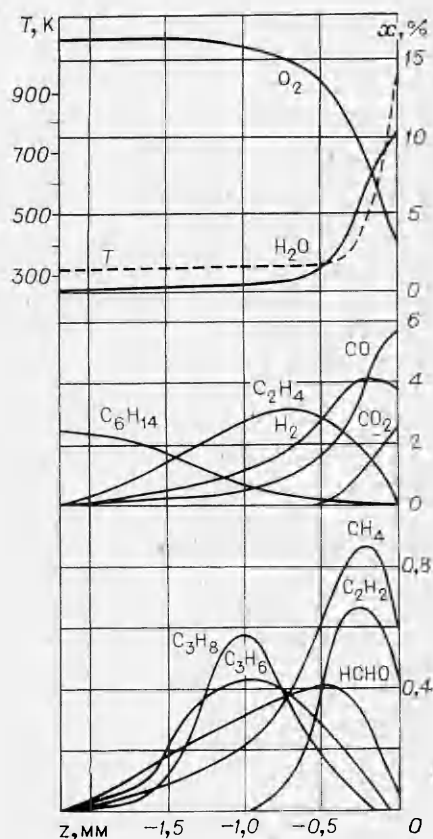


Рис. 3. Структура фронта пламени 1 при введении гексана в виде пара.

Температура пламени измерялась платина-платинородиевыми (10%) и вольфрам-рениевыми термопарами (ВР 5/20) с диаметром нитей 30—50 мкм. Термопары, покрытые слоем оплавленной двуокиси кремния, вводились с внутренней стороны пламени. Термопарное зондирование и отбор проб проводились в середине боковой поверхности конуса пламени на

вуют пики  $C_4$ - и  $C_5$ -углеводородов. По-видимому, они присутствуют в незначительных количествах по сравнению с другими продуктами. Как и в пламени пропана, в пробах также отсутствует этан.

Гексан, пропан, пропилен и этилен полностью расходуются в низкотемпературной зоне. В горячую зону частично переходит метан, ацетилен, формальдегид и водород.

Профили концентраций в пламени 2 (рис. 4) очень сходны с профилями концентраций в пламени 1. Ширина реакционной зоны составляет около 2 мм. Положение максимумов профилей концентраций продуктов практически не изменяется. В количественном отношении по сравнению с пламенем 1 несколько больше образуется  $CO$ ,  $H_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_3H_6$  и  $HCNO$ , но меньше воды. Водород в пламени 2 не имеет явного максимума на кривой.

По температурным профилям начальных участков реакционной зоны, приведенным на рис. 3 и 4 вместе с профилями концентраций, видно, что подъем температуры для пламени 1 начинается с расстояния приблизительно 1,3 мм, а для пламени 2 — с расстояния 0,5 мм от внутренней границы светящейся зоны. Подъем температуры в пламени 1 до точки ее интенсивного роста ( $-0,5$  мм) составляет несколько градусов, т. е. реакция превращения топлива начинается уже при исходных температурах.

Различие в исходной температуре, как показано в [6], не влияет на ширину низкотемпературной реакционной зоны. На границе светящейся зоны температура равна 930 и 800 К для пламени 1 и 2 соответственно. Такое поведение вполне объяснимо, если учесть, что помимо взаимодействия гексана с радикалами и кислородом в пламени 2 должно происходить испарение капель. Часть тепла может подводиться из горячей зоны, а другая часть может выделиться за счет экзотермических реакций в жидкой фазе. На последнюю возможность указывается в работе [7]. По-видимому, протекание жидкофазных реакций приводит к тому, что образуется меньшее количество воды. Кроме этого, «задержанный» выход гексана в газовую фазу и его превращение в жидкой фазе вызывает возникновение углеводородов в несколько больших количествах по сравнению с пламенем 1. Эти рассуждения относятся и к формальдегиду, который, вероятно, образуется одновременно как в каплях, так и в газовой фазе.

Данные выводы можно полагать обоснованными, так как зависимость структуры фронта от различных концентраций топлива в смеси существенна только при большой разности коэффициентов избытка топлива. В работе [4] показано, что уменьшение коэффициента избытка топлива с 2,88 до 1,42 в случае гексана приводит к сужению низкотемпературной реакционной зоны с 3 до 2,1 мм.

*Поступила в редакцию 4/XI 1981*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. H. Burgoyne. Chem. Eng. Progr., 1957, 53, 3, 421.
2. Д. С. Однорог. Кацд. дис. КазГУ, Алма-Ата, 1974.
3. R. M. Fristrom. J. Chem. Phys., 1956, 24, 4, 888.
4. В. К. Манжос, Б. Я. Колесников. Тез. семинара по электрофизике горения. Караганда, 1980.
5. Г. И. Кеандопуло, Б. Я. Колесников и др. ФГВ, 1977, 13, 4, 641.
6. Г. И. Кеандопуло. Химия пламени. М.: Химия, 1980.
7. Г. А. Махов, К. П. Куценогий. ФГВ, 1980, 16, 6, 17.