

на режим распространения конвективного горения при  $d < 0,1$  мм,  $\alpha_{10} < 0,2$ . Основное влияние сказывается у закрытого торца, где отражение продольных волн, распространяющихся по к-фазе, происходит раньше, чем успевают подойти волны сжатия по газовой фазе. Поэтому в результате частичного захлопывания каналов движение фронта замедляется.

Отметим, что в исследуемом диапазоне параметров стационарные структуры в численном эксперименте не выявлены, т. е. даже при постоянной скорости распространения фронта воспламенения продольная волна в к-фазе уходит вперед. Появление стационарных структур можно ожидать, по-видимому, при других характеристиках свода конденсированного топлива, когда скорости продольных волн в скелете совпадают со скоростью волн в газе, ведущих фронт конвективного воспламенения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
2. Ю. К. Краснов, В. М. Маргулис и др. ФГВ, 1970, 6, 3, 290.
3. В. П. Вилюнов, В. М. Ушаков, Э. Р. Шрагер. ФГВ, 1970, 6, 3, 311.
4. К. К. Куо, А. Г. Чен, Т. Р. Девис. РТК, 1978, 16, 6, 74.
5. М. Кумар, С. М. Ковачич, К. К. Куо. РТК, 1981, 19, 7, 78.
6. В. В. Митрофанов. Теория детонации. Новосибирск: Наука, 1982.
7. Л. Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973.
8. Х. Х. Дорренс. Гиперзвуковые течения вязкого газа. М.: Мир, 1966.
9. П. И. Смирнов. ФГВ, 1982, 18, 5, 63.
10. Г. Макмен, К. Вулдридж, Р. И. Маззи.— В кн.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967.
11. Ю. В. Лапин. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. М.: Наука, 1982.
12. Р. Рихтмайер, К. Мортон. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972.
13. Н. Н. Смирнов. ФГВ, 1985, 21, 5, 29.
14. Н. Н. Смирнов.— В кн.: Механика быстротекающих процессов. Новосибирск, 1984.
15. Р. И. Нигматулин, П. Б. Вайнштейн, П. Ш. Ахатов. ФГВ, 1983, 19, 5, 93.
16. Б. С. Ермолаев, В. С. Посвянский.— В кн.: Горение конденсированных и гетерогенных систем. Черногоровка, 1980.
17. Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов, В. А. Фотеев и др. ФГВ, 1980, 16, 3, 24.
18. Б. С. Ермолаев, Б. В. Новожилов, В. С. Посвянский и др. ФГВ, 1985, 21, 5, 3.
19. Л. И. Седов. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1973.

Поступила в редакцию 25/X 1985,  
после доработки — 28/VII 1986

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НА ОСИ ГАЗОВОГО ФАКЕЛА

*С. М. Межеричкий, Г. Ш. Полицук, М. Н. Нурмухамедов  
(Ташкент)*

Для изучения закономерностей образования в топках паровых котлов вредных веществ, в частности окиси азота, важно установить время пребывания реагирующих газов при определенных температурах. В связи с этим интерес представляют данные о времени движения продуктов горения непосредственно на оси горелочного устройства.

В настоящей работе предлагается способ определения времени перемещения продуктов сгорания между определенными точками на оси горелки, основанный на макрокинетике выгорания окиси углерода.

В [1] с принятием ряда допущений выведено следующее уравнение для скорости превращения CO в CO<sub>2</sub> в пламени CH<sub>4</sub>—O<sub>2</sub>:

$$-\frac{dc_{CO}}{d\tau} = K c_{CO} c_{H_2O}^{0,5} c_{O_2}^{0,25}, \quad \text{моль}/(\text{см}^3 \cdot \text{с}), \quad (1)$$

где  $c_{\text{CO}}$ ,  $c_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $c_{\text{O}_2}$  — концентрации, моль/см<sup>3</sup>;  $R = 8,314$  Дж/(моль · К);

$$K = 4 \cdot 10^{13} \exp\left(-\frac{199000}{RT}\right), \quad (\text{моль/см}^3)^{-0,75} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (2)$$

