

ИМПУЛЬСНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕДОРАСШИРЕННЫХ ДВУХФАЗНЫХ СТРУЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

© 2006 А.Н. Первышин, Е.А. Буланова

Самарский государственный аэрокосмический университет

Разработана математическая модель одномерного движения частиц в потоке продуктов сгорания газогенератора сверхзвуковых струй (ГСС). Получены зависимости импульсных и энергетических характеристик недорасширенной сверхзвуковой двухфазной струи от параметров ГСС и частиц. Проведено исследование влияния параметров на оптимум кинетической энергии частиц.

В настоящее время широко применяются такие струйные технологии, как нанесение покрытий сверхзвуковой струей продуктов сгорания, струйно-абразивная обработка и резка материалов [1]. Эффективность таких процессов зависит как от импульсных так и энергетических характеристик твердых частиц, транспортируемых газовым потоком продуктов сгорания. Поэтому расчетная оценка скорости (импульса, кинетической энергии) на всех этапах разработки струйных технологий способствует поиску оптимальных решений.

Рассмотрим поток сферических частиц, движущийся со скоростью w_i в потоке продуктов сгорания, скорость которого w_α . Известны параметры частиц: диаметр d_i , плотность вещества ρ_i , расход \dot{m}_i , также известны все термодинамические параметры потока продуктов сгорания: вязкость η_α , давление p_α , температура T_α , плотность ρ_α , расход \dot{m}_α . В результате взаимодействия частиц с газовым потоком происходит обмен импульсом и соответствующее изменение скоростей. Уравнение движения частиц можно записать, используя закон сохранения импульса и второй закон Ньютона

$$\dot{m}_\alpha \cdot \vec{w}_\alpha + \sum_{i=1}^N \dot{m}_i \cdot \vec{w}_i = Const$$

$$\vec{P}_i = m_i \cdot \frac{d\vec{w}_i}{d\tau}, \quad (1)$$

где \vec{P}_i - сила действующая на частицы со стороны потока продуктов сгорания.

В дальнейшем при рассмотрении воздействия газового потока на частицы будем учитывать лишь аэродинамическую силу, т.к. действие остальных сил пренебрежимо мало. Величина аэродинамической силы оп-

ределяется скоростью частицы относительно потока продуктов сгорания [2]:

$$\vec{P} = \frac{1}{2} \cdot c_i \cdot f_m \cdot \rho_\alpha \cdot (\vec{w}_\alpha - \vec{w}_i) \cdot |\vec{w}_\alpha - \vec{w}_i|, \quad (2)$$

где f_m - площадь поперечного сечения частицы, $c_i = f(\text{Re}_{\text{омн}})$ - коэффициент сопротивления частицы, являющийся функцией числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{|\vec{w}_\alpha - \vec{w}_i| \cdot d_i \cdot \rho_\alpha}{\eta_\alpha}.$$

Из результатов многочисленных экспериментов со сферическими частицами, в соответствии со значениями коэффициента сопротивления, выделим три диапазона значений числа Рейнольдса [3]:

- 1) $\text{Re} \geq 500$, где $c_i \approx 0,44$;
- 2) промежуточный диапазон: $0,2 \leq \text{Re} \leq 500$;
- 3) $\text{Re} \leq 0,2$, $c_i = \frac{24}{\text{Re}}$ - закон Стокса.

Модифицируя закон Стокса, запишем коэффициент сопротивления в форме, пригодной для всех диапазонов числа Рейнольдса

$$c_i = \frac{\Psi_i}{\text{Re}^{n_i}}$$

В этой форме экспериментальные данные [3] для «мелких» частиц с $\text{Re} \leq 300$ хорошо описываются при $n_i = 1$, а $\Psi = f(\text{Re})$, а для частиц с Re от 30 до 1000 с достаточной точностью можно считать $n = \frac{1}{2}$,

$$\Psi = 13, \text{ т.е. } c_i = \frac{\Psi_i}{\sqrt{\text{Re}}}. \quad (3)$$

Диапазон «средних» частиц наиболее распространен в струйных технологиях, поэтому в дальнейшем будем использовать коэффициент сопротивления в форме (3).

