

- diametra* [Theory and practice of processing intensification in shaft-furnaces of low diameter]. Moscow: Teplotekhnika, 2010. 379 p. (In Russ.).
2. Levi L.I. *Kislород v protsesse polucheniya chugunnogo lit'ya* [Oxygen in production of iron casting]. Moscow: Mashgiz, 1955. 275 p. (In Russ.).
 3. Marienbakh L.M. *Intensifikatsiya vagranochnogo protsessa* [Intensification of a cupola process]. Moscow: GNTI, 1964. 386 p. (In Russ.).
 4. Girshovich N.G. *Chugunnoe lit'e* [Iron casting]. Moscow: Metallurgizdat, 1949. 706 p. (In Russ.).
 5. Brilakh M.M., Gorfinkel' V.M. *Modernizatsiya vagranok* [Cupola improvement]. Moscow: Mashinostroenie, 1966. 173 p. (In Russ.).
 6. *Spravochnik po chugunному lit'yu* [Iron casting: handbook]. Girshovich N.G. ed. Leningrad: Mashinostroenie, 1978. 758 p. (In Russ.).
 7. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Lazarev B.P. *Teploobmen v domennoi pechi* [Heat-exchange in a blast furnace]. Moscow: Metallurgiya, 1966. 354 p. (In Russ.).
 8. Grachev V.A., Chernyi A.A. *Sovremennyye metody plavki chuguna* [Modern methods of iron smelting]. Saratov: Privolzh. kn. izd., 1973. 342 p. (In Russ.).
 9. Feoktistov A.V., Modzelevskaya O.G. Analysis of forces, having an effect on coke or coal fuel nozzle in shaft furnaces of minor diameter (cupola). *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 4, pp. 29–34. (In Russ.).
 10. Chapygin Yu.V., Erinov A.E. *Ispol'zovanie prirodnogo gaza pri plavke chuguna* [The usage of natural gas in smelting of cast iron]. Kiev: Naukova dumka, 1976. 238 p.
 11. Bogdandi L.F., Jengel' G.Yu. *Vosstanovlenie zheleznykh rud* [Iron ore reduction]. Moscow: Metallurgiya, 1971. 519 p. (In Russ.).
 12. *Chislennoe modelirovanie v aerogidrodinamike* [Numerical modeling in aerohydrodynamics]. Chernyi G.G. ed. Moscow: Nauka, 1986. 262 p. (In Russ.).
 13. Selyanin I.F., Marks G.L. Aerodynamics and design parameters of cupolas with the expanded combustion zone. *Liteinoe proizvodstvo*. 1987, no. 12, pp. 23–25. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was performed according to the task no. 2014/213 to perform public works in the field of scientific activities of the base portion of the state task of the Russian Ministry.

Received May 26, 2014

УДК 669.162.12:622

РАЗВИТИЕ ПРИНЦИПОВ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

Павловец В.М., к.т.н., доцент (pavlovets.viktormix@yandex.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., Кирова, 42)

Аннотация. Развита принципы принудительного зародышеобразования в процессе получения железорудных окатышей. В их основу положен расчетно-аналитический метод проектирования технологии получения окатышей, учитывающий параметры принудительного зародышеобразования в системе напыления влажной шихты на гарнисаж окомкователя и проектные характеристики напыленных слоев шихты, зародышей и окатышей. Получены расчетные данные, позволяющие выбрать координату напыления шихты на гарнисаж окомкователя и количество струйных аппаратов, необходимых для теплосилового напыления влажной шихты на гарнисаж окомкователя.

Ключевые слова: принципы принудительного зародышеобразования, напыление влажной шихты на шихтовый гарнисаж, тарельчатый окомкователь, воздушно-шихтовая струя, напыленный слой шихты, зародыши, железорудные окатыши.

Процесс получения сырых железорудных окатышей по технологии ЗНД (зародышеобразование напылением и доокомкование зародышей) включает две основные стадии: принудительное зародышеобразование и формирование оболочки окатыша [1 – 4]. Принудительное зародышеобразование – это самостоятельное формообразование влажной шихты, осуществляемое теплосиловым напылением материала сжатым воздухом на шихтовый гарнисаж в холостой (незанятой материалом) зоне окомкователя с последующим делением напыленного слоя (НС) шихты на зародыши независимо от процессов, протекающих в слое комкуемых материалов.

