

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабкин В. С., Кононенко Ю. Г. и др. ФГВ, 1985, 21, 6, 43.
2. Баратов А. Н., Коротких Н. И. Химическая промышленность, 1980, 2.
3. Cabbage P. A., Marshall M. R. Pressure generated in combustion chambers by the ignition of air-gas mixtures. Gas Council Report No. 167. Warwickshire, 1971.
4. Бабкин В. С., Кононенко Ю. Г. ФГВ, 1967, 3, 2.
5. Garforth A. M. The spherical bomb method for laminar burning velocity determination: experimental results and critical appraisal. Report No. 75. Johannesburg, 1977.
6. Бабкин В. С., Козаченко Л. С. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 4.

Поступила в редакцию 10/XI 1984,
после доработки — 2/III 1988

ИОНИЗАЦИЯ ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОМ ГОРЕНИИ ГАЗОВ

В. Н. Дашевский, Б. С. Фиалков

(Караганда)

Под фильтрационным горением газов понимается волновой процесс химического реагирования газообразных топлива и окислителя, при котором реагенты подводятся к зоне горения путем фильтрации через слой инертного пористого тела или зернистого материала [1]. Ряд характеристик (скорость, протяженность, тепловая структура и др.) волны горения, распространяющейся навстречу потоку реагентов, теоретически и экспериментально изучены в [1—5]. Однако процесс горения характерен также сверхравновесной ионизацией во фронте горения и в газообразных продуктах реакции, степень которой на 4—5 порядков может превышать степень термической ионизации [6]. Известно, что пламя, в том числе и распространяющееся, обладает собственным электрическим полем сложной структуры [8, 9], причем ионизационные явления в областях подготовки и догорания существенно различаются [10]. В то же время показано, что измерение электрофизических характеристик пламени позволяет увеличить объем информации о ходе процесса горения, обеспечить контроль и управление сжиганием топлива [11]. В связи с этим представляется актуальным изучение параметров ионизации, сопровождающей распространение волны горения в пористой среде.

Эксперименты проводились в кварцевой трубе диаметром 45 и высотой 150 мм, расположенной вертикально и закрытой снизу. Труба заполнялась кварцевыми зёрнами с размером фракции зерна 1—1,3 мм. Пористость засыпки $m = 0,5 \pm 0,05$. Горючая смесь комнатной температуры подавалась с нижнего, а поджигалась с верхнего открытого конца трубы. В качестве топлива использовался пропан-бутаи, во фронте горения которого при стабилизации пламени на горелке создается концентрация ионов до 10^{11} см^{-3} [6]. Расходы пропан-бутана и воздуха измерялись ротаметрами РМ-0,63Г и РМ-2,5Г. Расход топливно-воздушной смеси при изменении ее состава поддерживался постоянным и составлял 350—400 $\text{см}^3/\text{с}$, что соответствует скорости потока в пустой реакционной трубе $v = 22 \div 25 \text{ см/с}$. Эта величина прямо пропорциональна скорости фильтрации газа в заполненной трубе. При $m = 0,5$ величина просвета $n = 0,21$, следовательно, $v = 22 \div 25 \text{ см/с}$ соответствуют скорости фильтрации $v_{\text{ф}} = 104,8 \div 119 \text{ см/с}$.

Параметры ионизации регистрировались двойными пассивными электрическими зондами путем измерения разности потенциалов между непосредственно заземленным и заземленным через нагрузочное сопротивление нихромовыми электродами диаметром 0,2 мм. Electrodes помещались в двухканальные керамические капилляры так, что рабочая их часть на 2 мм выступала из капилляров и находилась у оси реакционной трубы. Для контроля температуры газа в реакционном объеме

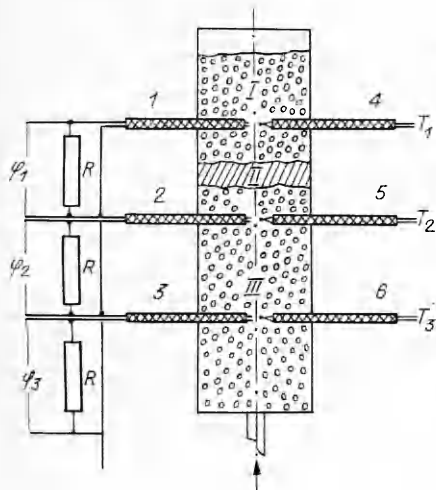


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1-3 — пассивные электрические зонды; 4-6 — термопары; R — нагрузочное сопротивление ($R = 2,0 \text{ МОм}$); I — область продуктов сгорания; II — волна горения; III — область подготовки.

