

10. S. S. Abdel — Khalik, S. Tamaru, M. M. El-Wakil. Fifteenth Symp. (Intern.) on Combust. Combust. Inst., Pittsburgh, 1974.
11. Р. Зигель. — В кн.: Успехи теплопередачи. М.: Мир, 1970.
12. С. А. Абриков. Уч. записки Каз. ун-та, т. 115, кн. 12, 1955.
13. С. А. Абриков. Теневые и интерференционные методы исследования оптических неоднородностей. Казань: Изд-во КГУ, 1962.
14. В. Пост. Взрывы и горение в газах. М.: ИЛ, 1952.
15. В. М. Мальцев, М. И. Мальцев, Л. Я. Кашпоров. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ НА ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ ЛАМИНАРНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАМЕН

Б. С. Фиалков, Н. Д. Щербаков, Н. К. Акст, М. Д. Островский
(Караганда)

Изменение соотношения топливо — окислитель, характеризуемого коэффициентом избытка окислителя α , широко используется для регулирования процесса горения. В этой связи представляет интерес рассмотрение связи теплофизических и ионизационных явлений в пламенах при различных α , особенно из-за простоты и малой инерционности способов контроля электрофизических параметров факела. Важность последних для практики очевидна.

При изучении влияния коэффициента избытка окислителя на горение предпринята попытка многостороннего анализа протекающих процессов. В частности, изучены распределения электрического потенциала и температуры [1], положительных ионов [2], радикала водорода [3], возбужденных частиц CN^* и C_2^* [4] и некоторых устойчивых молекул, присутствующих в пламени [5].

Эксперименты проводили на ламинарных пламенах предварительно перемешанных смесей пропан-бутана с воздухом при $\alpha = 0,4 \div 1,0$, стабилизированных на кромке круглой металлической горелки диаметром $d = 10$ мм. При этом число Рейнольдса во всех экспериментах поддерживалось постоянным и равным 1300.

Влияние α на скорость горения u , объемную скорость тепловыделения Φ , электрический потенциал φ и относительную концентрацию некоторых положительных ионов c иллюстрируется рис. 1. (Для уменьшения влияния аппаратных погрешностей концентрация ионов и производные от нее параметры представлены в относительных величинах, когда за единицу принято максимальное значение данного параметра при $\alpha = 0,4$.)

Если для теплотехнических характеристик (u и Φ) наблюдается монотонное увеличение значений по мере роста α , то изменение электрофизических (φ и c) имеет явно выраженный экстремальный характер. Отметим, что экстремальный характер изменения при варьировании α свойствен не только электрофизическим параметрам, но и концент-

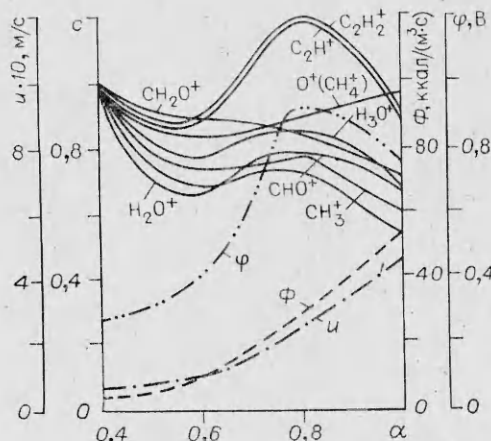


Рис. 1. Зависимость скорости горения, объемной скорости тепловыделения, электрического потенциала и относительных концентраций положительных ионов от коэффициента избытка воздуха.

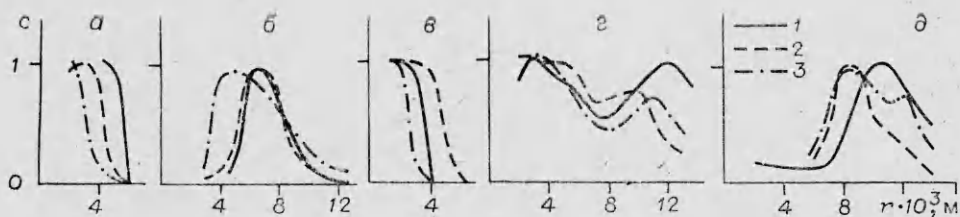


Рис. 2. Распределение относительной концентрации положительных ионов по радиусу пламени для различных коэффициентов избытка окислителя.
 1 — $\alpha = 0,8$; 2 — $\alpha = 0,6$; 3 — $\alpha = 1,0$. а) $m = 15$; б) $m = 18$; в) $m = 26$; г) $m = 28$; д) $m = 30$.