Для зародышеобразования из всего расхода $G_{\text{ш}}$ шихты, поступившей к окомкователю, часть материала с расходом $G_{\text{ш1}}$ направляется в струйные аппараты (СА), каждый из которых самостоятельно напыляет шихту на шихтовый гарнисаж (ШГ) с расходом $G_{\text{СА}}$, форми-

руя общий напыленный слой шихты с расходом $G_{\text{НС}}$. В процессе деления НС на мерные фрагменты образуется поток зародышей с расходом $G_{\text{зр}}$, поступающий в рабочую зону окомкователя, где на них формируется оболочка окатышей (рис. 1). Для роста оболочки окатышей в поток зародышей подается шихта с расходом $G_{\text{ш2}} = G_{\text{ш}} - G_{\text{ш1}}$. Окатыши кондиционных размеров, выдаваемые из окомкователя с расходом $G_{\text{т}}$ (производительность окомкователя, кг/с), по технологии ЗНД структурно состоят из расположенных в их центре (сердцевине) зародышей влажностью $W_{\text{зр}} = (0,92 - 0,94)W_{\text{ш}}$ (где $W_{\text{ш}}$ – влажность загружаемой шихты, %) и плотностью $\rho_{\text{зр}} = 2400 - 3600 \text{ кг/м}^3$, а также шихтовой оболочки влажностью $W_{\text{об}} = (1,0 - 1,1)W_{\text{ш}}$ и плотностью $\rho_{\text{об}} = 3200 - 3600 \text{ кг/м}^3$. Массовая доля $\chi = G_{\text{зр}}/G_{\text{т}}$ зародышей в структуре окатышей зависит от расхода и геометрических параметров общего напыленного слоя шихты, формируемого всеми струйными аппаратами.

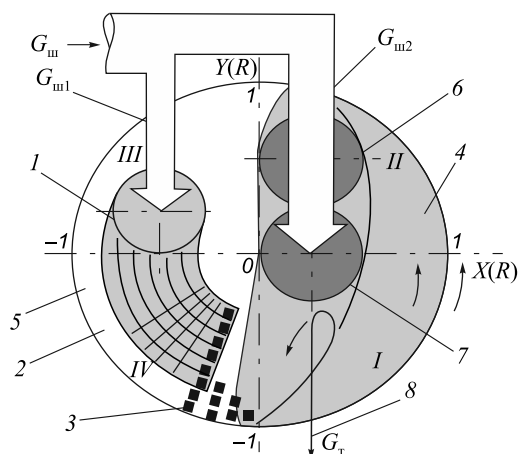


Рис. 1. Схема получения окатышей способом принудительного зародышеобразования:
I — область напыления (напыленный слой); 2 — область принудительного зародышеобразования; 3 — зародыши; 4 и 5 — рабочая и холостая зоны окомкователя; 6 и 7 — области увлажнения и доокомкования; 8 — годные окатыши

Целью настоящей работы является определение количества струйных аппаратов и геометрических размеров напыленного слоя, формируемого отдельными СА, при заданной массовой доле зародышей в окатышах и производительности окомкователя.

Расход $G_{НС}$, кг/с, напыленного слоя шихты связан с производительностью окомкователя, а также с расходом шихты на формирование зародышевой массы:

$$G_{НС} = \frac{G_{зр}}{1 - \varphi} = \frac{G_t \chi}{1 - \varphi}, \quad (1)$$

где φ — коэффициент, учитывающий образование мелочи при делении НС, частичном разрушении углов и граней зародышей при перекате.

Коэффициент φ зависит от схемы получения зародышей, параметров влажной шихты, плотности и прочности зародышей и определяется экспериментально ($\varphi = 0,05 - 0,5$) [2, 3].

