

В.П. КРАВЧЕНКО

(Украина, Мариуполь, ПАО "ММК им. Ильича")

ДИНАМИКА ДИСПЕРСНОГО ПОТОКА ГАЗОВЗВЕСИ В РАЗГОННОМ УЗЛЕ СТРУЙНОГО АППАРАТА

1. Постановка задачи исследования

Автором проведена исследовательская работа по тонкодисперсному измельчению доменных шлаков во встречных струях. Этот метод, являющийся наиболее эффективным в организации взаимодействия фаз, применяется в противоточной струйной мельнице, использованной в данной работе.

Исследования, проведенные на опытных и опытно-промышленных установках, показали, что интенсивность процессов межфазового обмена в аппаратах со встречными струями на 1-2 порядка выше интенсивности процесса переноса в обычных потоках газозвеси [1].

Положительными особенностями данного метода является возможность создания высоких скоростей движения фаз в турбулентном потоке газозвеси.

В данной работе поставлена задача: рассчитать аналитически величину скоростей каждой составляющей двухфазной газозвеси – энергоносителя (воздух) и частиц твердой фазы (доменный шлак, клинкер) на разгонном участке струйного аппарата, т.е. вдоль продольной оси и на срезе разгонной трубки (скорость вылета фаз в помольную камеру). Определение начальных скоростей встречных струй газозвеси в помольной камере послужит в данной работе теоретическим основанием при сравнительной оценке измельчаемости шлака и клинкера, так как эффект измельчения в значительной степени зависит от кинетической энергии соударяющихся частиц.

2. Схема разгонного узла инжектора

Смешивание фаз (газ, твердое тело) происходит в инжекторном узле струйного аппарата перед подачей газозвеси в помольную камеру (рис. 1).

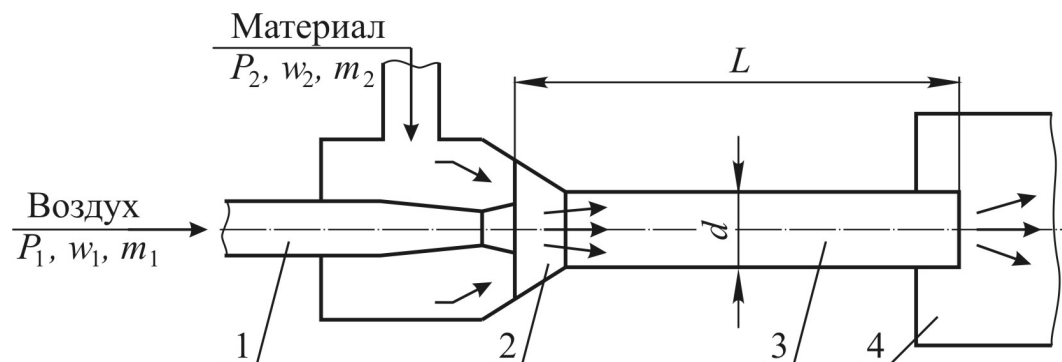


Рис. 1. Схема разгонного узла инжектора струйного аппарата:

1 – сопло; 2 – смесительная камера; 3 – разгонная трубка; 4 – помольная камера

Підготовчі процеси збагачення

Рабочий поток (воздух) с высокой скоростью из сопла 1 поступает в смешительную камеру 2 инжектора и увлекает (инжектирует) среду, имеющую перед разгонной трубкой 3 более низкое давление. Кинетическая энергия рабочего потока частично передается инжектируемому потоку. В камере 2 рабочий и инжектируемый потоки смешиваются. Образовавшаяся двухфазная газовзвесь (воздух + твердые частицы) поступают на участок разгона 3 для выброса с повышенной скоростью в помольную камеру 4 для измельчения во встречных потоках.