Рассмотрим одномерную модель движения частиц в газовом потоке, считая, что все частицы имеют одинаковый диаметр, а «загромождением» потока продуктов сгорания дисперсной фазой можно пренебречь, т.к. $\rho_i \gg \rho_\alpha$. При прохождении некоторого пути dx частицей происходит изменение

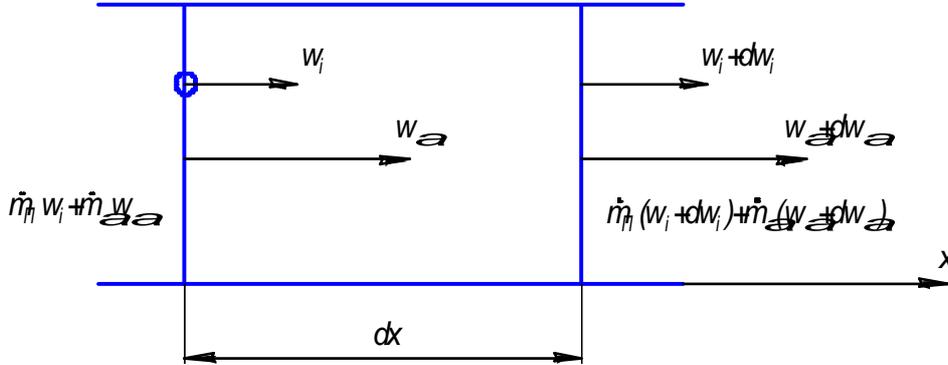


Рис.1. Схема одномерного движения частиц в потоке продуктов сгорания

Или в интегральной форме

$$\int_{w_{\alpha 0}}^{w_\alpha} dw_\alpha = -\gamma \int_{w_{i0}}^{w_i} dw_i ;$$

$$w_\alpha = w_{\alpha 0} - \gamma(w_i - w_{i0}), \quad (4)$$

где индексом «0» обозначены начальные параметры рабочих тел.

Сопоставляя (1) и (2), с учетом (3) и (4), получим дифференциальное уравнение движения частицы:

$$\frac{dw_i}{d\tau} = A_1 [w_{\alpha 0} - \gamma \cdot (w_i - w_{i0}) - w_i]^{1.5}, \quad (5)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{\xi_1}{d_i^{1.5}}; \xi_1 = \frac{3}{4} \cdot \frac{\psi \cdot \eta_\alpha^{0.5} \cdot \rho_\alpha^{0.5}}{\rho_i}.$$

Обозначим $w_{\alpha 0} + \gamma \cdot w_{i0} = K$, тогда

$$\frac{dw_i}{d\tau} = A_1 \cdot [K - w_i \cdot (\gamma + 1)]^{1.5} \quad (6)$$

Перепишем (6) в интегральной форме

$$\int_{w_{i1}}^{w_{i2}} \frac{dw_i}{[K - w_i \cdot (\gamma + 1)]^{1.5}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} A_1 d\tau.$$

После проведения ряда и преобразований получим аналитическую зависимость скорости частицы от времени взаимодействия

$$w_{i2} = \frac{K}{\gamma + 1} - \frac{4B^2}{(\gamma + 1) \cdot [A_1 \cdot B \cdot \Delta\tau \cdot (\gamma + 1) + 2]^2}, \quad (7)$$

$$\text{где } B = \sqrt{K - w_{i0} \cdot (\gamma + 1)}.$$

импульса частицы и импульса газового потока.

$$\frac{\dot{m}_n}{\dot{m}_\alpha} = -\frac{dw_\alpha}{dw_i} = \gamma,$$

где γ - так называемый коэффициент запыленности, равный отношению расходов потоков частиц и продуктов сгорания (рис.1).