Зная величину $G_{НС}$, можно рассчитать суммарный расход $G_{ш1}$, кг/с, шихты поступившей к струйным аппаратам:

$$G_{ш1} = \frac{G_{НС}}{K} = \frac{G_{зр}}{(1 - \varphi)K} = \frac{G_t \chi}{(1 - \varphi)K}, \quad (2)$$

где K — коэффициент напыления, доли ед.

Коэффициент K численно равен отношению расхода шихты, пошедшему на формирование НС, к расходу шихты, поступившему в СА. Он изменяется от 0,7 – 0,8 и может достигать 0,90 – 0,95 при дополнительном увлажнении зоны напыления.

Расход общего напыленного слоя, состоящего из N отдельных напыленных слоев диаметром $d_{НС}$, формируемых каждым струйным аппаратом на поверхности ШГ окомкователя, также можно вычислить по выражению

$$G_{НС} = \pi D_t X(R) h_{НС} (1 - \varphi_o) d_{НС} N \rho_{НС} \frac{n_t}{60}, \quad (3)$$

где D_t — диаметр тарели, м; $X(R) = R_i/R_t = 0 - 1$ — относительный радиус (радиальная координата) окомкователя; R_i и R_t — текущий и геометрический радиусы тарели окомкователя, м; $h_{НС}$ — средняя высота напыленного слоя, м; $\rho_{НС}$ — средняя плотность напыленного слоя, кг/м³; $\varphi_o = 0,1 - 0,2$ — коэффициент, учитывающий взаимное перекрытие отдельных напыленных слоев и исключение из деления граничных зон напыленного слоя; n_t — число оборотов окомкователя, с⁻¹ (рис. 2).

Приравняв правые части уравнений (1) и (3), можно получить выражение для вычисления параметра $d_{НС} N$, численно равного ширине кольцеобразного напыленного слоя шихты на ШГ окомкователя:

$$d_{НС} N = \frac{60 G_t \chi}{(1 - \varphi) \rho_{НС} h_{НС} \pi D_t X(R) (1 - \varphi_o) n_t}. \quad (4)$$

Производительность тарельчатого окомкователя рассчитывали по следующей формуле [5, 6]:

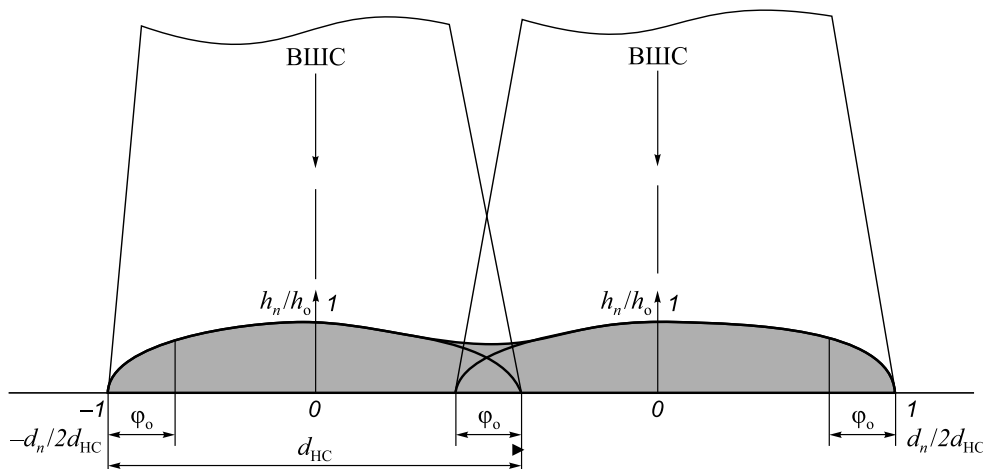


Рис. 2. Схема напыленного слоя шихты, сформированного двумя струйными аппаратами

$$G_T = 0,278 \left(\frac{D_T}{1,4} \right)^{2,7}. \quad (5)$$

Среднюю высоту НС можно вычислить, используя формулу площади трапеции:

$$S = 2 \int f(x) dx \approx \left(\frac{h_0 + h_n + h_1 + \dots + h_{n-1}}{2} \right) \approx d_{HC} h_{HC}; \quad (6)$$

