

21. Sotirchos S. V., Yu H. C. Mathematical modelling of gas — solid reactions with solid product // Chem. Engng. Sci.— 1985.— 40, N 11.— P. 2039.
22. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача.— М.: Химия, 1982.
23. Dutta S., Wen C. Y., Belt R. J. Reactivity of coal and char. 1. In carbon dioxide atmosphere // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.— 1977.— 16, N 1.— P. 20.

г. Москва

Поступила в редакцию 7/III 1991

УДК 533.6.011

В. Н. Дурнев, В. С. Власов

## УЧЕТ ПОЛИДИСПЕРСНОСТИ ПОРОШКООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В МГДУ

Численно исследовано влияние неполноты сгорания углеродного порошкообразного топлива на электропроводность плазмы при движении двухфазной смеси в конкретном МГД-генераторе. Показана некорректность учета полидисперсности углеродного топлива при помощи последовательных расчетов сгорания монодисперсных фракций. Получена зависимость температуры микропламени вокруг алюминиевой частицы полидисперсного ансамбля от размера частицы и ее положения в генераторе плазмы.

Использование в различных областях науки и техники МГД-генераторов с применением порошкообразного топлива обусловлено низкой стоимостью последнего, возможностью прямого преобразования энергии, регулирования длительностью работы МГД-установки (МГДУ) (путем отсечки подачи топлива), ее компактностью, мобильностью и т. д. В связи с этим встают проблемы расчета движения рабочего тела в МГДУ с целью выбора оптимальных размеров и режимов работы энергоустановок данного типа.

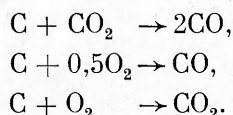
В [1, 2] представлена математическая модель процессов в канале МГДУ для монодисперсных частиц топлива. Учтены изменение химического состава несущей среды, скоростная и температурная неравновесность двухфазного потока, кинетика испарения ионизирующей присадки. Математическая модель движения полидисперсных ансамблей частиц порошкообразного топлива в камере сгорания МГДУ с учетом эволюции функций распределения частиц по размерам (определяемых в соответствии с [3]) приведена в [4]. Численные расчеты в [1, 2, 4] выполнены для МГД-генератора плазмы типа «Памир», имеющего следующие основные характеристики: длина генератора плазмы  $l = 720$  мм; расход 25 кг/с; окислитель — газообразный кислород; массовый состав горючего: углерод — 75 %, алюминий — 15 %, ионизирующая присадка (карбонат калия  $K_2CO_3$ ) — 10 %; давление в камере 6 МПа; температура в камере и в зоне зажигания 3500—3000 К. Коэффициент избытка окислителя  $\alpha = 0,9$ .

Считается, что в генераторе плазмы имеются частицы Al, C,  $K_2CO_3$  и  $Al_2O_3$ , образующегося в результате горения. В [5] установлено, что горение и испарение частиц начинается сразу при их выходе из зоны зажигания. Скорости горения частиц Al и C определялись по [6] и [7] соответственно.

Настоящая работа выполнена с целью сравнения результатов численных исследований в поли- и монодисперсном приближении с использованием модели [1, 2, 4]. Сравнение проводилось по неполноте сгорания топлива, а также по интегральной характеристике системы — электропроводности плазмы  $\sigma$ , зависящей от температуры и давления в камере сгорания и определяемой по [8]. Заметим, что углерод — главный компонент топлива — в основном определяет значение  $\sigma$ .

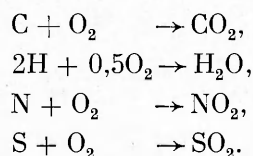
Аналитическая модель высокотемпературного горения угольных частиц [9] рассматривает реакции газификации, пиролиза, окисления на поверхности частиц, газофазные реакции вокруг них, передачу тепла

и массы во всех зонах реакции. При горении частиц учитывались следующие реакции:



Исследовано изменение механизма горения частицы по мере уменьшения ее размера. Установлено, что скорость горения мелких частиц не может быть определена экстраполяцией данных, полученных для крупных (диаметром более 100 мкм) частиц. Однако данная модель пригодна лишь для качественных оценок процессов, поскольку не учитывается распределение по размерам. К тому же постоянство температуры, давления и особенно концентрации окислителя приводит к тому, что массовая скорость горения крупных частиц значительно выше, чем мелких, что маловероятно при горении ансамбля полидисперсных частиц при изменяющемся окислительном потенциале. Поэтому прямое сравнение этой модели с экспериментом некорректно, хотя в работе и отмечен факт хорошего совпадения результатов с экспериментальными данными [10] для частиц радиусом 26—32 мкм.

