

NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE
ON
MHD ELECTRICAL POWER GENERATION

"CARBON FUEL BURNING UNDER CONDITIONS
OF PLASMA GENERATOR COMBUSTOR"

Y.G. DEGTEV, E.V. HAUSTOV
I.V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, Moscow, USSR.

A.I. VAINFELD, V.V. KURATNIKOV, M.N. CHESNOKOV
Odessa State University, Odessa, USSR.

Abstract. They investigated the influence of reactive properties of carbon combustible on the flare combustion and temperature in the combustion chamber of plasma generator. Experimental data on combustion of carbon particles in plasma jet allowed to determine diffusive combustion mechanism of the disperse particles, where the carbon's sublimation takes place.

The increase of coal reaction ability lead to reduction of particle's induction period and more simultaneous particle ignition of polydisperse system, that allow to reduce the combustion zone length with increasing temperature in flare.

Investigation data showed, that the completeness of combustion depends, first of all, from the process of combustible and oxidizer mixing, excess oxidizer (α) and residence time of combustible in the combustion chamber.

The quality assessment of mixing was conduited by the loss quantity of pressure impulse in the combustion chamber (\mathcal{P}_p) and the loss of combustion product's conduction (\mathcal{P}_c).

For examined type of the plasma generator more sensitive is parameter \mathcal{P}_c , which can be differ from the parameter \mathcal{P}_p in several times.

I.V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, Kurchatov square 1,
Moscow, 123182, USSR.

Исследуется кинетика механизма горения порошкообразных углеродных топлив в среде кислорода с азотом в условиях высоких температур (3000–4500К) и давлений (~ 4 МПа), присущих камерам сгорания импульсных генераторов плазмы.

Механизм горения отдельных частиц углеродного топлива экспериментально исследовался методом треков при сжигании их в высокотемпературной (4000–4500К) струе азота с кислородом (до 50%). В условиях таких высоких температур процесс горения углеродных частиц осложняется самодиффузией и сублимацией углерода [1]₆. Эти процессы также изучались вводом частиц массой (25–100) 10^{-6} кг на вольфрамовых иголках в струю инертного газа. Экспериментально получено, что скорость сублимации "К" пропорциональна количеству просублимированного углерода "ΔМ" за время "Δt" и ее начальной массе "M₀".

$$K = \frac{\Delta M}{\Delta t} \approx 0,92 \frac{M_0}{\Delta t}^{2/3} \quad (1)$$

Как и в работе [1] замечено, что при сублимации частиц уменьшается их плотность без заметного изменения их размера за счет выноса углерода из внутреннего слоя частицы на ее внешнюю поверхность. Влияние скорости (V_{Π}) обдувающего плазменного потока на величину скорости сублимации (V_s) можно оценить из соотношения, характеризующего диффузионный режим сублимации, при котором:

$$V_s = A \cdot Nu = 2A(1 + 0,275 Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}) \quad (2)$$

где Nu , Re , Pr - критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля, соответственно,

$$A = C_s \cdot \frac{D}{d}, \quad (3)$$

где C_s - концентрация насыщенного пара,
 D - коэффициент диффузии в пористом материале,
 d - размер пористого материала.

Подставляя в выражение (2) значения числа Рейнольдса (ρ - плотность, μ - вязкость) и обозначив $B = 2A$, $F = 2A \left(\frac{d \rho}{\mu} \right)^{1/2} Pr^{1/3}$ после преобразования получим:

$$V_{\Pi} = \left(\frac{V_s - B}{0,275 F} \right)^2 \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что получена квадратичная зависимость, что соответствует диффузионной области сублимации.

Время горения частиц в трековой камере определялось по отношению длины фиксируемых на фотопленке треков горящих частиц к скорости плазменного потока. Зависимости времени горения этих частиц от их размеров представлены на рис.1, которые подтверждают предположения о диффузионном режиме горения при высоких температурах [2].