В настоящей работе проверена возможность использования выражений (1), (2) при выгорании СО в факеле природного газа в условиях, когда соответствующая исходная концентрация СО образовалась непосредственно на начальной стадии горения. На основе этих выражений рассчитывалось уменьшение  $c_{\text{CO}}$  после достижения максимального значения в соответствии с опытными данными [2], полученными при сжигании природного газа в стендовых условиях. Использовались результаты экспериментов, описанные в [2]. Данные об изменении состава продуктов сгорания и температуры по длине прямого факела, имевшего место в цилиндрической камере (при коэффициентах избытка воздуха  $\alpha = 1,05 \div 1,2$ ), позволили рассчитать объемы газов и их скорости. Затем вычислялись отрезки времени  $\Delta t$ , соответствующие перемещению газов от сечения к сечению по длине камеры сгорания.

Расчитанное таким методом убывание  $c_{\text{CO}}$  отличалось в 2—3 раза от опытного. В связи с этим эмпирическим путем уточнено выражение для константы скорости применительно к рассматриваемым условиям с сохранением формы уравнения (1), в котором объемные концентрации выражены в процентах:

$$K' = A \exp\left[-\frac{E}{RT}\right], \quad (\%)^{-0,75} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (3)$$

В результате обработки опытных данных [2] получены значения  $A = 1,95 \cdot 10^4$ ,  $E = 1,6 \cdot 10^5$  Дж/моль.

Концентрации СО (после максимального значения, которое использовалось как начальное), полученные в результате численного интегрирования (1) при подстановке в него найденных величин  $A$  и  $E$ , близки к заложенным величинам  $c_{\text{CO}}$  в соответствии с измеренными во всех опытах на стенде [2].

Для решения поставленной задачи — определения времени перемещения продуктов сгорания, соответствующего известному изменению  $c_{\text{CO}}$ , температуры продуктов сгорания и концентраций  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в них, уравнение (1) преобразовано к виду

$$\tau_{i+1} - \tau_i = \int_{(c_{\text{CO}})_{i+1}}^{(c_{\text{CO}})_i} \frac{dc_{\text{CO}}}{K' \cdot c_{\text{CO}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}^{0,5} \cdot c_{\text{O}_2}^{0,25}}, \quad \text{с}. \quad (4)$$

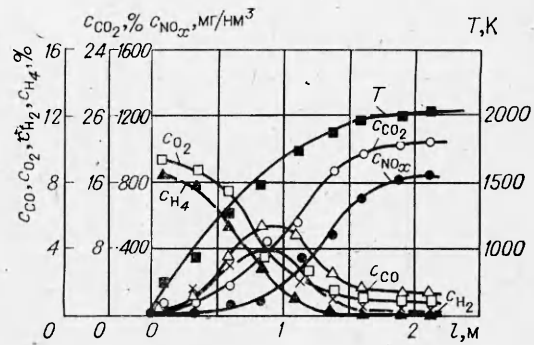
Расчеты  $\Delta t$ , выполненные с помощью численного интегрирования (4), так же как и упомянутые прямые расчеты с  $K$ , для всех опытов на стенде [2] дали приемлемое согласование с величинами, соответствующими экспериментальным данным.

Аналогичные расчеты выполнены на основании опытных значений (которые не были заложены при определении констант  $A$  и  $E$ ), полученных на другом стенде, конструкция которого описана в [3]. Этот стенд, представляющий собой также цилиндрическую камеру, отличается от предыдущего тем, что оборудован вихревой горелкой, обеспечивающей крутку воздушного потока (степень крутки, рассчитанная по методике [4], составила  $n = 1,05$ ). Однако быстрое выравнивание полей концентраций и температур в сечениях камеры, которое получено в опытах (в каждом сечении замеры проводились в трех точках), позволило достаточно достоверно вычислить средние значения указанных величин и определить  $\Delta t$ . Расчеты выполнены для режимов работы стенда, в которых  $\alpha = 1,0 \div 1,1$ , а расход газа составлял  $0,01$  м<sup>3</sup>/с.