Часто расчет движения частиц нужно вести с момента их ввода в поток продуктов сгорания, т.е. $w_{i1} = w_{i0}$, причем, т.к. $w_{\alpha 0} \gg w_{i0}$, в большинстве случаев можно считать, что $w_{i0} = 0$. Тогда (7) упрощается

$$w_i = \frac{dx_i}{d\tau} = \frac{w_{\alpha 0}}{\gamma + 1} - \frac{4w_{\alpha 0}}{(\gamma + 1)[A_1 \tau (\gamma + 1) \sqrt{w_{\alpha 0}} + 2]^2}. \quad (8)$$

Интегрируя (8) можно определить положение частицы в зависимости от времени

$$x = \frac{K\tau}{1 + \gamma} - \frac{2B^2\tau}{(1 + \gamma)[A_1(1 + \gamma)B\tau + 2]}. \quad (9)$$

Сопоставление (8) и (9) позволяет получить в явном виде зависимость скорости частицы от координаты

$$w_i = \frac{1}{\gamma + 1} \left\{ w_{\alpha 0} - \frac{4w_{\alpha 0}}{A_1(\gamma + 1) \left[(\gamma + 1)x + \sqrt{(\gamma + 1)^2 x^2 + \frac{8x\sqrt{w_{\alpha 0}}}{A_1}} \right] + 4\sqrt{w_{\alpha 0}}} \right\}^2 \quad (10)$$

Сопоставление (10) и (4) позволяет найти и скорость продуктов сгорания в зависимости от координаты:

$$w_\alpha = \frac{1}{\gamma + 1} \left\{ w_{\alpha 0} + \gamma \cdot \frac{4w_{\alpha 0}}{A_1(\gamma + 1) \left[(\gamma + 1)x + \sqrt{(\gamma + 1)^2 x^2 + \frac{8x\sqrt{w_{\alpha 0}}}{A_1}} \right] + 4\sqrt{w_{\alpha 0}}} \right\}^2 \quad (11)$$

Предложенные уравнения определяют зависимость скорости потока частиц w_i от параметров активного потока, а именно, его скорости в месте ввода частиц $w_{\alpha 0}$, его вязкости η_α и плотности ρ_α ; от параметров дисперсной среды: диаметра частиц d_i и плотности материала частиц ρ_i ; от коэффициента, связывающего расход дисперсной среды и расход активного потока γ ; от конструктивного параметра l – длины разгонного участка:

$$w_i = f(w_{\alpha 0}, \eta_\alpha, \rho_\alpha, \gamma, d_i, \rho_i, l). \quad (12)$$

Импульс M_i и кинетическая энергия E_i потока частиц плюс ко всему зависят от массовой характеристики дисперсной среды – расхода \dot{m}_n :

$$M_i, E_i = f(w_{\alpha 0}, \eta_\alpha, \rho_\alpha, \gamma, d_i, \rho_i, l, \dot{m}_n). \quad (13)$$

В ряде струйных технологий поток продуктов сгорания организуется генератором сверхзвуковых струй (ГСС) ракетного типа. Ввод частиц производится в минимальном сечении сопла, где реализуется звуковая скорость потока, с последующим разгоном частиц в свободной недорасширенной струе продуктов сгорания (рис.2).

$$w_i = f(\alpha, p_K, K_{мст}, \gamma, d_i, \rho_i, l), \quad (14)$$

$$M_i, E_i = f(\alpha, p_K, K_{мст}, \gamma, d_i, \rho_i, l, \dot{m}_n). \quad (15)$$

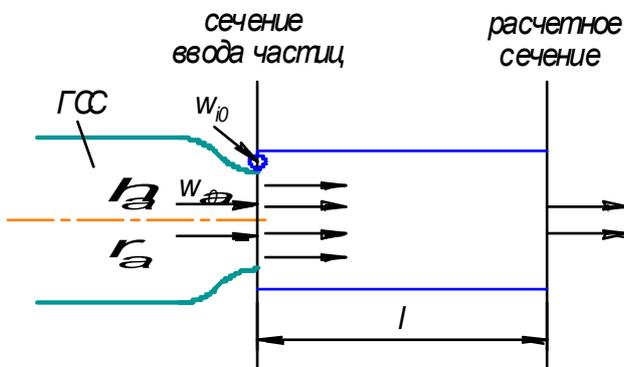


Рис.2. Схема ввода частиц в поток продуктов сгорания

В этих выражениях отражается влияние режимных параметров ГСС (коэффициента избытка окислителя α , давления в камере сгорания p_K), и системы подачи частиц \dot{m}_n , вида топлива $K_{мст}$ и физико-механических свойств дисперсной фазы (d_i, ρ_i), а также конструктивного параметра l .