Экспериментальные данные по горению углеродных частиц в высокотемпературной плазменной струе позволили установить, что пары углерода, сублимируя с поверхности твердого углерода, сгорают в зоне

вокруг частицы в режиме, определяемом скоростью диффузии кислорода в зону горения. Время горения частицы в этом случае не зависит от реакционной способности. Однако увеличение скорости химического реагирования в предпламенный период разогрева частиц приводит к сокращению времени индукции и более одновременному воспламенению и горению имеющих различные размеры частиц полидисперсной угольной пыли. Это позволяет сократить длину зоны горения, уменьшив тем самым теплоотдачу в стенку камеры сгорания. Результаты распределения частиц по времени горения показаны на рис.2.

При сжигании полидисперсных порошков 40-50 мкм в условиях камер сгорания генераторов плазмы приведенные длины камер $l_{\text{л}} \sim 3\text{м}$, рассчитанные по временам выгорания одиночных частиц, не обеспечивают полное сгорание этих порошков. При этом полнота сгорания зависит не только от степени механического недожога частиц в зависимости от их дисперсности и избытка окислителя, но и, в гораздо большей степени, от организации процесса смешения горючего и окислителя.

Организация эффективного смешения порошков с окислителем чрезвычайно сложная задача, что связано со спецификой организации подачи порошков к смесительным элементам, распыла и перемешивания.

Каналы подвода порошка к форсункам должны быть плавными и иметь определенные минимальные (в зависимости от дисперсности и псевдоожигения) проходные, исключающие их забивание, сечения. Число форсунок, располагаемых на форсуночной головке, сравнительно невелико, т.к. также ограничено минимальными проходными сечениями в форсунках.

Существуют также трудности выбора оптимального перепада давления на форсунках: при увеличении перепада растет дальнобойность и интенсивность струй порошка, а при уменьшении - возрастает опасность забросов продуктов сгорания в систему подачи порошка и склонность к забиванию проходных каналов.

Все выше сказанное затрудняет создание эффективных форсуночных головок, обеспечивающих хорошее смешение порошков с окислителем, особенно для исследовательских генераторов плазмы относительно малых масштабов.

Для компенсации недостатков смешения имеется возможность увеличения времени пребывания частиц в камере сгорания за счет увеличения ее размеров.

Размеры камеры сгорания принято [3] характеризовать приведенной длиной камеры:

$$l_{\text{п}} = \frac{V_{\text{к}}}{F_{\text{с}}} \quad (5)$$

где $V_{\text{к}}$ - объем камеры сгорания,
 $F_{\text{с}}$ - площадь критического сечения сопла.

Таким образом, приведенная длина камеры сгорания характеризует минимальные ее размеры и определяет время пребывания частиц в камере, которое должно быть достаточным для полного сгорания частиц выбранной дисперсности, типа горючего и его состава. С другой сто-

роны, увеличение размеров камеры сгорания ограничено ростом теплопотерь, за счет которых может быть сведено к минимуму положительное влияние полноты сгорания и даже снижена эффективность генератора плазмы в целом.

Исследование эффективности генератора плазмы с учетом всех перечисленных выше возможных потерь проводилось на модельных генераторах плазмы с расходом 1 кг/с и давлением в камере сгорания 2-4 МПа. Коэффициент избытка окислителя (кислорода) составлял 0,6+1,2.

Комплексную эффективность сжигания топлив в камере сгорания принято оценивать [3] с помощью коэффициента:

$$\eta_{\beta} = \beta_{\text{э}} / \beta_{\text{р}} \quad (6)$$

где β - величина потери импульса давления в камере, индексы э и р означают экспериментальное и расчетное значение параметра β .

Для генераторов плазмы более чувствительным к совершенству процессов сжигания топлива, особенно порошков, является коэффициент:

$$\eta_{\sigma} = \sigma_{\text{э}} / \sigma_{\text{р}} \quad (7)$$

где σ - значения электропроводности продуктов сгорания.