Согласование величин  $\Delta t$  и  $\tau$ , рассчитанных по (4), с полученными на основании измерений во всех опытах на стенде [3] также оказалось приемлемым. Это видно из примера, приведенного в табл. 1, где время

Таблица 1

$c_{CO}, \%$	$\Delta\tau, \text{мс}$		$\tau, \text{с}$	
	расчет	опыт	расчет	опыт
0,65	20	13	0,117	0,110
0,55	20	13	0,137	0,124
0,45	23	26	0,160	0,150
0,35	26	33	0,186	0,183
0,25	31	36	0,217	0,219
0,15	46	56	0,263	0,275

Изменение температуры и состава продуктов сгорания на оси горелки ТГМП-314 при  $\alpha_r = 1,02$ .

движения газов от горелки до сечения камеры сгорания, в котором  $c_{CO}$  достигает максимума, — начальное время в расчете  $\tau_0 = 0,097$  с. Изложенное выше позволяет сделать вывод о возможности использования уравнения (4) для расчета времени движения продуктов сгорания природного газа в направлении, по которому измерено изменение температуры и концентраций  $CO$ ,  $H_2O$  и  $O_2$ .

Величины  $\Delta\tau$  и  $\tau$  рассчитаны предлагаемым способом на основании измерений, выполненных вдоль оси горелки котла ТГМП-314 Ириклинской ГРЭС (ст. № 6) при сжигании природного газа для номинальной нагрузки. Горелка конструкции ТКЗ-ХФЦКБ расположена на фронтальной стене в верхнем ярусе. Опыты проводились при коэффициенте избытка воздуха в горелке  $\alpha_r = 1,0$  и  $1,065$  и  $n = 1,2$ . Факел зондировали водоохлаждаемым зондом через центральную трубу, предназначенную для мазутной форсунки. Результаты измерений (включая концентрацию окислов азота  $NO_x$ ) для опыта при  $\alpha_r = 1,02$  приведены на рисунке. На основании расчетных зависимостей [4, 5] установлено, что на участке факела (до  $l/d_a = 2$ , диаметр амбразуры  $d_a = 1$  м), на котором выполнялись измерения, отсутствует влияние факелов соседних горелок.

Значения исходных величин и результаты расчета приведены в табл. 2 для опыта при  $\alpha_r = 1,02$  (условно для начального значения  $c_{CO}$  после максимума принято  $\tau_0 = 0$ ). Здесь же даны расстояния от устья горелки до точек на оси, которым соответствуют приведенные здесь концентрации и температуры. Кроме того, указаны скорости движения продуктов сгорания вдоль оси ( $w_0 = \Delta l / \Delta\tau$ ). Возрастание скорости обусловлено тем, что расчетный участок расположен после зоны обратных токов (которая имеется в закрученном факеле, так же как и в изотермическом закрученном потоке [4]) и здесь наблюдается тенденция к выравниванию аксиальных скоростей.

С использованием рассчитанных значений  $\Delta\tau$  и опытных данных о концентрациях  $NO$  на оси горелки котла определено изменение ско-

Таблица 2

$c_{CO}, \%$	$c_{O_2}, \%$	$c_{H_2O}, \%$	$T, \text{К}$	$\Delta\tau, \text{мс}$	$\tau, \text{мс}$	$l, \text{м}$	$w_0, \text{м/с}$
4,0	3,7	21,4	1700	—	0	1,08	—
3,6	3,3	22,2	1775	25	54	1,12	0,8
3,2	2,9	22,5	1800	23	101	1,16	0,9
2,8	2,7	22,9	1830	22	146	1,22	1,4
2,4	2,4	23,3	1865	22	190	1,3	1,8
2,0	2,0	23,5	1900	23	235	1,4	2,2
1,6	1,6	23,9	1930	25	283	1,54	3,2
1,2	1,2	24,3	1970	28	337	1,75	3,9
0,8	0,9	24,5	2000	36	804	2,02	4,1

