

УДК 621.5

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ПОТОКА ЧАСТИЦ В СТРУЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

© 2008 Е. А. Буланова, А. Н. Первышин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Разработана математическая модель движения частиц абразива в потоке продуктов сгорания газогенератора сверхзвуковых струй с учетом полидисперсности потока частиц. Получены выражения для расчета кинетических характеристик двухфазного потока. Исследовано влияние параметров полидисперсного потока частиц абразива и режимных параметров газогенератора на кинетические характеристики.

Математическая модель, поток, частицы, скорость, продукт сгорания, зависимость

Развитие теории многофазных потоков вызвано важными практическими приложениями в задачах авиационной и ракетной техники, атомной энергетики, турбостроения, метеорологии, химической технологии и т.д. [1] Такие струйные технологии, как нанесение покрытий сверхзвуковой струей продуктов сгорания и струйно-абразивная обработка материалов также основаны на использовании двухфазных систем (газ - частицы).

Математическая модель описывает одномерное движение потока частиц на данном участке.

Модель основана на описании сферических частиц, движущихся со скоростью w_i в потоке продуктов сгорания, скорость которого w_α . Плотность вещества частиц ρ_i , расход \dot{m}_i , также известны термодинамические параметры потока продуктов сгорания: вязкость η_α , давление p_α , температура T_α , плотность ρ_α , расход \dot{m}_α .

Реальный поток частиц абразива, применяемого в струйно-абразивной обработке, представляет собой полидисперсную смесь. По этой причине возникла необходимость учесть полидисперсность в математической модели.

Предварительные исследования математической модели показали целесообразность использования подхода Эйлера [2]. Рассмотрим две границы произвольно взятого бесконечно малого объема движущегося двухфазного потока. Расстояние между

границами равно Δx . Полидисперсный поток частиц содержит k групп различного диаметра $d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \dots, d_{ik}$. Движение считаем установившимся – в одном месте пространства все параметры двухфазного потока постоянны, также как и число частиц каждой группы $N_{i1}, N_{i2}, N_{i3}, \dots, N_{ij}, \dots, N_{ik}$ постоянно для любой границы объема.

Из совместного решения закона сохранения импульса и второго закона Ньютона, куда входит только сила аэродинамического сопротивления, получаем выражения для расчета приращений скорости потока продуктов сгорания (1) и скорости потока частиц (2):

$$\Delta w_\alpha = -\Delta x \cdot \sum_{j=1}^n \frac{(w_\alpha - w_{ij})^{1.5}}{w_{ij}} \cdot A_{ij} \cdot \gamma_{ij}, \quad (1)$$

$$\Delta w_{ij} = \Delta x \cdot A_{ij} \cdot \frac{(w_\alpha - w_{ij})^{1.5}}{w_{ij}}, \quad (2)$$

$$\text{где } A_{ij} = \frac{\xi_i}{d_{ij}^{1.5}}, \quad \xi_i = \frac{3}{4} \cdot \frac{\psi \cdot \eta_\alpha^{0.5} \cdot \rho_\alpha^{0.5}}{\rho_i}, \quad \gamma_{ij} = \frac{\dot{m}_{ij}}{\dot{m}_\alpha}$$

- так называемый коэффициент запыленности, равный отношению расходов потоков частиц каждой фракции различного диаметра и продуктов сгорания.

Сами скорости находятся по следующим выражениям:

$$w_{\alpha}^n = w_{\alpha 0}^{n-1} + \Delta w_{\alpha}^n, \quad (3)$$

$$\{w_{ij}^n\} = \{w_{ij}^{n-1} + \Delta w_{ij}^n\}, \quad (4)$$

где n - число шагов.