Модель горения частиц угля [11] включает воспламенение частиц, испарение золы, конденсацию, газификацию и горение топлива, скорости скольжения и скорости передачи тепла и массы между газом и частицами. Эта модель, пожалуй, наиболее пригодна для МГД-каналов и камер сгорания при использовании порошкообразного топлива. Предполагается, что каждая горючая масса угля состоит из элементов С, Н, N и S. Кислород в угле рассматривается связанным с водой. Учитываются следующие реакции:



Проведенные в [11] расчеты показывают, что с ростом концентрации кислорода и температуры в камере на процесс горения начинает воздействовать скольжение, особенно в случае больших частиц (расчеты проводились для монодисперсных фракций диаметров  $d_c = 20, 41, 75, 100$  мкм). Также выяснено, что наилучшее превращение углерода имеет место при малых частицах одного размера, которые горят быстрее, но производят большее количество паров золы. Однако в МГДУ обычно используется электродный уголь, зольность которого незначительна. Кроме того, данная модель предполагает учет полидисперсности при помощи последовательных расчетов сгорания монодисперсных фракций, каждая из которых «забирает» на себя определенную часть окислителя. Некорректность такого подхода показана ниже.

Результаты численных исследований с использованием моделей [1, 2, 4], представленные на рис. 1, позволяют судить о степени влия-

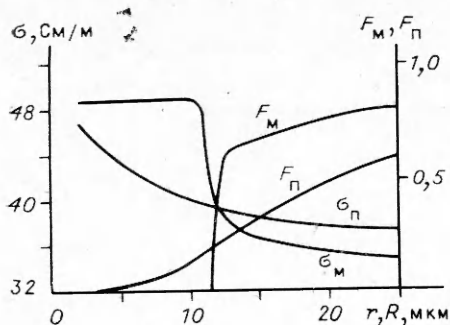


Рис. 1. Изменение электропроводности плазмы и неплотности сгорания углеродного топлива для поли- и монодисперсного подходов ( $\sigma_P, F_P$  и  $\sigma_M, F_M$  соответственно) в зависимости от начального размера частиц углерода  $R$  (при монодисперсной модели) и математического ожидания функции распределения углеродных частиц по размерам  $r$  (полидисперсная модель).

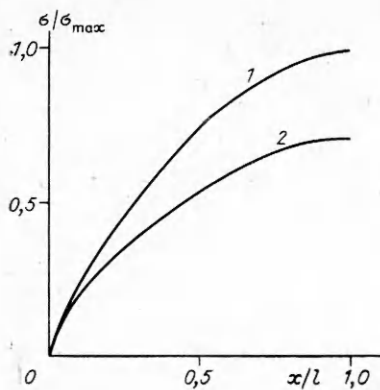


Рис. 2. Изменение относительной электропроводности плазмы вдоль канала генератора плазмы «Памир».

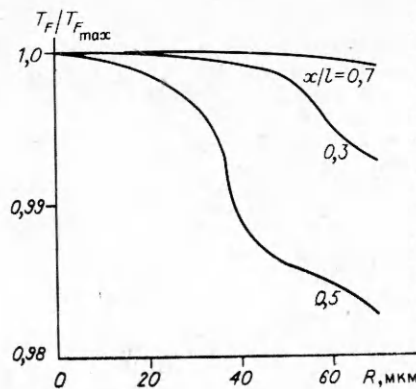


Рис. 3. Изменение относительной температуры микропламени вокруг алюминиевых частиц полидисперсного ансамбля в зависимости от его положения в генераторе плазмы.

ния неполноты сгорания углеродного топлива на электропроводность плазмы на выходе из камеры сгорания МГДУ в зависимости от начального радиуса частиц  $R$  (при монодисперсном подходе) и математического ожидания функции распределения по размерам  $r$  (при полидисперсном приближении). Видно, что для данного МГД-генератора неполнота сгорания монодисперсных частиц углерода  $F_m$  существенно влияет на поведение  $\sigma_m$ . При сжигании же полидисперсного ансамбля частиц кривые более плавные. Это свидетельствует о том, что полидисперсная модель, в отличие от монодисперсной, более консервативна по отношению к изменению скоростей горения частиц, неполноты сгорания топлива, окислительного потенциала, к выбору модели горения частиц и т. д. Тем самым подтверждается результат, полученный при расчетах эволюции полидисперсного ансамбля частиц алюминия в гетерогенном химическом реакторе [12].

На рис. 2 представлены результаты численных расчетов по монодисперсной модели [2]. Кривая 1 демонстрирует изменение  $\sigma$ , отнесенной к ее максимальному значению, вдоль по каналу генератора плазмы при сжигании монодисперсных фракций частиц углерода радиусов  $R = 15, 12, 10, 7, 5$  мкм, а кривая 2 — изменение  $\sigma/\sigma_{max}$  при сжигании этих же фракций в обратной последовательности. Как видно, недобор по электропроводности во втором случае составляет почти 30%. Это происходит вследствие большего недожога углерода, так как частицы меньших размеров «забирают» при горении значительную часть окислителя, поэтому более крупные частицы в этих условиях горят хуже. Но сжигание крупных частиц при большем окислительном потенциале (см. рис. 2, 1) резко сокращает процент недогорания, а следовательно,  $\sigma$  и температура в камере получаются больше.