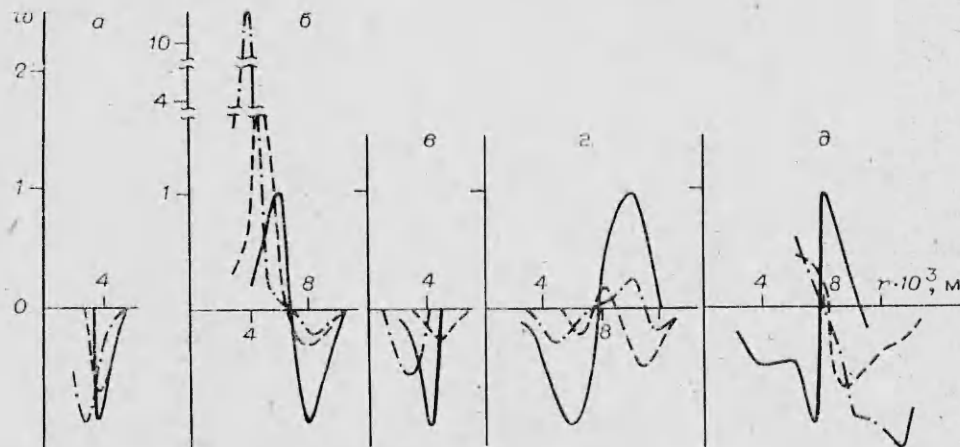


Рис. 3. Распределение относительных скоростей реакций положительных ионов по радиусу пламени для различных коэффициентов избытка окислителя (обозначения см. на рис. 2).

рации атомарного водорода и радикала HO_2 , интенсивности свечения возбужденных частиц CN^* и C_2^* , величине магнитного поля пламени [6]. Область существования экстремума во всех случаях соответствует $\alpha = 0,80 \div 0,85$. Последнее позволяет предположить различия в механизме процесса горения, в том числе и ионизационных явлений при сжигании богатых и бедных смесей.

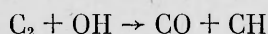
Для проверки этого предположения проведен дополнительный анализ распределений и суммарных скоростей реакций ионов по радиусу пламени. На рис. 2 и 3 приведены изменения относительных концентраций положительных ионов и суммарных скоростей реакций с участием данных ионов для различных α на высоте 5 мм от среза горелки ($h/d = 0,5$). На этой высоте, как показали эксперименты, отмечается значительное развитие всех физико-химических процессов, включая и ионизационные. В то же время геометрия этой области в меньшей степени подвержена изменению при варьировании коэффициента избытка окислителя, а энергия потока достаточно велика, чтобы аэродинамические возмущения, вызванные вводом конуса-пробоотборника масс-спектрометра, термомпары и т. п., были незначительны. Это позволяет вносить меньше корректив в результаты измерений.

В результате варьирования α от 0,6 до 1,0 скорость горения изменяется от 10 до 45 см/с. Естественно предположить, что должны измениться и относительные распределения концентрации ионов, а соответственно и суммарные скорости реакций.

Действительно, как видно из рис. 2, наблюдается сложный характер изменения распределения всех ионов. Они наиболее выражены около фронта горения как со стороны свежей смеси для углеводородных ионов, так и со стороны зоны догорания (фиолетовой области) для кислородсодержащих. Важная особенность при этом состоит только в уменьшении или только увеличении концентрации каждого иона относительно

$\alpha = 0,8$. Исключением являются ионы с массами 26 и 27 (ионы, принадлежащие ряду $C_2H_n^+$). Соответственно для кислородсодержащих ионов при $\alpha = 0,8$ наблюдается минимум, а для углеводородных, за исключением CH_3^+ , функция не имеет особых точек.

Целесообразно сопоставить эти данные с тем, что по мере обеднения смеси изменяется окраска фронта пламени, переходя от сине-зеленой к синей. Поскольку окраска есть следствие излучения возбужденных радикалов C^* в зеленой области спектра и CH^* — в синей [7], ее изменение свидетельствует о том, что по мере увеличения α происходит снижение роли реакций, ответственных за накопление C_2^* или смещение реакций в сторону увеличения расходования этих частиц. Этому, по видимому, способствует рост скорости реакции [8]



и связанные с ними соответствующим образом ионизационные явления.

Причину сложного изменения характера ионизационных явлений следует искать в природе протекающих при этом химических реакций. Вычисленные значения изменения относительных суммарных скоростей реакции при различных α приведены на рис. 3, откуда видно, что зависимость $u(\alpha)$ имеет тот же характер, что и их концентрации. Скорость тепловыделения в области существования кислородсодержащих ионов изменяется без особых точек, а в зоне подготовки — экстремально.

Одно из возможных объяснений экстремальности ионизационных явлений заключается, вероятно, в различии роли кислорода, поступающего вместе с топливом и диффундирующего из атмосферы. Анализируя суммарные скорости реакции, отметим прежде всего незначительное изменение суммарных скоростей реакций в непосредственной близости к фронту горения и весьма значительные в периферийных областях (у видимых границ пламени).