Ранее разработанная методика расчета кинетических характеристик монодисперсного потока частиц и потока продуктов сгорания основана на аналитических выражениях. Данные выражения имеют вид зависимости

$$w_i = f(w_{\alpha 0}, \eta_{\alpha}, \rho_{\alpha}, \gamma, d_i, \rho_i, x). \quad (5)$$

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

$$M_i, E_i = f(w_{\alpha 0}, \eta_{\alpha}, \rho_{\alpha}, \gamma, d_i, \rho_i, x, \dot{m}_i) \quad (6)$$

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. В этом случае зависимости (5, 6) примут вид:

$$w_i = f(\alpha, p_K, K_{mCT}, \gamma, d_i, \rho_i, l), \quad (7)$$

$$M_i, E_i = f(\alpha, p_K, K_{mCT}, \gamma, d_i, \rho_i, l, \dot{m}_i). \quad (8)$$

В этих выражениях отражается влияние режимных параметров ГСС (коэффициент избытка окислителя α , давление в камере сгорания p_K) и системы подачи частиц (\dot{m}_i), вид топлива (K_{mCT}) и физико-механических свойств дисперсной фазы (d_i, ρ_i), а также конструктивного параметра l [3].

В свою очередь, полидисперсность потока в монодисперсной модели можно учесть путем усреднения параметров по характерному размеру d_i , сохраняя аналити-

ческий вид выражений. Таким образом, в газовом потоке будет присутствовать дисперсная фаза одного диаметра, соответствующего гранулометрическому составу полидисперсной смеси из условия постоянства расхода.

Пусть N_{ij} - число частиц определенного размера d_{ij} :

$$N_1 \rightarrow d_1;$$

$$N_2 \rightarrow d_2;$$

...

$$N_i \rightarrow d_i.$$

Соответственно сумма всех чисел равна общему числу частиц:

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n N_i. \quad (9)$$

Суммарная масса твердой фазы равна

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n M_i. \quad (10)$$

В свою очередь, масса средней частицы равна

$$\bar{m} = \frac{M_{\Sigma}}{N_{\Sigma}} = \frac{\pi \cdot \bar{d}^3}{6} \cdot \rho_i. \quad (11)$$

Подставляем (10) в (11) и получаем

$$\frac{M_{\Sigma}}{N_{\Sigma}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{N_{\Sigma}}; \quad \frac{\pi \cdot \bar{d}^3}{6} \cdot \rho_i = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{N_{\Sigma}}. \quad (12)$$

Отсюда найдем выражение для диаметра средней частицы:

$$\bar{d} = \sqrt[3]{\left(\frac{6 \cdot M_{\Sigma}}{N_{\Sigma}}\right) \cdot \frac{1}{\pi \cdot \rho_i}}. \quad (13)$$

Далее необходимо перейти к величинам массовых долей, характеризующих полидисперсность фазового потока:

$$q_i = \frac{M_i}{M_\Sigma} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} m_i &= q_i \cdot \sum M_i; \\ N_i \cdot m_i &= q_i \cdot M_\Sigma; \\ N_i &= q_i \cdot \frac{M_\Sigma}{m_i}; \\ N_\Sigma &= \sum_{i=1}^n q_i \cdot \frac{M_\Sigma}{m_i} = M_\Sigma \cdot \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{m_i}; \\ \frac{M_\Sigma}{N_\Sigma} &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{m_i}} \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя (15) в (13), получим конечную формулу для вычисления диаметра средней частицы:

$$\bar{d} = \sqrt[3]{\frac{6}{\sum \frac{q_i}{m_i}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot \rho_i}} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi \cdot \rho_i} \cdot \frac{1}{\sum \frac{q_i}{d_i^3}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot \rho_i}} = \sqrt[3]{\frac{1}{\sum \frac{q_i}{d_i^3}}} \quad (16)$$

В данном случае необходимо задавать лишь распределение q_{ij} частиц по характерному размеру d_{ij} , и далее вести расчет по монодисперсной модели с помощью выражений.

Оптимальному режиму работы генератора сверхзвуковых струй на топливе воздух-пропан для струйно-абразивной обработки соответствуют следующие параметры: $K_{мСТ} = 15.7$, $\alpha = 1.0$, $p_K = 4 \text{ атм}$.