При расчете конкретных установок, работающих на этом принципе, выбор длины разгонного участка определен конструктивным решением. С увеличением длины разгонного участка возрастает скорость, им-

пульс и кинетическая энергия частиц, при одновременном торможении потока продуктов сгорания (рис. 3).

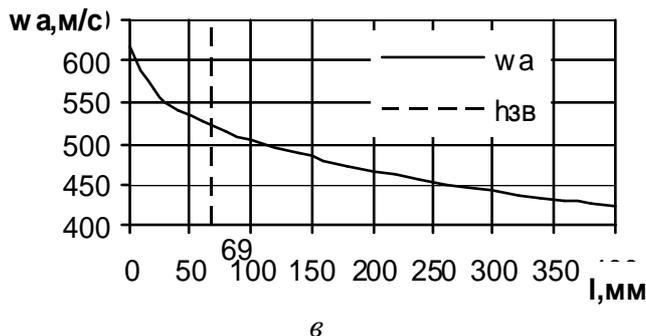
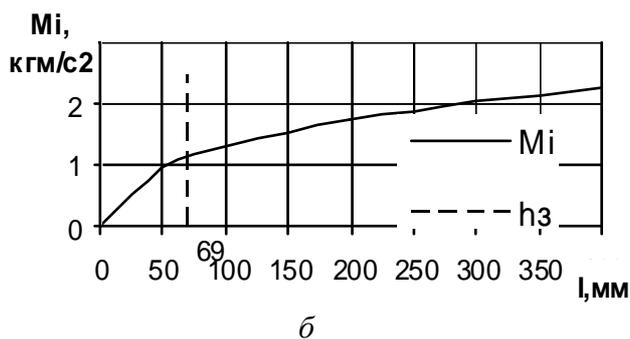
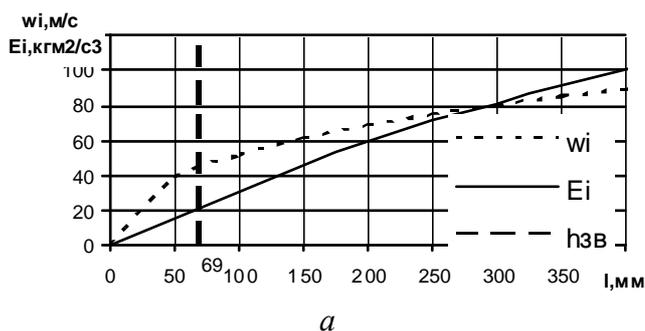


Рис.3. Зависимость скорости и кинетической энергии частиц (а), импульса частиц (б) и скорости продуктов сгорания (в) от длины разгонного участка l .

Расчет выполнен для топлива пропан-воздух при $\alpha = 1,5$; $p_K = 3,5$ атм. Параметры дисперсной среды: $\dot{m}_n = 25$ г/с; $w_{i0} = 0$; $\rho_i = 2300$ кг/м³; $d_i = 0,6$ мм; $\gamma = 2,2$.

В расчетах не учитывалась волновая структура струи и ее тепло- массообмен с окружающей средой. На значительных расстояниях эти эффекты могут привести даже к торможению дисперсной фазы. Поэтому при оценке сравнительных возможностей активного потока по разгону дисперсной фазы необходимо длину разгонного блока ограничить размерами каких-либо характерных участков струи, связанных с параметрами этого потока. В этом смысле наиболее представительным, на наш взгляд, является звуковой участок струи, картина течения на ко-

тором при отсутствии дисперсной фазы достаточно хорошо изучена.