В [13] в монодисперсном приближении проведены численные исследования формирования структуры зон горения вокруг частиц алюминия при их движении в таком же генераторе плазмы. Рис. 3 демонстрирует зависимость температуры (зона микропламени, в которой сгорают пары металла [14])  $T_F$ , отнесенной к ее максимальному значению  $T_{Fmax}$ , для полидисперсного ансамбля частиц Al. Видно, что по мере движения в генераторе плазмы горящих частиц значение  $T_F$  для более крупных частиц постепенно растет (очевидно, вследствие роста температуры частиц и газа по мере выгорания всех компонентов топлива). Ближе к выходу из генератора плазмы  $T_F$  практически неизменна для всех размеров полидисперсного ансамбля частиц, так как поток тепла от микропламени в газ по мере роста температуры газа становится все меньше. Как показали расчеты,  $T_{Fmax} \approx 4060$  К.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vlasov V. S., Durnev V. N., Novikov V. A. Tenth Int. Conf. on MHD Electrical Power Generation. Mathematical model and numerical study results of processes in metallized carbon combustor of geophysical MHD generator.— Tiruchirappalli (India), Dec. 4—8, 1989.— P. 180—182.
2. Vlasov V. S., Durnev V. N., Novikov V. A. Proc. of the First Asian — Pacific Int. Symp. on Combustion and Energy Utilization. The mathematical model and process numerical study results in carbon metallized fuel combustor of geophysical (MHD) generator.— Beijing (China). Oct. 15—18, 1990.— P. 348—351.
3. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах.— М.: Машиностроение, 1974.
4. Дурнев В. Н., Власов В. С. Движение полидисперсных ансамблей горящих частиц алюминия и углерода и ионизирующей присадки в камере порошкообразного МГД-генератора.— Деп. в ВИНТИ 22.01.91, № 353.
5. Власов В. С., Дурнев В. Н. Движение двухфазных продуктов сгорания в генераторе плазмы.— Деп. в ВИНТИ 24.08.89, № 5580.
6. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах.— М.: Наука, 1972.
7. Шорин С. Н. Динамика сгорания твердых топлив во взвешенном состоянии // Изв. ВТИ.— 1935.— № 2.— С. 16—22.
8. Гапонов Н. М., Недоспасов А. В., Побережский Л. П. и др. К расчету электропроводности продуктов сгорания // Письма в ЖТФ.— 1975.— 1, вып. 11.— С. 502—504.
9. Shadman F., Cavendish J. C. An analytical model for the combustion of coal particles // The Can. J. Chem. Engng.— 1980.— 58.
10. Baum M. M., Street P. J. // Combust. Sci. Technol.— 1971.— 3.— P. 231.
11. Peng X., Su Z., Sha C. et al. High temperature MHD combustor modelling. Fourth Fluid Mechanics, Plasma Dynamics and Laser Conf., May 12—14, 1986.— Atlanta, GA.
12. Дурнев В. Н., Терзи Е. Д. Эволюция горящих частиц в гетерогенном химическом реакторе: Материалы IX Всесоюз. симп. по горению и взрыву, Суздаль, 19—24 нояб. 1989.— Черногоровка: ОИХФ АН СССР, 1989.— С. 97—100.
13. Vlasov V. S., Durnev V. N. Proc. of the First Asian-Pacific Int. Symp. on Combustion and Energy Utilization. Dependence of burning zone structure around aluminium particles on burning of coal particles in plasma generator.— Beijing (China), Oct. 15—18, 1990.— P. 19—21.
14. Нигматуллин Р. Н. Динамика многофазных сред.— М.: Наука, 1987.

г. Томск

Поступила в редакцию 23/V 1991

УДК 546

*Б. М. Вольпе, В. В. Евстигнеев*

### СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В СВС-СИСТЕМЕ ТИТАН — АЛЮМИНИЙ — УГЛЕРОД

На основе методики «остановки фронта горения» изучены закономерности структурообразования в смесевой СВС-системе титан — алюминий — углерод, перспективной для создания пористой металлокерамики. Установлено, что горение изученной смеси может происходить в двух различных режимах, причем в основе тепловой неединственности режима горения лежит наличие в системе металлов с существенно различными температурами плавления. Найдены начальные условия реализации возможных режимов, характер и последовательность физико-химических процессов структурообразования. Показаны роль диспергирования частиц титана и наличие конкретных механизмов карбидообразования в высокотемпературном режиме, а также влияние режима горения на структуру конечного продукта.

При разработке нового материала, получаемого в режиме горения, необходимо изучить формирование структуры продукта, установить механизм и последовательность реакций и других процессов, протекающих в исследуемой системе при СВ-синтезе. Определение закономерностей эволюции реакционной среды от исходных компонентов до целевого материала позволяет найти оптимальные параметры проведения синтеза и оформить процесс горения в адекватную технологическую схему, т. е. решить задачу многопараметрической оптимизации свойств получаемого материала, в значительной степени структурно-зависимых.