Как показывают экспериментальные данные по определению гранулометрического состава абразива (Si_2O_3), максимальной концентрации содержания в смеси соответствуют частицы диаметра d_{ij} от 0,45мм до 0,55мм. Таким образом, для исследования модели движения полидисперсного потока частиц в струе продуктов сгорания взято распределение числа частиц (концентраций γ_{ij}) по закону Гаусса (рис. 1). Полидисперсный поток разбит на 8 групп диаметров частиц.

γ_{ij}

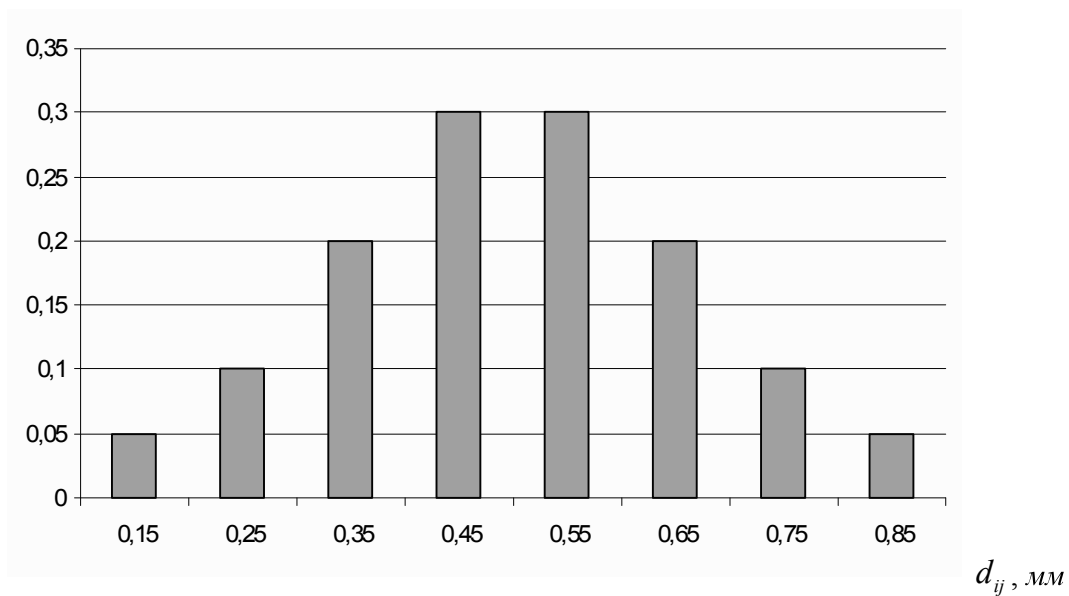


Рис. 1. Схема ввода частиц в поток продуктов сгорания

Результаты расчета кинетических параметров потока частиц по модели полидисперсной смеси в виде графиков представлены на рис. 2, 3.

Результаты расчета кинетических параметров потока частиц и газа по среднему диаметру представлены на рис. 4...7. Средний диаметр определен по выражению (16): $\bar{d} = 0,314 \text{ мм}$.