Длина звукового участка определяется степенью недорасширения активного потока

$n_a = \frac{p_K}{p_H} \cdot \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n}{n-1}}$, где n - показатель энтропии и диаметром минимального сечения сопла $d_{кр}$ [4]:

$$h_{зв} = d_{кр} \cdot (4,4 \cdot n_a + 3) \cdot e^{0,11n_a}. \quad (16)$$

Изменение коэффициента избытка окислителя приводит к изменению скорости потока продуктов сгорания $w_{\alpha 0}$, но при постоянном диаметре минимального сечения сопла и постоянном расходе топлива \dot{m}_α изменяется также p_K ; n_a , а значит и $h_{зв}$ (16). Для этих условий при ограничении участка разгона «звуковым» максимальное значение всех параметров эффективности достигается при $\alpha = 1,0$ (рис.4).

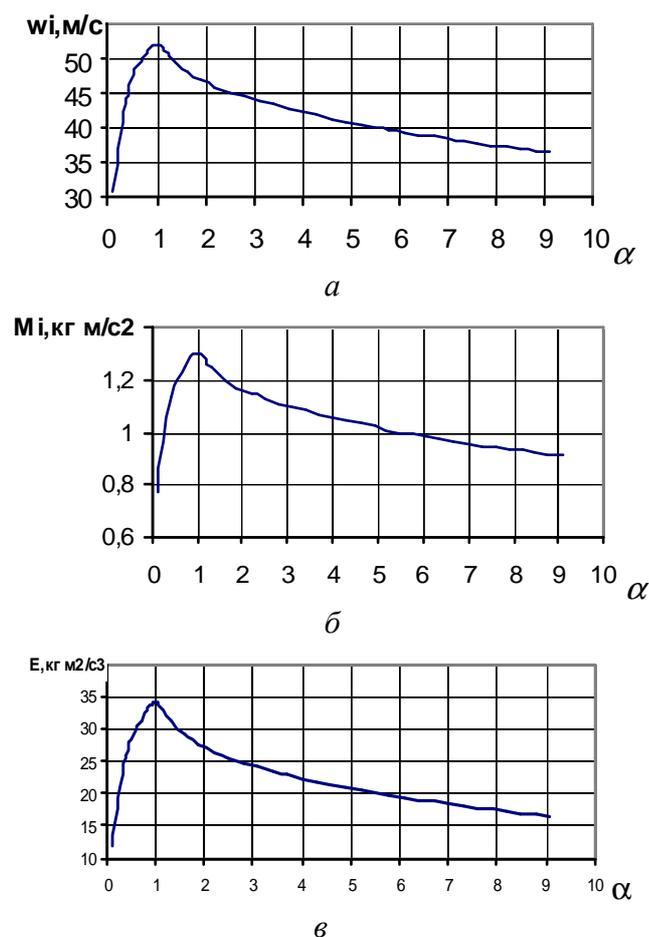


Рис.4. Зависимость скорости (а), импульса (б) и кинетической энергии (в) частиц SiO_2 от коэффициента избытка воздуха α

В устройствах для струйных технологий распространено использование «бедных» смесей ($\alpha > 1,0$) из экономических соображений и обеспечения надежности горения и теплового состояния конструкции. Поэтому все последующие расчеты ведутся для $\alpha = 1,5$.

Коэффициент запыленности γ при постоянном \dot{m}_α определяет величину \dot{m}_n . Причем при $\gamma = 0$ решение для потока частиц (10) соответствует решению одиночной частицы [5].

С ростом γ скорость частиц w_i уменьшается, а импульс растет (рис. 5). Это приводит к появлению максимума энергии дисперсной среды при некотором коэффициенте запыленности γ_{opt} .