Для взаимосвязи параметров η_{σ} и η_{β} в продуктах сгорания топлив наиболее часто используется соотношение:

$$\eta_{\sigma} = \eta_{\beta}^{(20:24)} \quad (8)$$

Результаты проведенных экспериментов для разных приведенных длин камер сгорания ($\sim 3,4\text{м}$, $\sim 4,5\text{м}$ и $\sim 6,5\text{м}$) представлены на рис.3.

Видно, что параметр η_{σ} для всех камер имеет небольшую величину, т.е. эффективность преобразования энергии довольно низка. Основное влияние на потери проводимости продуктов сгорания оказывают тепловые потери, что подтверждается снижением η_{σ} по мере роста коэффициента избытка окислителя. Экспериментально получено, что теплопотери в камере при росте коэффициента избытка окислителя от $\alpha = 0,7$ до $\alpha = 1,1$ возрастают в 1,5 раза. Стабильный участок η_{σ} в области $\alpha = 0,8-0,9$ для $L_{\text{п}} = 3,4+6,5$ характеризуется балансом прироста температуры продуктов сгорания за счет улучшения горения с увеличением избытка окислителя и ее снижения за счет теплоотвода в стенки камеры. При $\alpha > 0,9$ - теплопотери преобладают.

Несколько большие значения η_{σ} для камер с $L_{\text{п}} \sim 4,5\text{м}$, чем для камер с $L_{\text{п}} \sim 3,4\text{м}$ получаются за счет повышения полноты сгорания порошков в камере большего размера. Однако, с ростом размера камеры возрастают и суммарные теплопотери в стенки камеры, поэтому и выигрыш по η_{σ} невелик. С увеличением же $L_{\text{п}}$ до 6,5м значения параметра η_{σ} имеют наименьшие значения и монотонно падают с ростом коэффициента избытка окислителя, что полностью объясняется влиянием возросших теплопотерь.

Для рассматриваемых генераторов плазмы значения параметра \mathcal{U}_β (рис.3) для всех испытаний лежат в пределах 0,93-0,98, т.е. в несколько раз выше значений параметра \mathcal{U}_σ , особенно для высоких значений коэффициента избытка окислителя ($\lambda \approx 1,1$). С увеличением приведенной длины величина \mathcal{U}_β слабо возрастает, что подтверждает улучшение процессов горения с увеличением размеров камеры сгорания. Влияние теплотерь также проявляется в области $\lambda = 0,8-0,9$, но на величине \mathcal{U}_β сказывается очень незначительно. Таким образом, параметр \mathcal{U}_β действительно оказался менее чувствительным к различным потерям температуры в генераторе, чем параметр \mathcal{U}_σ . Поэтому оценку эффективности преобразования химической энергии топлив для целей МГД-генерирования энергии необходимо проводить по коэффициентам \mathcal{U}_β и \mathcal{U}_σ в комплексе.

В заключение обсуждения результатов проведенных исследований следует подчеркнуть, что основное влияние на совершенство процессов горения полидисперсных порошков в камере сгорания оказывает качество смесеобразования. При неудовлетворительной организации смешения компонентов для завершения процессов горения требуется увеличение размеров камеры сгорания, что приводит к дополнительным теплотерям. При этом времена пребывания частиц в камере, необходимые для полного их сгорания, в 1,5 раза превышают времена сгорания одиночных частиц. Наблюдаемые в таких камерах уровни теплотерь приводят к снижению величины электропроводности продуктов сгорания на 40-50%.