здесь h_{HC} – средняя высота напыленного слоя шихты, вычисляемая по выражению вида

$$h_{HC} = \frac{h_0 + h_n + h_1 + \dots + h_{n-1}}{n}, \quad (7)$$

где h_0 – высота напыленного слоя на его оси; n – количество опытных величин; $h_n = 0 - h_0$ – опытные (текущие) значения высоты НС по его сечению, определяемые по уравнению регрессии ($R^2 = 0,99$), величины которого выражены в безразмерном виде:

$$\frac{h_n}{h_0} = -0,8336 \frac{d_n}{d_{HC}} - 0,1821 \left(\frac{d_n}{d_{HC}} \right)^2 + 1,0057 \left(\frac{d_n}{d_{HC}} \right)^3, \quad (8)$$

где $d_n = 0 - d_{HC}$ – текущее значение диаметра НС, м.

Среднее значение плотности напыленного слоя шихты вычислили по следующей формуле:

$$\rho_{HC} = \frac{\rho_0 + \rho_n + \rho_1 + \dots + \rho_{n-1}}{n}, \quad (9)$$

где ρ_0 – плотность НС на его оси, кг/м³; ρ_n – текущее значение плотности НС (изменяется от ρ_{min} до ρ_0), кг/м³.

Уравнение, аналогичное выражению (8), составили для определения величины ρ_n , используя экспериментальные данные, полученные в работах [1 – 4]:

$$\frac{\rho_n}{\rho_0} = -0,1786 \frac{d_n}{d_{HC}} - 0,1071 \left(\frac{d_n}{d_{HC}} \right)^2 + 0,9997 \left(\frac{d_n}{d_{HC}} \right)^3. \quad (10)$$

Выражение (4) имеет ограничения по координате $X(R)$, связанные с тем, что при напылении шихты на ШГ в холостой зоне тарели окомкователя напыленный слой не должен выходить за границу тарели при напылении вблизи борта, что соответствует координате $X(R)_{max}$, и не должен перекрывать нисходящий поток материалов в рабочей зоне окомкователя $X(R)_{min}$ (табл. 1).

Величина d_{HC} связана с диаметром $d_{ВШС}$, м, проекции воздушношихтовой струи (ВШС) СА на донный гарнисаж окомкователя эмпирическим соотношением:

$$d_{HC} = \zeta_0 d_{ВШС}, \quad (11)$$

где $\zeta_0 = 1,0 - 1,1$ – опытная константа.

Диаметр проекции воздушношихтовой струи СА на ШГ определяется по следующей формуле:

$$d_{ВШС} = d_{CA} + 2L \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2}, \quad (12)$$

где d_{CA} – диаметр сопла струйного аппарата; L – расстояние от сопла СА до шихтового гарнисажа, м; α – угол раскрытия струи, град.

Максимальное расчетное значение d_{HC} , которое может обеспечить один струйный аппарат диаметром $d_{CA} = 0,2$ м и $\alpha = 20^\circ$, составляет $0,62 - 1,02$ м при $\zeta_0 = 1,1$ и $L = 1,0 - 2,0$ м.

Если предположить в первом приближении, что зародыши имеют правильную геометрическую форму куба с эквивалентной высотой ребра $h_{зр}$, а у окатышей радиусом $R_{ок}$, полученных из этих зародышей, строго сферическая форма, то массовую долю зародыша в окатыше можно вычислить по следующему выражению:

$$\chi = \frac{h_{зр}^3 \rho_{зр}}{\left(\frac{4}{3} \pi R_{ок}^3 - h_{зр}^3 \right) \rho_{об} + h_{зр}^3 \rho_{зр}}. \quad (13)$$

Учитывая уравнение (1) и принимая во внимание, что $\rho_{зр} = \rho_{HC}$, можно записать

$$\chi = \frac{h_{HC}^3 \rho_{HC} (1 - \varphi)}{\left[\frac{4}{3} \pi R_{ок}^3 - h_{HC}^3 (1 - \varphi) \right] \rho_{об} + h_{HC}^3 (1 - \varphi) \rho_{HC}}. \quad (14)$$