W_{ij} ,
м/с

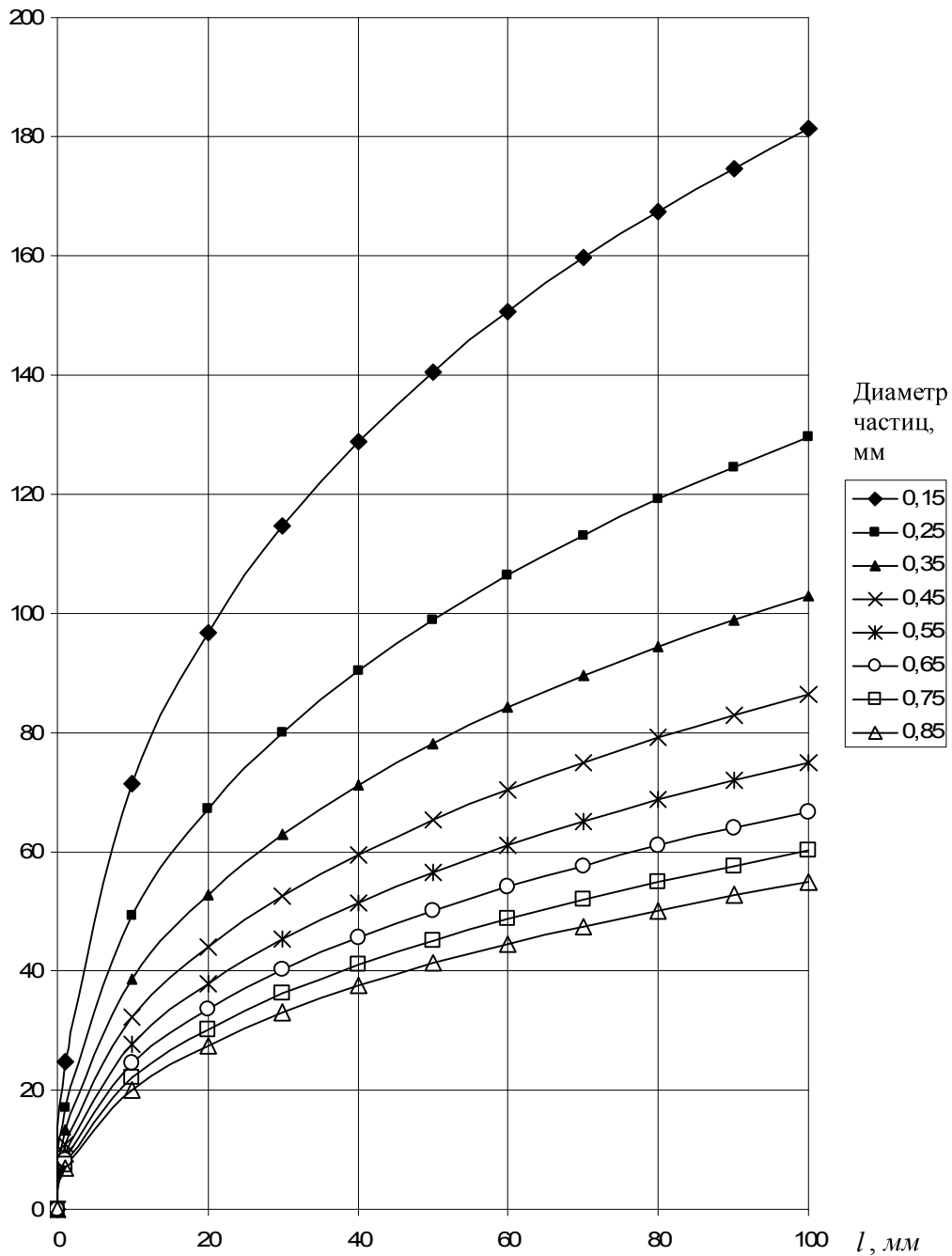


Рис. 2. Зависимость скорости частиц различного диаметра (в миллиметрах) от расстояния до преграды l , $\gamma = 2$