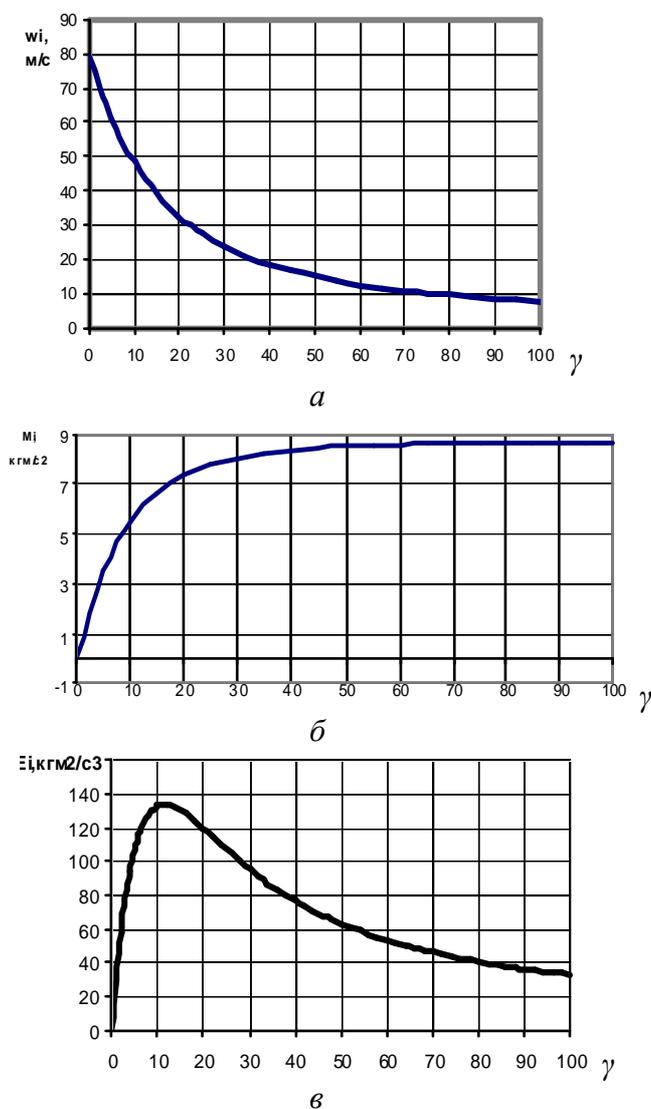


Рис.5. Зависимость скорости (а), импульса (б) и кинетической энергии (в) частиц SiO_2 от коэффициента запыленности γ

Величина γ_{opt} не зависит от α в диапазоне 0,5...1,5 (рис. 6). Но с ростом p_k коэффициент γ_{opt} уменьшается при общем росте энергетике (рис. 7), а с ростом d_i коэффици-

ент γ_{opt} увеличивается при падении энергетике дисперсной среды (рис. 8).