3. Математическая модель течения газовзвеси в цилиндрическом канале (разгонной трубке инжектора)

Как указывается в источнике [2], исследования движения многофазных сред могут осуществляться только путем введения в поставленную задачу значительных упрощений, связанных с исключением некоторых деталей явления. Это положение применяется при решении задачи движения газа с примесью твердых частиц ("запыленного" газа) [3] – газовзвеси.

В поставленной задаче рассматривается движение совершенного (удовлетворяющего уравнению Клайперона) газа со скоростью w_1 , температурой T_1 и плотностью ρ_1 , в котором распылена твердая фаза, представленная сплошной средой со скоростью w_2 , температурой T_2 и плотностью ρ_2 ; последняя величина определяется произведением числа частиц в единице объема смеси n на массу отдельной частицы m [2]. Предполагается при этом, что все частицы имеют один и тот же размер, форму и массу. Взаимодействием твердых частиц между собой, так же как и влиянием на них броуновского движения, пренебрегается. Объемная концентрация частиц считается незначительной, фазовые превращения отсутствуют с учетом принятых граничных условий, механика газовзвеси строится на основе физических законов сохранения массы, импульса и энергии.

При условии неизменяемости температуры ($T = \text{const}$) можно говорить о квазистационарности потока, для которого движение полидисперсной смеси в трубе возможно осреднение плотности потока и вектора количества движения в пределах бесконечно малого участка, для несущего газа и частиц i -той фракции.

4. Система дифференциальных уравнений течения дисперсного потока при $F = \text{const}$ (сила межфазного взаимодействия) имеет следующий вид [4-6]

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{d}{d\tau}(\varepsilon_1 \rho_1) + \frac{d}{dx}(\varepsilon_1 \rho_1 w_1) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{d}{d\tau}(\varepsilon_2 \rho_2) + \frac{d}{dx}(\varepsilon_2 \rho_2 w_2) = 0. \quad (2)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\varepsilon_1 \rho_1 \left(\frac{dw_1}{d\tau} + w_1 \frac{dw_1}{dx} \right) = -\varepsilon_1 \frac{dP}{dx} + F_{12} - F_{1w} + g \varepsilon_1 \rho_1; \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 \rho_2 \left(\frac{dw_2}{d\tau} + w_2 \frac{dw_2}{dx} \right) = -\varepsilon_2 \frac{dP}{dx} + F_{12} - F_{2w} + g \varepsilon_2 \rho_2. \quad (4)$$

Особенности системы уравнений (1) – (4): главные производные по времени, обусловленные нестационарностью процесса; трение, обусловленное взаимодействием со стенками канала, учитывается отдельно для газа F_{w1} и для частиц F_{w2} .

В уравнения (1 – 4) и последующих приняты следующие обозначения: w – скорость; ρ – плотность; P – статическое давление; T – температура; h – энтальпия; R – газовая постоянная; ε – объемная доля; F – сила взаимодействия; α – угол наклона трубки к вертикали; x – координата, отсчитываемая вдоль оси канала. Индексы 1, i – относятся к несущей и твердой фазам, w – стенке трубки. (F_{12} – сила межфазного взаимодействия; F_{2w} – потери импульса на трение газа о стенку); J – импульс.

5. Уравнения равновесного течения газозвеси в цилиндрическом канале

Для решения поставленной задачи в данной работе используется система уравнений полидисперсного течения газозвеси в цилиндрическом канале в одномерном приближении с учетом сжимаемости газа, которая имеет вид [7, 8] ($i = 2, \dots, N$; N – количество фракций дисперсного порошка).

$$G_1 \frac{dw_1}{dx} = -\varepsilon_1 \frac{dP}{dx} - F_{1w} - \sum_{i=2}^N F_{1i} + \varepsilon_1 \rho_1 \sin \alpha; \quad (5)$$

$$G_i \frac{dw_i}{dx} = -\varepsilon_i \frac{dP}{dx} - F_{1i} - \sum_{i=2}^N F_{iw} + \varepsilon_i \rho_i g \sin \alpha + \sum_{j=2}^N J_{ij}. \quad (6)$$