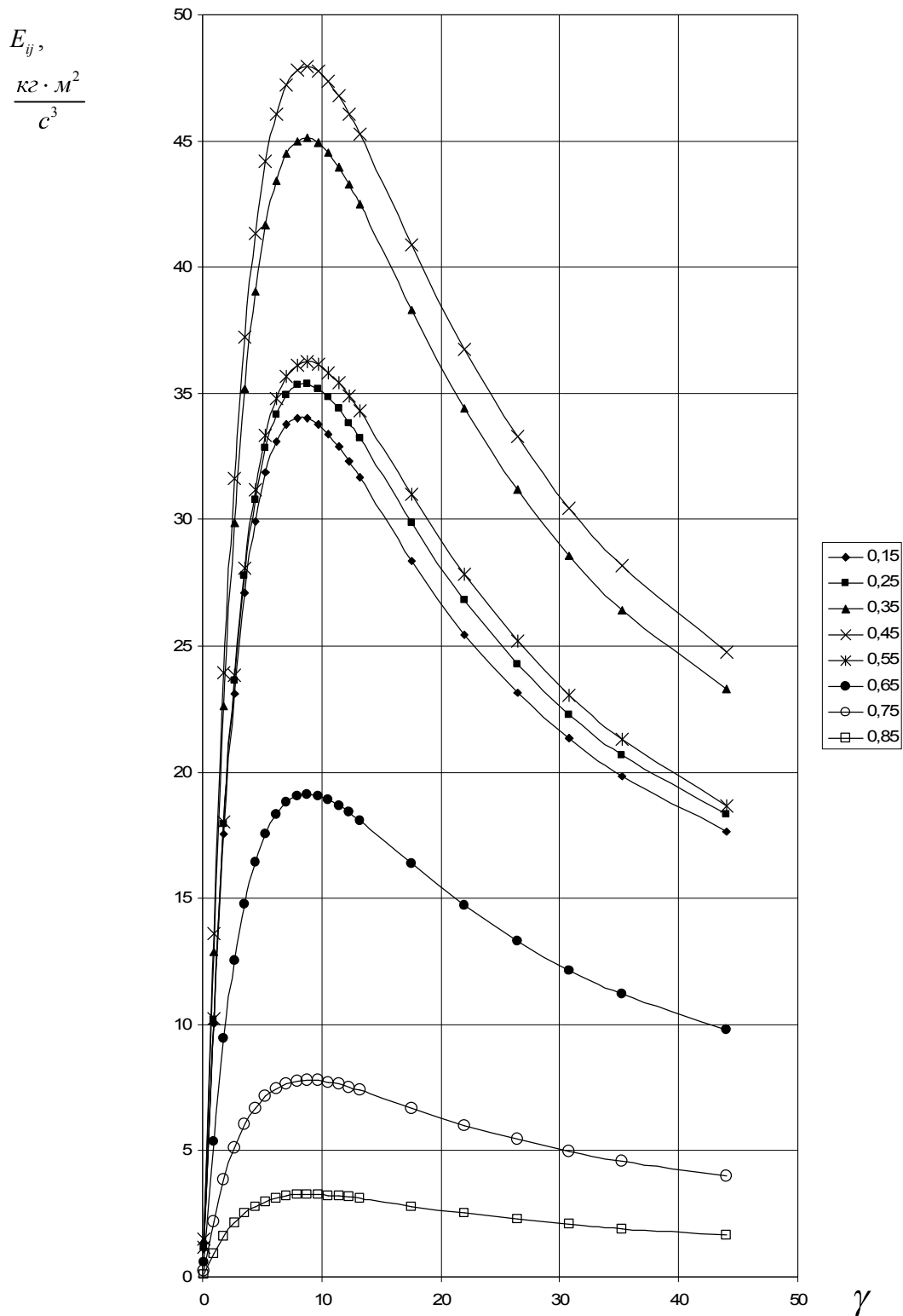


Рис.3. Зависимость кинетической энергии частиц различного диаметра (в миллиметрах) от коэффициента запыленности потока γ , $l=100$ мм