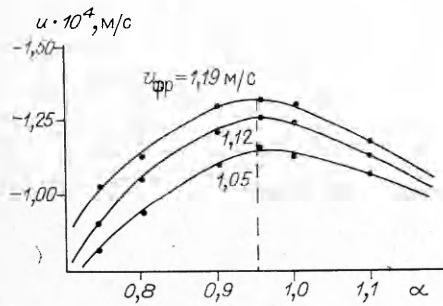


Рис. 2. Зависимость скорости волны горения от коэффициента избытка воздуха при разных v_{ϕ} .

использовались хромель-алюмелевые термопары с диаметром сая 0,05 мм. Зонды и термопары размещались на расстоянии 45, 90, 135 мм от верхнего среза трубы. Во избежание контакта с поверхностью кварцевых зерен наконечники зондов и термопар находились в специальных каркасах, изготовленных по методике, описанной в [5]. Сигналы с зондов и термопар регистрировались самописцем НЗЗ8-6П (сигнал с зонда предварительно усиливался по напряжению электрометрическим усилителем У5-11). Схема измерений представлена на рис. 1.

Волна горения распространяется навстречу потоку только при коэффициенте избытка окислителя $\alpha \geq 0,7$. Скорость распространения волны $u = 0,12 \text{ мм/с}$ при $v_{\phi} = 1,12 \text{ м/с}$ и $\alpha = 1$. На рис. 2 приведена зависимость скорости волны горения от α для различных скоростей фильтрации. За положительное направление, как обычно, принято направление газового потока. Видно, что максимум достигается при $\alpha \approx 0,95$.

Скорость волны горения в этих опытах определялась по перемещению нижнего края светящегося слоя. В то же время величину u оказалось возможным определить по времени появления электрического потенциала на зондах при перемещении волны навстречу им. На рис. 3 представлены записи потенциала на зондах и температуры при $\alpha = 1$ и $v_{\phi} = 1,12 \text{ м/с}$. Рассчитанная по интервалу времени между появлением сигнала на соседних зондах скорость распространения волны горения составила $u = 0,119 \text{ мм/с}$, что хорошо согласуется с данными по регист-

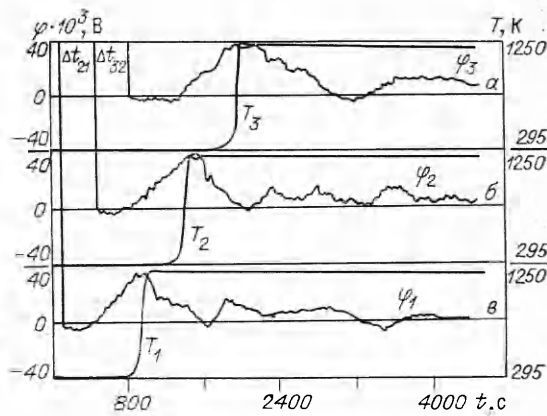


Рис. 3. Зависимости потенциала ϕ и температуры T от времени при $x = 135$ (а), 90 (б) и 45 мм (в).

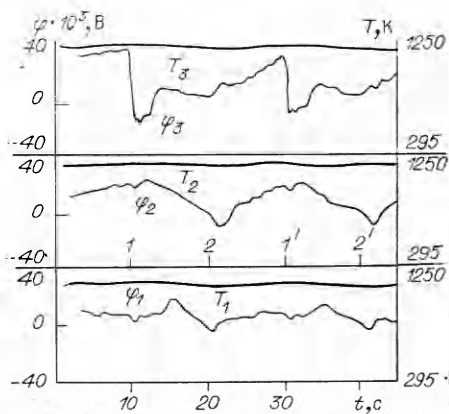


Рис. 4. Изменения потенциала и температуры при гашении и поджиге топливно-воздушной смеси в разогретом слое. 1, 1' — моменты гашения; 2, 2' — моменты поджигания.