Уравнение состояния газовой фазы:

$$P = \rho_1 R_1 T_1. \quad (7)$$

Система уравнения (5) – (7) дополняется условиями постоянства расхода фаз:

$$\varepsilon_1 + \sum_{i=2}^N \varepsilon_i = 1 \quad (8)$$

Підготовчі процеси збагачення

и уравнениями неразрывности для каждой из фаз:

$$G_1 = \varepsilon_1 \rho_1 w_1 = \text{const}; \quad \sum_{i=2}^N G_i = \varepsilon_i \rho_i w_i = \text{const}. \quad (9)$$

В силе межфазного взаимодействия

$$F_C = \frac{1}{2} \rho_1 C_D F |w_1 - w_i| (w_1 - w_i). \quad (10)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления

$$C_D = C_D^0 \varepsilon_1^{-2n}; \quad n = 2,25 \div 4,5, \quad (11)$$

где C_D^0 в зависимости от числа Рейнольдса частицы вычислялось [9]

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_{li}} \varepsilon_1^{-2n} - \left(1 + 0,179 \sqrt{R_{cli}} + 0,013 \text{Re}_{li}\right);$$
$$\text{Re}_{li} = \frac{|w_1 - w_i| \rho_i \cdot \delta_i}{\mu_1}. \quad (12)$$

Коэффициент формы K_ϕ учитывает несферичность частиц по отношению к площади поверхности частиц одинакового объема $f = F/F_{\text{шар}}$, где F – относится к сферической частице [9]

$$K_\phi = 12,4 - \frac{11,4}{f}. \quad (13)$$

Система уравнений (5 – 7) содержит нелинейные дифференциальные уравнения первого порядка. Для решения дифференциальных уравнений использовался метод конечно-разностной аппроксимации. В расчетах уравнения движения несущей и дисперсной фракций (5) – (6) аппроксимировались следующим образом:

$$G_1 \frac{w_{n+1} - w_n}{\Delta x} = -\varepsilon_1 \frac{P_{n+1} - P_n}{\Delta x} + F_{li} - F_{1w(n+1)/2} + \varepsilon_1 \rho_{(n+1)/2} g \cdot \sin \alpha; \quad (14)$$

$$G_2 \frac{w_{n+1} - w_n}{\Delta x} = \left(-\frac{P_{n+1} - P_n}{\Delta x} + F_{li} - F_{1w} + \rho g + J \right)^{\frac{n+1}{2}}, \quad (15)$$

где $\Delta x = x_{n+1} - x_n$ – шаг вдоль оси разгонной трубки; $n, n+1$ – соседние узлы разностной сетки по x .

Підготовчі процеси збагачення

Система разностных уравнений (14 – 15) решалась на каждом шаге по x , начиная от входа в разгонную трубку ($x = 0$), относительно неизвестных параметров в $(n+1)$ -м узле сетки. Так как давление на входе разгонной трубки неизвестно, использовался специальный алгоритм, основанный на методах "стрельбы" и половинного деления, для определения P .

Для выполнения расчета приняты следующие граничные и начальные условия.

Граничные условия 1:

– давление P_n и температура обеих фаз T_{1n} и T_{2n} на входе в разгонную трубку ($x = 0$) – $T_{1n} = T_{2n}$, P_n – не задается;

– отношение расходов μ и скоростей фаз $K_u = w_1/w_2$ на входе в канал;

– давление внешней среды на выходе из канала (внутри помольной камеры) $P_k = P_{at} = P_{o.c}$, при $n = P_k / P_{o.c} = 1$.

Граничные условия 2 отличаются от предыдущих тем, что вместо P_n более естественно задавать расход газа, вместо μ – расход порошка.

Для получения решения необходимо также задать профили неизвестных величин в начальный момент времени: $w_1(x)$, $w_2(x)$, $T_1(x)$, $T_2(x)$, $\rho_1(x)$, $P(x)$.