Поскольку электрофизические характеристики продуктов сгорания исследуемых угольных порошков для целей МГД-энергетики [4] лежат в диапазоне коэффициентов избытка окислителя $\lambda = 0,75-1,0$, то для создания эффективных генераторов плазмы необходимо еще провести дополнительные исследования по повышению полноты сгорания угольных порошков на этих режимах работы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Головина Е.С. Высокотемпературное горение и газофикация углеорода. М., "Энергоатомиздат", 1983, 176 с.
2. Вайнфельд А.И., Курятников В.В., Чесноков М.Н. Влияние способов диспергирования на кинетические характеристики горения углеродного топлива. В кн.: Международное научно-техническое совещание "Физико-технические проблемы создания МГДЭС (Киев, 2-8 сентября 1984г.) т.3, 1985, с.73-76.
3. Алемасов В.Е. Теория ракетных двигателей. М., Оборонгиз, 1962.
3. Волков Ю.М., Дегтев Ю.Г., Крикун В.В., Хаустов Е.В. Исследования электрофизических характеристик продуктов сгорания металлизированных угольных топлив. В кн.: Восьмая международная конференция по МГД-преобразованию энергии (Москва, 12-18 сентября 1983г.) т.5, 1983, с.104-107.

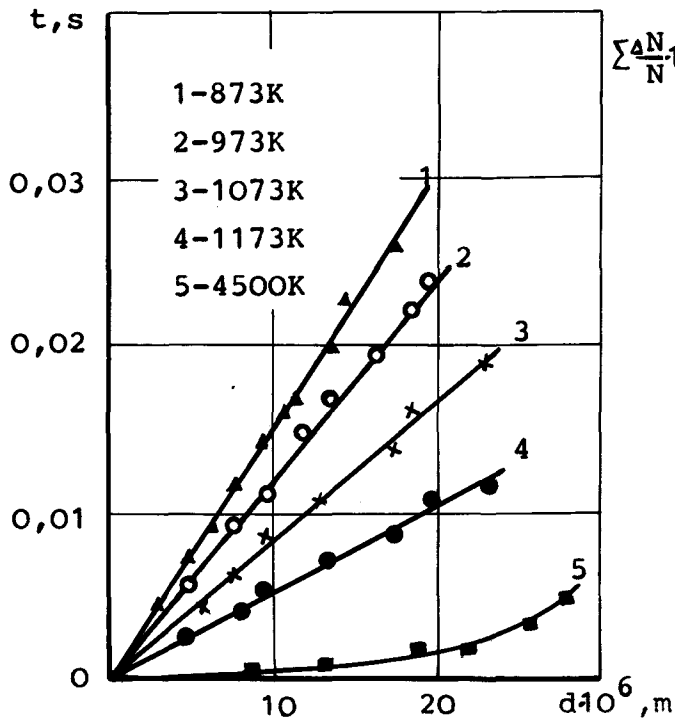


Fig. 1. Time dependence of particle combustion from their diameter and flow temperature.

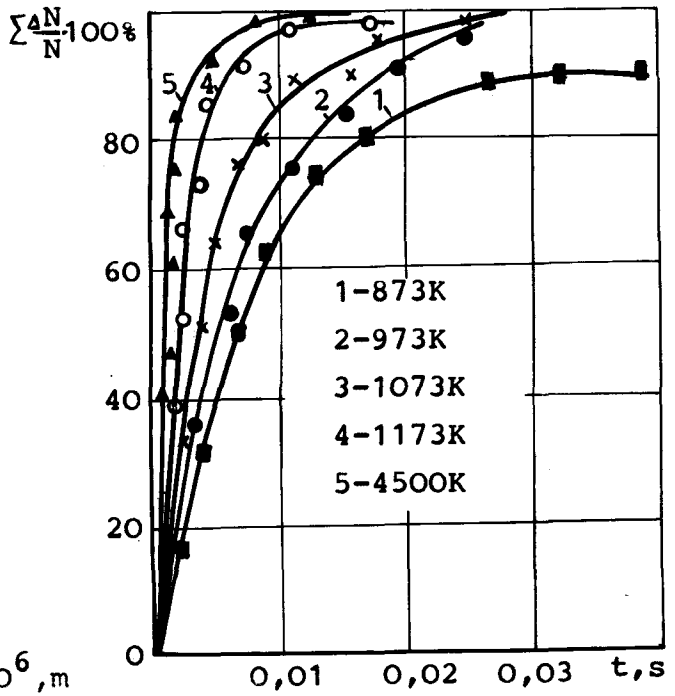


Fig. 2. Particle distribution by time combustion for different flow temperature.