рости образования окиси азота  $\Delta c_{\text{NO}}/\Delta\tau$ :

$\alpha_{\text{r}}$	$(\Delta c_{\text{NO}}/\Delta\tau)$ , %/с	$l'$ , м	$T'$ , К	$T_{\text{max}}$ , К	$T'/T_{\text{max}}$
1,02	0,130	1,46	1910	2000	0,96
1,065	0,160	1,14	1930	2040	0,95

Построение графиков  $\Delta c_{\text{NO}}/\Delta\tau = f(\tau)$  позволило определить временную координату и расстояние  $l'$  точки, в которой наблюдается максимальная скорость образования NO, от устья горелки (что имеет немаловажное значение, в частности, при выборе места ввода влаги для зонального воздействия на факел с целью уменьшения выброса окиси азота). Выше приведены результаты таких построений и расчетов для рассматриваемых двух опытов на котле ТГМП-314. Кроме  $l'$  даны температуры  $T'$ , при которых наблюдается  $(\Delta c_{\text{NO}}/\Delta\tau)_{\text{max}}$  и их отношения к максимальной температуре факела. Эти отношения оказались близкими к полученным для указанных выше стендовых экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. М. Фристром, А. А. Вестенберг. Структура пламени. М.: Metallургия, 1969.
2. Б. М. Гурович, С. М. Межеричкий, Л. М. Цирульников и др. Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук, 1981, 3, 30.
3. Я. И. Соколова, Л. М. Цирульников, В. Г. Конохов. Снижение образования ароматических углеводородов при сжигании природного газа (информационный обзор, № 4). М.: ВНИИЭГазпром, 1982.
4. Аэродинамика закрученной струи/Под ред. Р. Б. Ахмедова. М.: Энергия, 1977.
5. Р. Б. Ахмедов, Д. М. Ахмедов, Т. Б. Балагула.— В кн.: Использование газа в народном хозяйстве. Вып. 8. М.: ВНИИЭГазпром, 1976.

Поступила в редакцию 11/IX 1985,  
после доработки — 21/I 1986

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АЗОТСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ В ТОПЛИВЕ НА ЭМИССИЮ ОКСИДОВ АЗОТА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. П. Свинухов, Е. М. Филиппова

(Москва)

В рамках решения экологической проблемы в настоящее время большое внимание уделяется вопросам оценки и уменьшения выбросов оксидов азота различными техническими устройствами, в том числе и газотурбинными двигателями. С перспективой использования альтернативных топлив из угольного и сланцевого сырья ожидается увеличение связанного азота в топливе (топливного азота), содержание которого по оценкам может достигать до 1,0—1,5% [1]. Если же учесть, что выход топливной NO при условии полного перехода 1% азота в NO дает индекс эмиссии, равный 33 ед. (в эквиваленте NO<sub>2</sub>), то становится очевидным, что пренебрегать этим фактором нельзя. Под индексом эмиссии понимается отношение ингредиента в граммах (в данном случае NO и NO<sub>x</sub>) к килограмму сожженного топлива.

Анализ ранее проведенных исследований в этой области (см. [2—4] и др.) свидетельствует прежде всего о недостаточности экспериментальных данных для понимания процессов образования топливной NO<sub>x</sub>. В частности, требуются убедительные доказательства для правомерности утверждения о том, что выход NO<sub>x</sub> не зависит от типа азотсодержащих соединений в топливе и при горении все количество связанного азота сначала превращается в NO, а последующее образование или разложение оксида азота определяется механизмом Зельдовича [3, 4]. Во всяком случае, такое допущение, как и всякое другое, требует точностной оценки.