рации перемещения светящегося слоя ($u = 0,12$ мм/с). Следовательно, пассивные электрические зонды можно применять для определения скорости волны фильтрационного горения в случае, когда перемещение волны нельзя наблюдать визуально (например, в непрозрачном объеме). Отметим, что использовать для этой цели термопары не представляется возможным из-за их инерционности, что наглядно видно из рис. 3.

При прекращении подачи смеси в реакционный объем, т. е. при гашении пламени, в момент, когда волна горения находится на уровне нижнего зонда, электрические сигналы на всех зондах резко изменяются (рис. 4), а затем примерно через 10 с полностью исчезают. Термопары в это время не регистрируют изменения температуры, так как реакционный объем не успевает остыть. Если теперь в трубу вновь подать горючую смесь, то она воспламеняется от контакта с разогретыми частицами кварца, и зонды регистрируют наличие ионизации. Описанный эффект, очевидно, может быть использован для оперативного определения момента прекращения или начала горения в слое инертного материала.

Потенциал на зонде появляется в тот момент, когда волна активного горения, сопровождающаяся значительным выделением тепла и свечением, находится выше зонда на расстоянии ~ 20 мм. Это свидетельствует об активном развитии химионизационных процессов в области подготовки и согласуется с данными [7].

В момент прохождения волны горения потенциалы на зондах значительно увеличиваются, а выше по потоку, в области продуктов горения, снижаются (см. рис. 3). Поскольку сопротивление нагрузки равно $2 \cdot 10^6$ Ом, то максимальные ионные токи на зонды, находящиеся в области подготовки, равны: $I_{1\max} = I_{2\max} = -2 \cdot 10^{-9}$ А, $I_{3\max} = -10^{-9}$ А. Считая, что токи на зонды обусловлены движением к ним ионов, и принимая скорость последних равной тепловой, оценим концентрацию ионов в зоне подготовки, учитывая, что в направлении зондов движутся не более $1/6$ от их общего количества; $N = 6I/\bar{e}VS$, где $\bar{e} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $V \approx 4 \cdot 10^6$ см/с; $S = 1,2 \cdot 10^{-6}$ см² — площадь рабочей поверхности зонда; $N_{1,2}^- \approx \frac{+2 \cdot 10^{-9} \cdot 6}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^6 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6}} \approx 1,6 \cdot 10^{10}$ см⁻³ для зондов 1 и 2 и $N_3^- \approx 0,8 \cdot 10^{10}$ см⁻³ для третьего.

Аналогично определяется концентрация ионов в волне горения ($N_{\max}^+ = 1,25 \cdot 10^{11}, 5 \cdot 10^{11}, 4 \cdot 10^{11}$ см⁻³, $N_{\max}^- = 0,8 \cdot 10^{11}, 5 \cdot 10^{11}, 1,2 \cdot 10^{11}$ см⁻³) и в области продуктов сгорания ($N_{\max}^+ = 0,9 \cdot 10^{11}, 2 \cdot 10^{11}, 10^{11}$ см⁻³, $N_{\max}^- = 0,6 \cdot 10^{10}, 3 \cdot 10^{11}, 6 \cdot 10^{10}$ см⁻³). Результаты показывают, что в волне горения и в области продуктов сгорания имеет место переполюсовка потенциала зондов, т. е. в определенные моменты времени в области зондов концентрация отрицательных ионов выше, чем положительных.

Эксперименты показали, что изменение состава горючей смеси (обогащение или обеднение) влияет на электрические потенциалы зондов (общий расход смеси поддерживался постоянным). На рис. 5 приведены $\varphi(\alpha)$ для трех зондов в момент, когда волна горения находится на уровне среднего зонда. Видно, что величина α наиболее сильно влияет на степень ионизации в волне горения, причем кривая $\varphi_2(\alpha)$ имеет максимум при $\alpha \approx 0,95$; при обогащении или обеднении смеси степень ионизации снижается. Такой же, но более слабо выраженный максимум наблюдается и в области подготовки при $\alpha \approx 0,9$. В то же время кривая потенциала в области продуктов сгорания выраженного экстремума не имеет. Однако и она в точке $\alpha \approx 0,92$ испытывает перегиб. Оче-

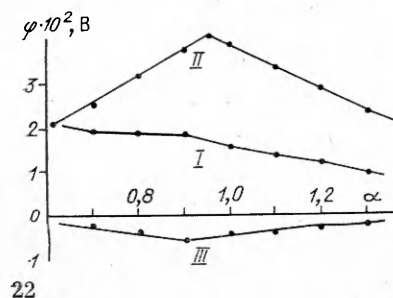


Рис. 5. Зависимость $\varphi(\alpha)$. (Обозначения аналогичны рис. 1.)

