

8. Ковальченко М. С. Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением.— Киев: Наук. думка, 1980.— 240 с.
9. Бучацкий Л. М., Столин А. М., Худяев С. И. Кинетика изменения распределения плотности при горячем прессовании вязкого пористого тела // Порошковая металлургия.— 1986.— № 9.— С. 37—42.
10. Скороход В. В., Штерн М. Б., Мартынова И. Ф. Теория нелинейно-вязкого и пластического поведения пористых материалов // Там же.— 1987.— № 8.— С. 23—31.
11. Дубровский С. М. К вопросу о строении неединичных диаграмм состав — свойство // ЖФХ.— 1957.— 31, № 12.— С. 2613—2618.
12. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций.— М.: Мир, 1962.
13. Баренлатт Г. И., Зельдович Я. Б. Промежуточные асимптотики в математической физике // УМН.— 1971.— 26. вып. 2.— С. 115—129.
14. Худяев С. И. К асимптотической теории стационарной волны горения // Хим. физика.— 1987.— 6, № 5.— С. 681—691.
15. Андриевский А. Р., Сивак И. И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе: Справочное издание.— Челябинск: Металлургия, 1989.— 368 с.
16. Новожилов Б. В. Скорость распространения фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе // Докл. АН СССР.— 1961.— 141, № 1.— С. 151—154.

*п. Черноголовка*

*Поступила в редакцию 13/II 1991*

УДК 533.6.011

*В. Н. Дурнев, В. С. Власов*

### ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ПОРОШКОВ А1 И С НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПЛАЗМЫ В ИМПУЛЬСНОМ МГД-ГЕНЕРАТОРЕ НА ПОРОШКООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ

Представлены результаты численных исследований псевдоплотности горящих монодисперсных частиц А1 и С в зависимости от их начальных радиусов, а также плотности окислителя при движении двухфазной смеси в генераторе плазмы импульсного МГД-генератора на порошкообразном топливе типа «Памир». Показана степень влияния выбора начального размера частиц на температуру газа и электропроводность в генераторе плазмы. Установлено, что выбор начального размера частиц углерода, в отличие от алюминия, существенно влияет на рост электропроводности плазмы.

Представленные в [1, 2] результаты численных исследований показали, что на электрофизические характеристики импульсного геофизического МГД-генератора большое влияние оказывают модели горения частиц алюминия и углерода. Цель настоящей работы — дальнейшая детализация этих исследований, а именно численное исследование влияния выбора начального размера частиц алюминия и углерода на электропроводность плазмы в МГД-генераторе на порошкообразном топливе.

Смесь частиц алюминия и углерода широко используется в качестве топлива в импульсных генераторах плазмы. В работах [1, 2] приводится физико-математическая модель процессов, происходящих в импульсном геофизическом генераторе плазмы типа «Памир» с расходом 25 кг/с, причем частицы карбоната калия (легко ионизирующаяся присадка), алюминия и углерода составляют 10, 15 и 75 % от массы горючего соответственно. Коэффициент избытка окислителя  $\alpha = 0,9$ . Скорости горения частиц А1 и С определялись согласно [3, 4], а электропроводность плазмы  $\sigma$  — по упрощенной методике Фроста [5]. Считается, что в результате горения в канале генератора плазмы образуются частицы оксида алюминия  $Al_2O_3$ , а также газы  $K_2CO_3$  и  $CO_2$ .

Примем, что частицы углерода горят чисто гетерогенно, а алюминия — в парофазном режиме, т. е. в тонком слое микропламени (с температурой  $T_F$ ), окружающем частицу [6], причем  $T_F$  выше температуры частицы  $T_p$  и газа  $T_1$ . Парофазный режим также предполагает, что пары топлива покидают каплю жидкого алюминия с энтальпией, соответствующей насыщенным парам топлива; окислитель (кислород) покидает газо-