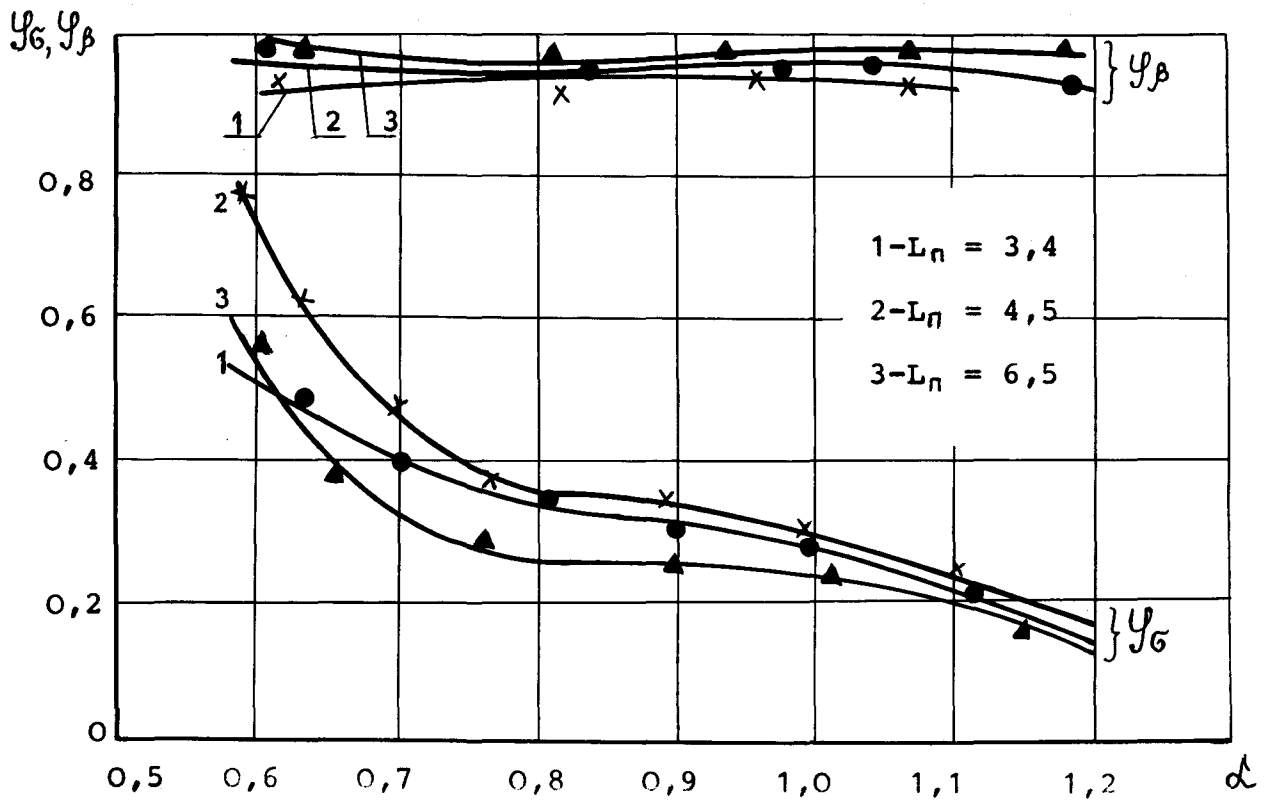


Fig. 3. Parameters and dependence from excess-oxidizer coefficient for different reduced lengths.