Величина давления на входе трубки P_1 определяется с помощью метода "стрельбы". В основе алгоритма решения – подбор такого давления на входе, чтобы при дозвуковом истечении давление на выходе было равно противодавлению, а при звуковом – скорость истечения газа была равна скорости звука.

6. Исходные данные для расчета

Диаметр разгонной трубки, d , мм	– 12
Длина разгонной трубки, L , мм	– 150
Угол отклонения оси трубки от вертикали, α , град	– 90
Диаметр частиц δ_j , j_i (фракции, мм)	– 1,0; 0,5; 0,1; 0,05; 0,02
Плотность частиц, кг/м ³	
– доменный шлак	–2700
– ПЦ-клинкер	– 3500
Температура, град К	– 293
Коэффициент формы частиц	
– доменный шлак	– 1,3
– ПЦ-клинкер	– 1,5
Производительность струйного аппарата, кг/ч	– 50
Относительный расход частиц (пылевая загрузка), $\mu = m_2 / m_1$, кг/кг	– 0,4; 0,3.

7. Результаты расчета

В результате проведенного расчета установлены характеристики динамических параметров течения дисперсного двухфазного потока газозвеси на разгонном участке струйного аппарата при диспергировании предварительно измельченных в шаровой мельнице доменного шлака и ПЦ-клинкера. Гранулометрический анализ продукта шарового помола шлака и клинкера позволил условно разделить полученные порошки на 5 фракций, указанными в исходных данных.

Підготовчі процеси збагачення

Расчетом были получены распределение скоростей частиц каждой фракции вдоль продольной оси и на срезе разгонной трубки (скорости вылета частиц в помольную камеру).

Графическое отображение распределения скоростей твердой фазы на разгонном участке струйного аппарата представлены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 видно, что скорость различных фракций изменяется по кривой, достигающей максимального значения в конце разгонного участка. Мелкие частицы, как доменного шлака (рис. 2,а,а'), так и ПЦ-клинкера (рис. 2,б,б') быстрее увеличивают скорость, чем крупные фракции: $\delta = \delta_j = (1,0; 0,5)$ мм (кривые 1, 2 на рис. 2). Широкий диапазон изменения скоростей в начале разгонного участка постепенно сужается по его длине. Это объясняется тем, что при приближении скоростей мелких частиц к максимальному значению скорость их изменяется медленно.

Так как в данном расчете не учитывается соударение частиц, скорости крупных частиц изменяются по длине разгонного участка так же, как и мелких, несколько отставая по своей величине. Все мелкие частицы (доменный шлак и ПЦ-клинкер) в конце разгонного участка имели относительно крупных более высокие скорости.

Из рис. 3 видно, что с уменьшением размера скорость частицы на срезе разгонной трубки (скорость вылета в помольную камеру) возрастает. Максимальную скорость имеют частицы размером 0,02 мм при $\mu = 0,3$:

– доменного шлака – $w_2 = 264$ м/с; – ПЦ-клинкера – $w_2 = 252$ м/с.

Как следует из рис. 3, все частицы, не зависимо от их размеров у доменных шлаков имеют скорости вылета в помольную камеру выше, чем у частиц ПЦ-клинкера. У доменных шлаков для частиц 1,0-0,02 мм $w_2 = 201-264$ м/с, у ПЦ-клинкера $w_2 = 189-252$ м/с, соответственно. Следовательно, частицы доменного шлака, попадая в помольную камеру в зону встречи струй с более высокими скоростями и имея меньшую плотность, чем ПЦ-клинкер будут иметь более высокий эффект разрушения.