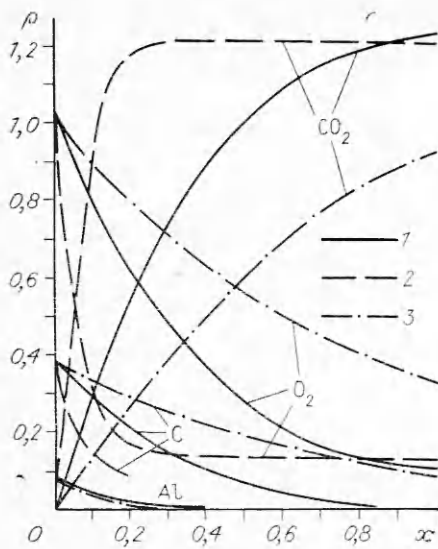


Рис. 1. Изменение псевдоплотностей алюминия и углерода, а также плотностей  $O_2$  и  $CO_2$  для  $r_C = 10$  (1), 5 (2) и 15 мкм (3);  $r_{Al} = 35$  мкм.

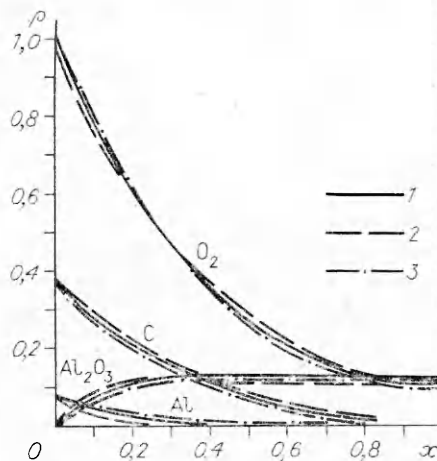


Рис. 2. Изменение псевдоплотностей алюминия, углерода, оксида алюминия и плотности  $O_2$  для  $r_{Al} = 35$  (1), 25 (2) и 50 мкм (3);  $r_C = 10$  мкм.

вую фазу с энтальпией  $i_1(p, T_1)$  ( $p$  — давление в камере), а продукты горения (частицы  $Al_2O_3$ ) приходят в газовую фазу с энтальпией  $i_3(p, T_1)$ . Учитывая, что зона пламени бесконечно тонка, интенсивность теплообмена между микропламенем и газовой и конденсированной фазами можно записать в виде

$$q_{F1} = 4\pi r_F^2 \beta_{F1} (T_F - T_1),$$

$$q_{F2} = 4\pi r_F^2 \beta_{F2} (T_F - T_2),$$

где  $\beta_{Fi}$  ( $i = 1, 2$ ) — коэффициенты теплоотдачи, отнесенные к единице поверхности пламени, а  $r_F$  — радиус зоны пламени, определяемые по [6].

Температура рассчитывается следующим образом:

$$T_F = T_{F0} + \frac{j_F \bar{x}_F}{4\pi r_F^2 (\beta_{F1} + \beta_{F2})}, \quad T_{F0} = \frac{\beta_{F1} T_1 + \beta_{F2} T_2}{\beta_{F1} + \beta_{F2}},$$

$$j_F = 4\pi r_{Al}^2 \rho_2^0 v / M_2.$$

Здесь  $j_F$  — интенсивность фазового перехода из расчета на 1 моль вещества;  $\rho_2^0$  — истинная плотность Al;  $v$  — скорость горения частиц Al;  $M_2$  — молярная масса Al;  $x_F$  — выделение тепла в зоне пламени от единицы массы, претерпевающей фазовый переход из-за реакции горения. Начальные размеры частиц:  $r_{Al} = 25, 35$  и 50 мкм,  $r_C = 5, 10$  и 15 мкм. На рис. 1 показано изменение определяемых по [7] псевдоплотностей для разных  $r_C$ . Как видно, при  $r_C = 5$  мкм частицы Al горят медленнее, что объясняется быстрым сгоранием углерода, а следовательно, и резким уменьшением количества окислителя. При этом столь же интенсивно растет плотность  $CO_2$ . С ростом  $r_C$  кривые становятся более плавными, причем алюминий горит более интенсивно.