видно, что максимум ионизации в волне горения и в области подготовки достигается при соотношении топливо — окислитель меньше стехиометрического. Этот результат подтверждают данные [8, 9].

Сравнение рис. 2 и 5 позволяет сделать вывод об их качественном сходстве. Физически это вполне объяснимо: скорость распространения волны горения при прочих равных условиях увеличивается при росте скорости горения смеси, которая, как установлено ранее (см., например, [13]), максимальна как раз при $\alpha \approx 0,95$. Но степень ионизации, функцией которой является сигнал, регистрируемый зондом, также пропорциональна скорости горения. Таким образом, должна наблюдаться прямо пропорциональная связь между потенциалом на зонде и скоростью волны горения. Эта зависимость в принципе может быть использована для прямого определения скорости волны горения в слое по абсолютной величине потенциала зонда. Сопоставление полученных результатов с данными по ионизации в пламени, стабилизированном на горелке [8], и в пламени, распространяющемся в канале [9], дает основание сделать вывод о качественном подобии ионизационных явлений в этих процессах.

Специфика фильтрационного горения обуславливает и отличия исследуемого процесса от названных выше. Это, во-первых, большая пространственная протяженность всех зон ионизации (десятки миллиметров) и, во-вторых, сравнительно небольшое уменьшение степени ионизации при переходе от волны горения в область продуктов сгорания. Последний факт делает затруднительными попытки четко разделить зоны горения и продуктов сгорания по изменению электрического потенциала. Следовательно, наличие твердой фазы в реакционном объеме способствует увеличению времени жизни заряженных частиц, возникших в результате химионизации во фронте горения. Этот вывод подтверждается тем, что при прекращении подачи горючей смеси в реакционный объем (гашении пламени) время релаксации электрического заряда значительно и достигает 10 с (см. рис. 4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабкин В. С., Дробышев В. И., Лаевский Ю. М. ФГВ, 1983, 19, 2.
2. Бабкин В. С., Дробышев В. И. и др. Докл. АН СССР, 1982, 265, 5.
3. Потытняков С. И., Лаевский Ю. М., Бабкин В. С. ФГВ, 1984, 20, 1.
4. Лаевский Ю. М., Бабкин В. С. и др. ФГВ, 1984, 20, 6.
5. Потытняков С. И., Бабкин В. С. и др. ФГВ, 1985, 21, 2.
6. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. — М.: Энергия, 1976.
7. Шебеко Ю. П., Зверев Е. И. и др. Хим. физика, 1982, 1, 12.
8. Фялков Б. С., Щербаков Н. Д., Плицын В. Т. ФГВ, 1978, 14, 3.
9. Муравлев В. К., Фялков Б. С. — В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. семинара по электрофизике горения. — Караганда, 1980.
10. Фялков Б. С., Щербаков Н. Д. ЖФХ, 1980, 54, 10.
11. Фялков А. Б., Фялков Б. С. ФГВ, 1985, 21, 3.
12. Фялков Б. С., Плицын В. Т. Кинетика движения и характер горения кокса в доменной печи. — М.: Металлургия, 1971.
13. Кумаган С. Горение. — М.: Химия, 1979.

Поступила в редакцию 8/VIII 1986,
после доработки — 6/X 1987

РОЛЬ СМЕШЕНИЯ И КИНЕТИКИ В УМЕНЬШЕНИИ ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ГОРЕНИИ НЕПЕРЕМЕШАНЫХ ГАЗОВ В РАСШИРЯЮЩИХСЯ КАНАЛАХ

*Е. А. Мещеряков, В. А. Сабельников
(Жуковский)*

Выяснение причин резкого замедления сверхзвукового горения непере­мешанных газов в расширяющихся каналах (см. опытные данные [1—6]) — важная задача на пути создания эффективных камер сгорания. Она заключается в том, чтобы выяснить, какой из двух факто-