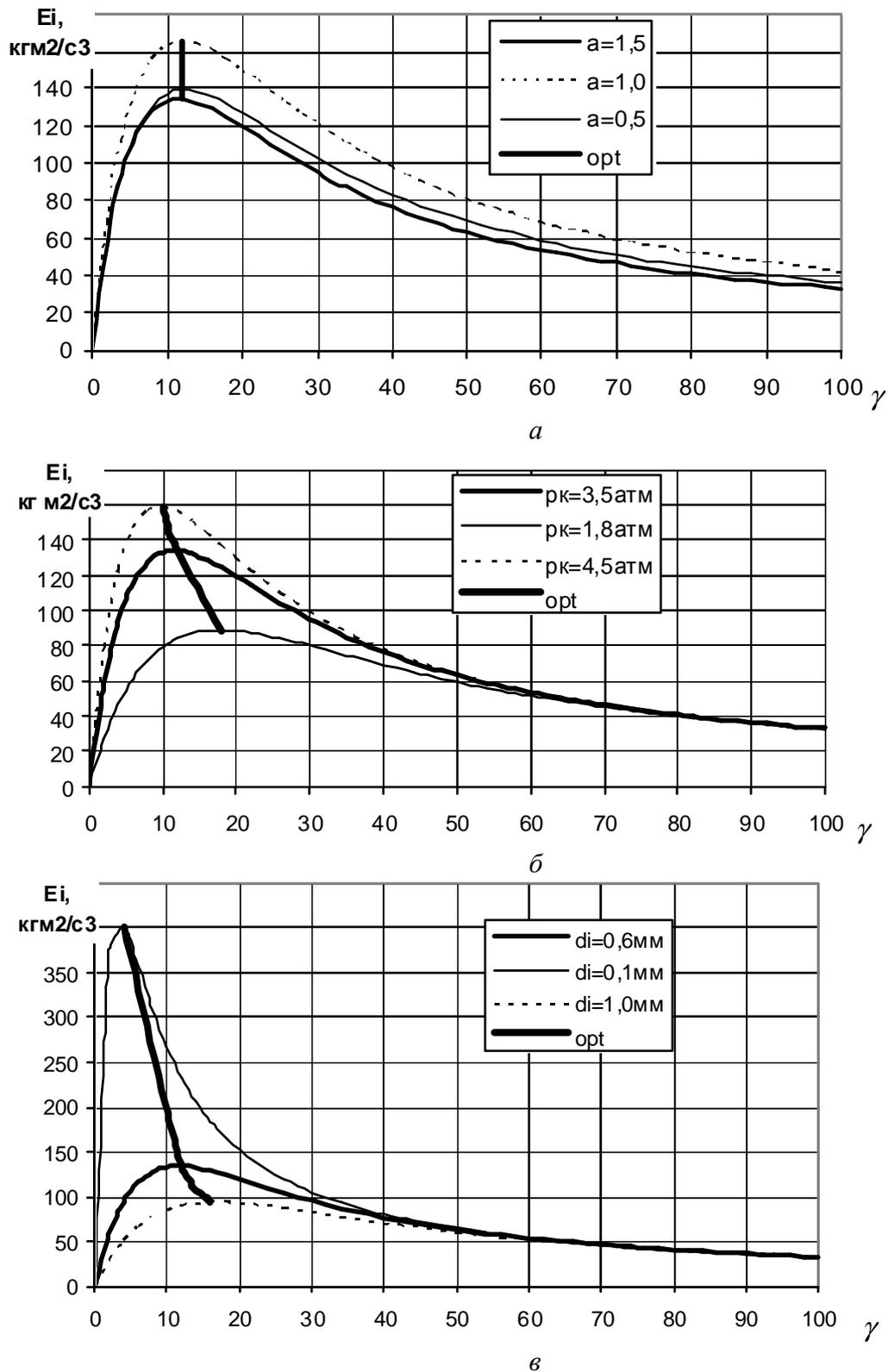


Рис. 8. Зависимость кинетической энергии импульса частиц SiO_2 от коэффициента запыленности γ при варьировании параметров α (а), p_k (б), d_i (в)

На основе полученных зависимостей разработана математическая модель движения твердых частиц в потоке продуктов сгорания. Данная модель может применяться для исследования влияния параметров потока и частиц на импульсные характеристики частиц.

Наличие оптимума коэффициента запыленности γ получило качественное подтверждение при испытаниях устройства для струйной абразивной обработки.

Список литературы

1. Проблемы и перспективы развития двигателестроения в поволжском регионе /Труды международной научно-технической конференции 17-18 сентября 1997г./ Первышин А.Н. Энергетика струйных технологий. Самара: СГАУ,1997.- Вып.1. – 4 с.

2. Венедиктов В.Д. Турбины и реактивные сопла на двухфазных потоках. М.: Машиностроение, 1969.- 195с.

3. Стернин Л.Е.,Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. М.: Машиностроение,1994.-320с.

4. Анцупов А.В. Исследование параметров нерасчетной сверхзвуковой струи газа.// Журнал технической физики.1974.Т.44. – 372-379с.

5. Проблемы и перспективы развития двигателестроения в поволжском регионе /Труды международной научно-технической конференции 26-27 июня 2003г./ Жукова Л.Ю, Первышин А.Н., Ткаченко А.Ю. К вопросу о скорости движения твердой частицы в газовом потоке. Самара: СГАУ,2003.- Вып.2. – 2с.

IMPULSE & ENERGETIC CHARACTERISTICS OF INSUFFICIENTLY EXPANDED TWO-PHASE COMBUSTION-GAS STREAM

© 2006 A.N. Pervishin, E.A. Bulanova

Samara State Aerospace University

Mathematical model of a one-measuring motion of particles in combustion-gas stream of hypersonic stream generator (HSG) has been developed. Dependences of impulse and energetic characteristics of inoverexpanded two-phase from process parameters are received. Research influence of some parameters on the optimum of particles kinetic energy carried out.