Рис. 2 показывает, как меняются псевдоплотности частиц Al, C,  $Al_2O_3$  и плотность  $O_2$  при задании разных начальных радиусов частиц алюминия. Графики полностью соответствуют физике процесса взаимного влияния частиц Al и C при их горении. С увеличением  $r_{Al}$  псевдоплотность его в каждом сечении больше (соответственно меньше псевдоплотности  $Al_2O_3$  и C, поскольку C в данном случае горит в условиях большего количества окислителя). Поведение кривых плотности  $O_2$  также легко объяснимо. При  $r_{Al} = 25$  мкм количество  $O_2$  уменьшается быстрее, чем при

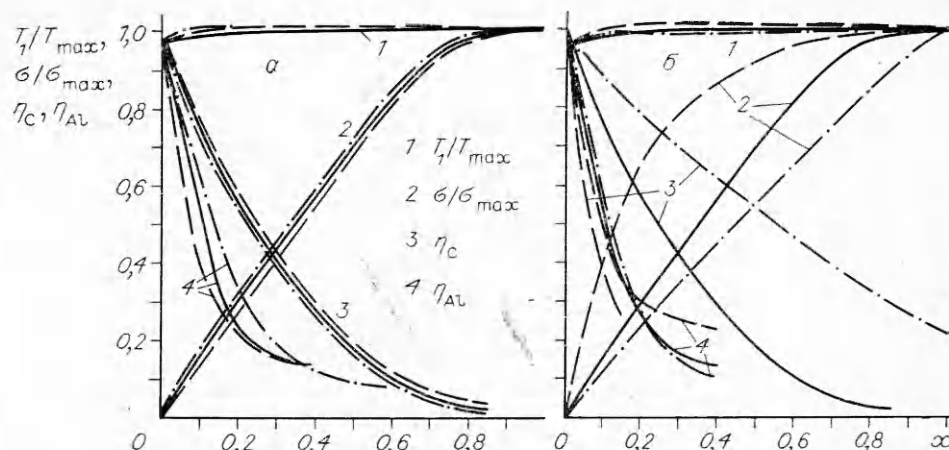


Рис. 3. Изменение температуры газа и электропроводности плазмы  $\sigma$ , неплотности сгорания алюминия  $\eta_{Al}$  и углерода  $\eta_c$ .  
 а —  $r_{Al}$ , мкм: — — — 35, — — — — 25 и — · — — — 50; б —  $r_C$ , мкм: — — — 10, — — — — 5 и — · — — — 15.

$r_{Al} = 35$  и  $50$  мкм, но когда алюминий сгорает, это уменьшение замедляется. В свою очередь, при больших значениях  $r_{Al}$  примерно до  $1/4$  длины канала окислителя в камере остается больше, чем в случае  $r_{Al} = 25$  мкм, но затем окислительный потенциал начинает убывать быстрее, поскольку крупные частицы Al горят дольше.

Изменение вдоль по каналу неплотности сгорания топлива, а также температуры газа и электропроводности плазмы для разных величин  $r_{Al}$  представлено на рис. 3, а. Видно, что электропроводность  $\sigma$  увеличивается с ростом начальных размеров частиц Al, которые успевают сгорать за время их пребывания в камере, увеличивается, видимо, вследствие того, что алюминиевые частицы больших начальных размеров горят медленнее, поэтому горение углерода при большем количестве окислителя обеспечивает более интенсивный рост  $T_1/T_{1max}$  в начале горения.

Рис. 3, б демонстрирует изменение тех же параметров для разных  $r_C$ . Выбор начального размера частиц углерода, в отличие от алюминия, влияет на рост  $\sigma$ : с уменьшением  $r_C$  величина  $\sigma/\sigma_{max}$  растет значительно быстрее. Объяснение аналогично сделанному выше — быстрое повышение температуры газа ведет к более интенсивному росту  $\sigma$ . На неплотности сгорания Al выбор  $r_C$  также влияет существенно. Причина ясна — более мелкие частицы углерода быстро сгорают, а уменьшение количества кислорода ведет к замедлению скорости горения алюминиевых частиц.