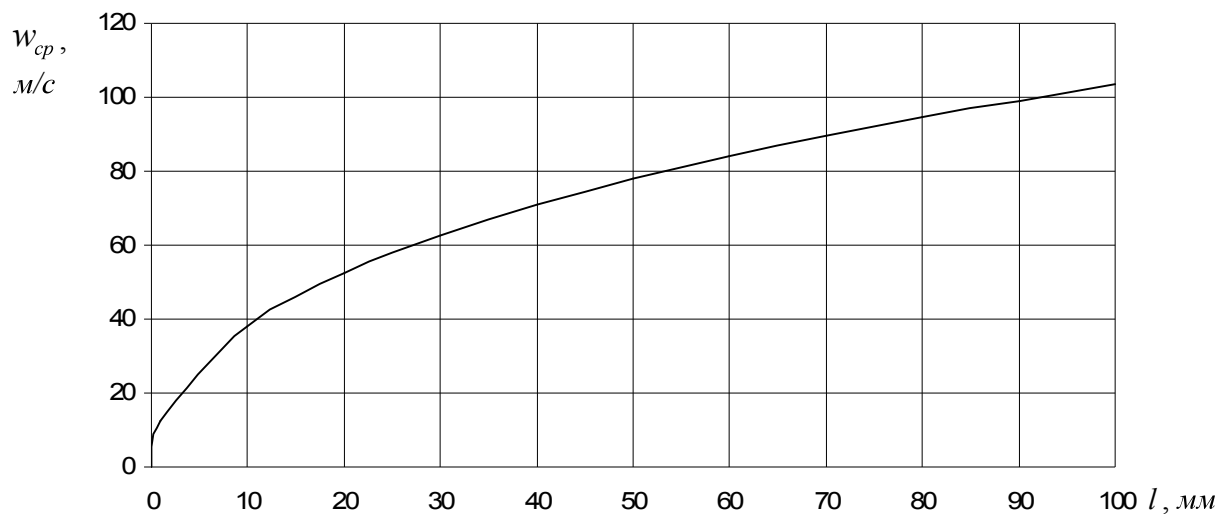


Рис.4. Зависимость скорости частиц среднего диаметра от расстояния до преграды l , $\gamma = 2,2$

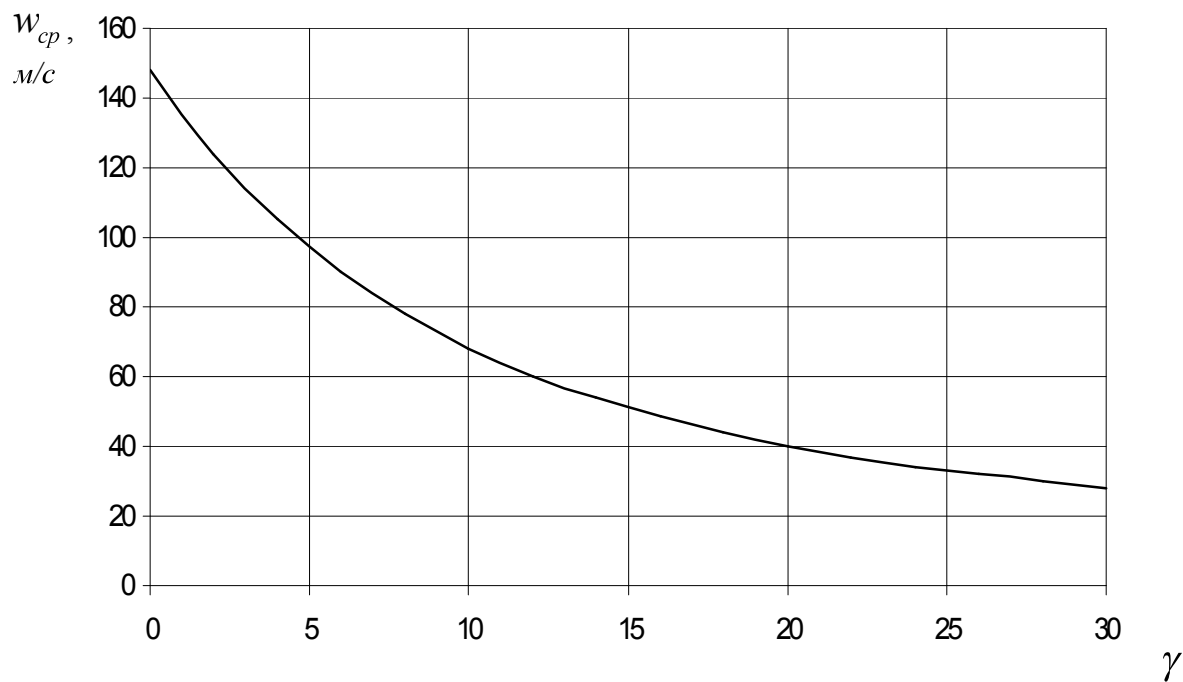


Рис.5. Зависимость скорости частиц среднего диаметра от коэффициента запыленности γ ; $l = 100$ мм