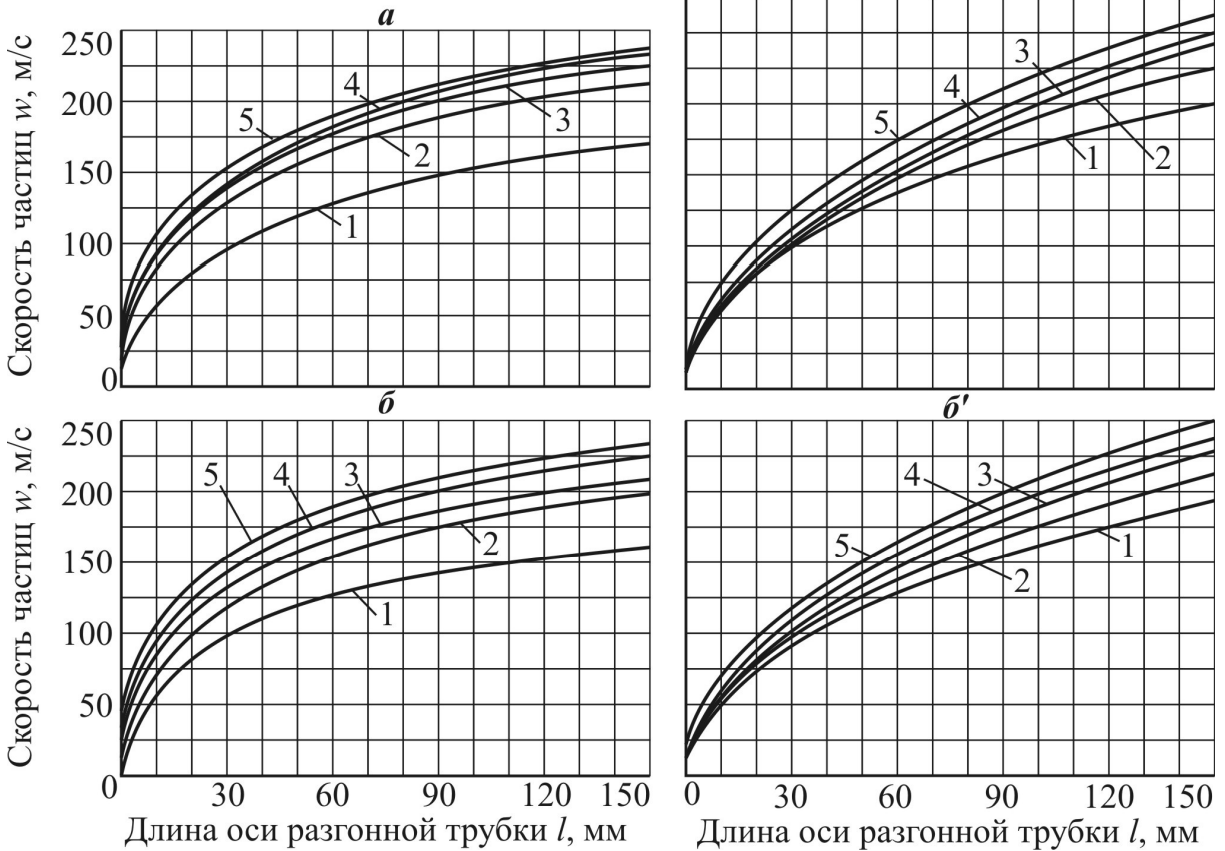


Рис. 2. Изменение скоростей частиц (a, a' – доменный шлак, б, б' – ПЦ-клинкер): а, б – при $\mu = 0,4$; а', б' – при $\mu = 0,3$; δ , мм — 1 – 1,0; 2 – 0,5; 3 – 0,1; 4 – 0,05; 5 – 0,02