Таким образом, установлено, что на электропроводность в генераторе плазмы значительное влияние оказывает выбор начального размера частиц C, причем влияние от выбора  $r_{Al}$  гораздо меньше. Подобная детализация исследований взаимного влияния горения монодисперсных порошков алюминия и углерода в генераторе плазмы импульсного МГД-генератора дает возможность получить полную информацию о поведении всех характеристик данного генератора, позволяя тем самым разработать рекомендации по дисперсности используемых порошков топлива, что сокращает число дорогостоящих натурных экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Власов В. С., Дурнев В. Н. Движение двухфазных продуктов сгорания в генераторе плазмы. — Деп. в ВИНТИ, 24.08.89, № 5580 — В89.
2. 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. India, Dec. 4—8, 1989. — P. 180—182.
3. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972.

4. Шорин С. Н. Динамика сгорания твердых топлив во взвешенном состоянии // Изв. ВТИ.— 1935.— № 2.— С. 16—22.
5. Гапопов И. М., Недоспасов А. В., Побережский Л. П. и др. К расчету электропроводности продуктов сгорания // Письма в ЖТФ.— 1975.— 1, вып. 11.— С. 502—504.
6. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред.— М.: Наука, 1987.
7. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах.— М.: Машиностроение, 1974.

г. Томск

Поступила в редакцию 30/V 1990,  
после доработки — 16/V 1991

УДК 662.017.224.2

М. Х. Вергасов, А. Ф. Леонов, Н. А. Макаровец, Ю. А. Трофимов

### ОПТИЧЕСКАЯ НАКАЧКА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА ГАЗОВОЙ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУЕЙ

Оценены характеристики лазера на стекле, активированном неодимом, с оптической накачкой излучением ионизованного воздуха за фронтом ударной волны, возникающей при движении газовой кумулятивной струи со скоростью 10—12 км/с. Для определения времени механической стойкости конструкции проведена фоторегистрация излучения накачки и определена задержка между излучением накачки и выходом детонации на торец кумулятивного заряда, которая составляла около 150 мкс. Экспериментально определена энергия модельного лазера с подобным принципом накачки (3 Дж) при длительности импульса ~50 мкс.

Давно обоснована принципиальная возможность использования сильных ударных волн (УВ) в газах как высокотемпературного мощного излучателя. Создавая с помощью конденсированных ВВ ударные волны в плотных газах, можно получать большие потоки излучения при малых размерах устройств. Особенно эффективны в этом отношении УВ в тяжелых инертных газах.

Для получения сильных УВ в газах используются заряды ВВ с цилиндрическим кумулятивным каналом. Кумулятивная струя в канале таких зарядов образуется при схлопывании продуктов детонации (газовая кумуляция). В работе [1] показано, что скорость струи  $u$  линейно связана со скоростью детонации  $v$  соотношением

$$\frac{n^2}{n^2-1} = (x-1)^2 + \frac{n^2}{n^2-1} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/n} \left[ (\gamma+1) \frac{\rho_0}{\rho_{ВВ}} \right]^{\frac{n-1}{n}} x^{\frac{2n-2}{n}}, \quad (1)$$

где  $x = u/v$  — безразмерная скорость струи;  $\gamma$  — эффективный показатель адиабаты ударно-нагретого газа;  $\rho_0$  — начальная плотность газа;  $n$  — показатель в уравнении состояния продуктов взрыва  $p = A\rho^n$ .

Приведенное решение достаточно правильно описывает процессы детонации в заряде ограниченных размеров. После инициирования детонационная волна выходит на дно канала заряда и возбуждает УВ в газе. В результате последующего схлопывания продуктов в канале образуется опережающая детонационный фронт струя. Скорость струи растет, соответственно растет скорость УВ. Пройдя путь ~8—10 диаметров канала, УВ набирает максимальную скорость и сохраняет ее при дальнейшем движении.

Распространение сильной УВ в газе сопровождается интенсивным свечением. Несмотря на кратковременность процесса это свечение всегда наблюдается визуально в виде ослепительно яркой вспышки в момент взрыва. Газ, находившийся при атмосферном давлении и комнатной температуре, испытывает в УВ приблизительно десятикратное сжатие и нагревается в зависимости от амплитуды УВ до температуры  $T \approx 10^4$  К. За фронтом УВ до поверхности разрыва воздух при таких условиях полностью диссоциирован и в значительной степени ионизован [3]. Излуча-