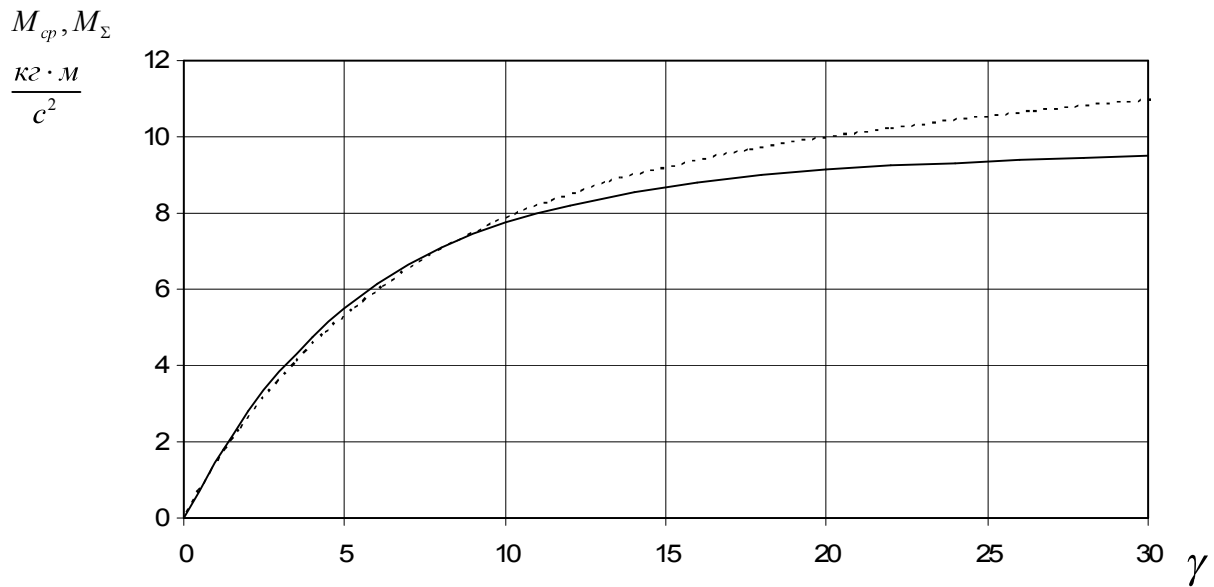


Рис.6. Зависимость момента частиц от коэффициента запыленности γ :