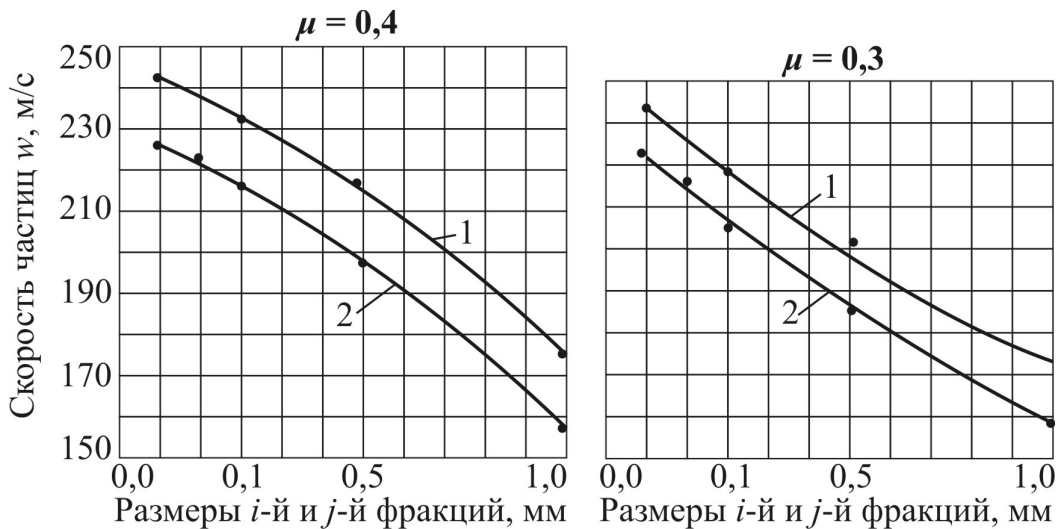


Рис. 3. Зависимость величины скорости частиц на срезе разгонной трубки от размера i-й и j-й фракции: 1 – доменный шлак, 2 – ПЦ-клинкер

Підготовчі процеси збагачення

Расчетом установлено влияние пылевой загрузки μ на скорость твердой фазы в выходном сечении разгонной трубки (рис. 4).

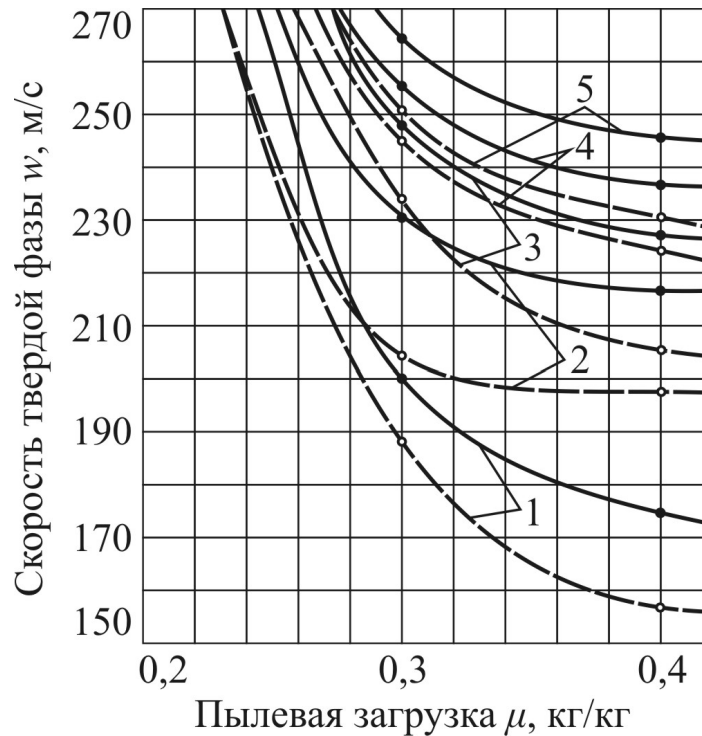


Рис. 4. Влияние пылевой загрузки μ на скорость твердой фазы в выходном сечении разгонной трубки:

— доменный шлак,
- - - - - ПЦ-клинкер
 $\delta = \delta_j$, мм. 1 – 1,0; 2 – 0,5; 3 – 0,1; 4 – 0,05; 5 – 0,02