Можно предположить, что при малых коэффициентах избытка окислителя (в богатом пламени) дробление молекул исходного топлива и их реагирование протекают при ограниченном количестве кислорода. В связи с этим количество выделяемой энергии во фронте низко, что соответственно ведет к снижению скоростей расходования углеводородных частиц и, в частности, углеводородных ионов (см. рис. 3). Увлекаемые потоком непрореагировавшие в зоне подготовки углеводородные осколки пересекают зону свечения, соответственно снижая температуру последней и увеличивая протяженность области протекания соответствующих реакций. Пространственное смещение этих реакций приводит и к смещению

следующих реакций, стоящих в определенных звеньях цепного механизма процесса горения. Следовательно, в богатых пламенах и общая скорость горения снижается.

В данном случае общая скорость горения лимитируется скоростью образования конечных продуктов, которая, в свою очередь, непосредственно зависит от количества подводимого кислорода, участвующего в процессе окисления.

По мере роста α увеличивается расходование углеводородных осколков. Поскольку скорость их образования конечна, при определенных соотношениях топливо — окис-

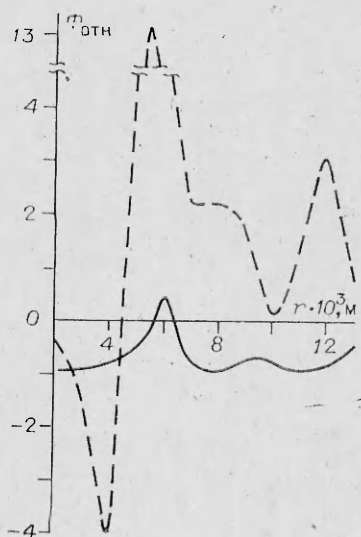


Рис. 4. Радиальное распределение относительной скорости тепловыделения при различных коэффициентах избытка окислителя (обозначения см. на рис. 2).

литель наступит равновесие между скоростями образования и окисления осколков топлива. Дальнейшее увеличение α может привести к тому, что скорость образования углеводородов будет ниже скорости их окисления.

Таким образом, общий процесс ионообразования, по-видимому, будет лимитироваться двумя направлениями течения реакций: с одной стороны, скоростью образования и расходования простейших углеводородов типа H_nC^+ и $H_nC_2^+$ и образования и расходования ионов типа H_nO^+ , HO_2^+ и H_nCO^+ — с другой. Представляется, что из этих конкурирующих направлений течения реакций лимитирующей будет вторая. Тогда, согласно предложенной модели, первичным ионом является в первой цепи ион, образованный из углеводорода (исходная цепь) и иона кислорода, ведущего реакцию к конечным продуктам, который определяет общую скорость ионных процессов.

Подтверждением этого предположения может служить наличие по радиусу пламени двух экстремумов на кривых относительных объемных скоростей тепловыделений (во фронте горения и на периферии) при $\alpha = 0,6$ и $1,0$ (рис. 4).

*Поступила в редакцию 11/X 1982,
после доработки — 15/XII 1982*

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. С. Фялков, Н. Д. Щербаков, В. Т. Плицын. ФГВ, 1978, 14, 3.
2. Б. С. Фялков, Н. Д. Щербаков. ЖФХ, 1980, 10.
3. В. Н. Ботова, Н. Д. Щербакова, Б. С. Фялков. ФГВ, 1980, 16, 3.
4. А. Б. Фялков, В. К. Муравлев, Б. С. Фялков. ФГВ, 1981, 17, 2.
5. Т. М. Шпильман, Б. С. Фялков. — В кн.: Люминесценция и теплофизика. Караганда, 1980.
6. Э. Г. Миронов, С. В. Стариков, Б. С. Фялков и др. Тез. семинара по электрофизике горения. Караганда, 1980.
7. В. Н. Кондратьев, Е. Е. Никитин. Кинетика и механизм газофазных реакций. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
8. А. Гейдон. Спектроскопия пламени. М.: ИЛ, 1959.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ С ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ

*В. К. Смоляков, Е. А. Некрасов, Ю. М. Максимов
(Томск)*

Существующая теория безгазового горения с фазовыми переходами [1, 2], определяя качественные закономерности распространения фронта реакции, справедлива для одностадийного процесса. Реальные системы, как правило, характеризуются многостадийностью превращения вещества. Развитие количественного подхода к описанию безгазового горения [3, 4] требует построения моделей фазовых переходов, отражающих специфику заданной конкретной системы. Настоящая работа посвящена формулировке указанных моделей на примере системы Ti—В с типичными для безгазового горения фазовыми переходами.

Несмотря на обилие экспериментальных результатов, механизм взаимодействия титана с бором в зоне реакции окончательно не выяснен. В этом смысле построение соответствующей эксперименту математической модели процесса можно рассматривать как один из путей дальнейшего развития представлений о горении системы Ti—В.