— для среднего диаметра;
 - суммарный момент потока частиц различного диаметра

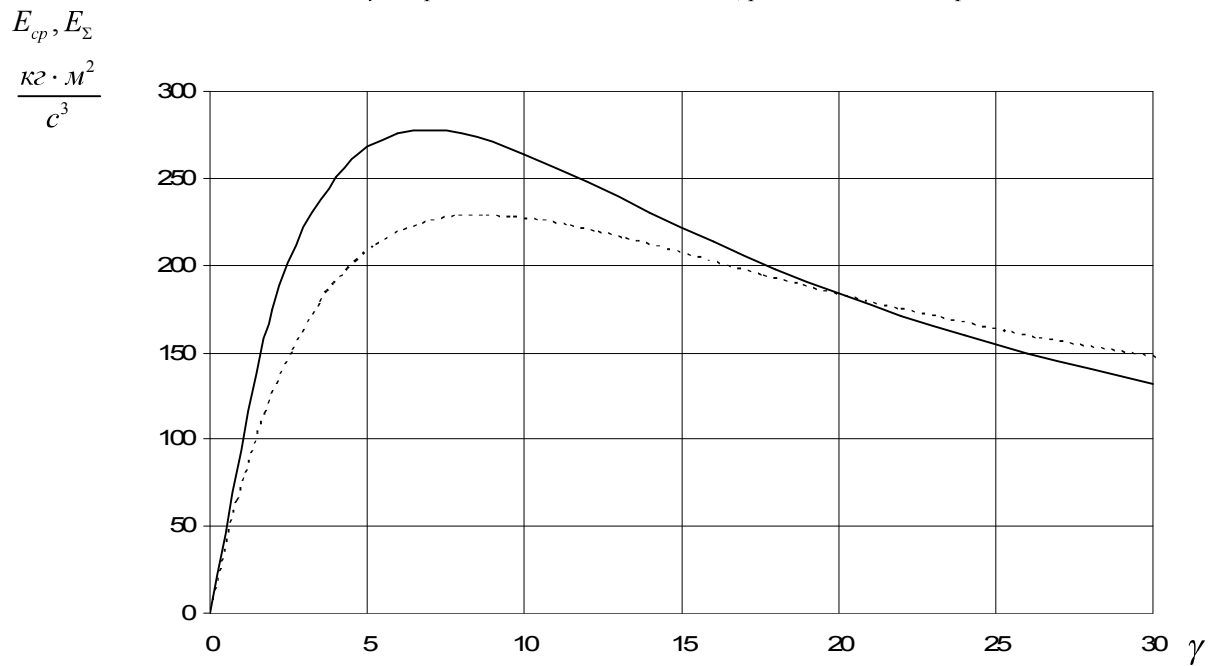


Рис.7. Зависимость кинетической энергии частиц от коэффициента запыленности γ :

— для среднего диаметра;
 - суммарная энергия потока частиц различного диаметра

Коэффициент запыленности γ при постоянном расходе продуктов сгорания \dot{m}_a определяет величину расхода абразива \dot{m}_i . Возникновение максимума кинетической энергии частиц по коэффициенту запылен-

ности вызвано тем, что с ростом γ скорость частиц уменьшается, а импульс растет.

Сопоставление зависимостей, полученных в результате расчета по двум моделям, показало, что по модели для монодисперсного потока со средним диаметром

можно проводить экспресс-оценку параметров полидисперсного потока с относительной погрешностью 15%.

дуктов сгорания.// Вестник СГАУ №2 (10) часть 2. - Самара: СГАУ,2006.- С.352-357.

Библиографический список

1. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц / Яненко Н.Н., Солоухин Р.Н., Папырин А.Н., Фомин В.М. - Новосибирск: Наука, 1980. - С160.
2. Прикладная газовая динамика / Абрамович Г.Н. – М: Наука, 1969. – С.824.
3. Буланова Е.А., Первышин А.Н. Импульсные и энергетические характеристики недорасширенных двухфазных струй про-

References

1. Janenko N.N., Solouhin R.N., Papyrin A. N. and Fomin V.M. Supersonic Two-phase Flow in Non-equilibrium Velocity State of Particles. Novosibirsk: "Nauka", 1980.
2. Abramovich G.N. Applied Gas Dynamics. Moscow: "Nauka", 1969.
3. Bulanova E.A., Pervishin A.N. Impulse and Energy Responses of Underexpanded Two-phase Combustion Products Jets. SSAU Reporter №2 (10) part 2. – Samara: SSAU, 2006. 352-357.

MODEL OF VARIGRAINED PARTICLE STREAM MOVING BY HYPERSONIC COMBUSTION MATERIALS INVESTIGATION

© 2008 E. A. Bulanova, A. N. Pervishin

Samara State Aerospace University

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

Mathematical model, stream, particles, speed, product of combustion, dependence

Информация об авторах

Буланова Екатерина Александровна, аспирант кафедры механической обработки материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: kowka81@mail.ru. Область научных интересов: движение многофазных газовых потоков.

Первышин Александр Николаевич, заведующий кафедрой механической обработки материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. сл. (846) 267-45-73. Область научных интересов: движение многофазных газовых потоков.

Bulanova Ekaterina Alexandrovna, postgraduate of Samara State Aerospace University "Mechanical Material Working" department. E-mail: kowka81@mail.ru. Area of research: dynamics of multiphase gas flows.

Pervishin Alexander Nikolaevich, head of department of Samara State Aerospace University "Mechanical Material Working", doctor of technical science, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov. Phone (846) 267-45-73 Area of research: dynamics of multiphase gas flows.