Из рис. 4 следует, что с уменьшением μ ($m_2 = \text{const}$) путем увеличения расхода воздуха (энергоносителя) наблюдается увеличение скорости твердых фаз (i – шлак, j – клинкер), которые достигают своего максимума в выходном сечении разгонной трубки при $\mu = 0,3$ (см. рис. 3). При этом максимальное значение число Маха (M) для каждой i -й и j -й фракции составляет:

- для i -й фракции (шлак, $\delta = 0,02$ мм) $M_{\text{max}} = 0,77$;
- для j -й фракции (клинкер, $\delta_j = 0,02$ мм) $M_{\text{max}} = 0,73$.

Согласно данному расчету скорости твердых фаз (i -й и j -й) на конце разгонного участка не достигают скорости звука. Обе фракции (i -я и j -я) имеют максимальное значение числа Маха менее единицы ($M_{\text{max}i,j} < 1$).

Из рис. 4 следует, что дальнейшее снижение пылевой загрузки до $\mu = 0,2$ приводит к увеличению скоростей твердых фаз (i -й и j -й) выше скорости звука ($M_{\text{max}i,j} > 1$).

Такое снижение пылевой загрузки μ (относительной концентрации твердой фазы) в двухфазном потоке газозвеси снижает производительность струйного аппарата, что является нецелесообразным.

Выводы

Исследование показало, что примененный алгоритм расчета позволил получить удовлетворительные результаты.

Анализ результатов расчета динамических параметров двухфазного течения газозвеси в разгонном участке струйного аппарата показал, что распределение скоростей вдоль продольной оси разгонной трубки у доменных шлаков и ПЩ-клинкера отличается величиной скоростей частиц на срезе разгонной трубки, где она выше у доменных шлаков для всех исследуемых фракций.

Установлено, что величина скорости твердой фазы (шлак, клинкер) зависит от размера частицы. Наиболее высокую скорость имели частицы наименьшей фракции – 0,02 мм (*i*-й и *j*-й). Снижение относительной концентрации твердой фазы (*i*-й и *j*-й) – пылевой загрузки повышает скорости всех фракций, что способствует более эффективному измельчению материала во встречных струях. Согласно результатам расчета эффективность измельчения доменных шлаков во встречных струях должна быть выше, чем ПЩ-клинкера, что и было подтверждено дальнейшими исследованиями методом механоактивации, гранулометрическими исследованиями и микрофотографиями дисперсных порошков шлака и клинкера.

Список литературы

1. Процессы переноса во встречных струях (газовзвесь) / И.Т. Эльперин, Л.П. Мельцер, Л.П. Павловский и др. – Минск.: Наука и техника, 1972. – 216 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 847 с.
3. Marbl F. Dynamics of dusty gasses. Ann. Rev. of Fluid Mech. – 1970. – P. 397-445.
4. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергия, 1970. – 287 с.
5. Практическая гидродинамика и теплообмен при производстве чугуна и стали. Т.1. Однофазные течения. Справочник. – Мариуполь.: ПГТУ, 2004. – 568 с.
6. Практическая гидродинамика и теплообмен при производстве чугуна и стали. Т.1. Дисперсные потоки. Справочник. – Мариуполь.: ПГТУ, 2004. – 568 с.
7. Кузнецов Ю.М. Газодинамика процессов вдувания порошков в жидкий металл. – Челябинск.: Металлургия, 1991. – 160 с.
8. Куземко Р.Д. Теория и практика вдувания порошкообразных материалов в металлические расплавы // Вісник ПДТУ : Зб. наук. праць / ПДТУ. – Мариуполь, 1999. – Вип. 7. – С. 189-206.
9. Михаелидис Е.Е. Движение частиц в газовом потоке. Средняя скорость и потери давления // Теоретические основы инжекторных расчетов. – № 1. – М., 1988. – С. 276-288.

© Кравченко В.П., 2011

*Надійшла до редколегії 27.11.2011 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*