Т а б л и ц а 1

Граничные координаты напыленного слоя шихты на ШГ

Граничные координаты	Значение координат при величине D_T , м			
	1,0	2,0	5,0	7,5
$X(R)_{min}$	$1,0 d_{HC}$ ($d_{HC} \leq 0,5$ м)	$0,5 d_{HC}$ ($d_{HC} \leq 1,0$ м)	$0,2 d_{HC}$ ($d_{HC} \leq 2,5$ м)	$0,133 d_{HC}$ ($d_{HC} \leq 3,75$ м)
$X(R)_{max}$	$R_T - (d_{HC}/2)$	$R_T - (d_{HC}/2)$	$R_T - (d_{HC}/2)$	$R_T - (d_{HC}/2)$

После преобразований получим

$$\chi = \frac{h_{\text{НС}}^3 \rho_{\text{НС}} (1 - \varphi)}{\left[\frac{4}{3} \pi R_{\text{ок}}^3 - h_{\text{НС}}^3 (1 - \varphi) \right] (\rho_{\text{об}} - \rho_{\text{НС}})}. \quad (15)$$

Используя формулу (15), можно вычислить величину средней высоты напыленного слоя шихты, необходимую для решения уравнения (4):

$$h_{\text{НС}} = \left(\frac{4 \pi R_{\text{ок}}^3 \chi \rho_{\text{об}}}{3(1 - \varphi)(\rho_{\text{НС}} + \rho_{\text{об}} \chi - \rho_{\text{НС}} \chi)} \right)^{1/3}. \quad (16)$$

Для расчета параметра $h_{\text{НС}}$ по уравнению (16) учитывали, что коэффициент φ зависит от плотности НС. В частности, приняли, что для $\rho_{\text{НС}} = 2000 - 2400 \text{ кг/м}^3$ $\varphi = 0,5$; для $\rho_{\text{НС}} = 2400 - 2800 \text{ кг/м}^3$, $\varphi = 0,3$; для $\rho_{\text{НС}} = 2800 - 3200 \text{ кг/м}^3$, $\varphi = 0,2$; для $\rho_{\text{НС}}$ более 3200 кг/м^3 $\varphi = 0,05$. Плотность оболочки приняли равной плотности окатыша.

Для расчета величины $h_{\text{НС}}$ по выражению (16) необходимо задавать параметр χ . Если требуется, напротив, рассчитать χ , задавая $h_{\text{НС}}$, то возникает вопрос об оптимальном значении $h_{\text{НС}}$ в технологии ЗНД. Для этого рассчитали скорость $V_{\text{зр}}$, кг/с, формирования массы зародышей и скорость $V_{\text{об}}$, кг/с, формирования массы оболочки окатышей по следующим выражениям:

$$V_{\text{зр}} = \frac{h_{\text{НС}}^3 \rho_{\text{зр}} (1 - \varphi)}{\tau_{\text{зр}}}; \quad (17)$$

$$V_{\text{об}} = \frac{\frac{4}{3} \pi R_{\text{ок}}^3 \rho_{\text{ок}} - h_{\text{НС}}^3 \rho_{\text{зр}} (1 - \varphi)}{\tau_{\text{об}}}, \quad (18)$$

где $\tau_{\text{зр}}$ и $\tau_{\text{об}}$ – длительности формирования массы зародышей и оболочки окатышей, с.

Длительность $\tau_{\text{зр}}$ формирования массы зародыша включает четыре временные составляющие (рис. 3):

$$\tau_{\text{зр}} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4. \quad (19)$$

В последнем выражении величина τ_1 – суммарная длительность процессов напыления шихты СА и деления НС на зародыши в холостой зоне окомкователя, которая вычисляется следующим образом:

$$\tau_1 = \frac{Y_o(\alpha_1) 60}{n_t}; \quad (20)$$

здесь $Y_o(\alpha_1) = \frac{\alpha_1}{360}$ – относительный угол; $\alpha_1 = 90^\circ$ – угол, на который перемещается НС одновременно с днищем окомкователя при напылении шихты и делении НС на зародыши.

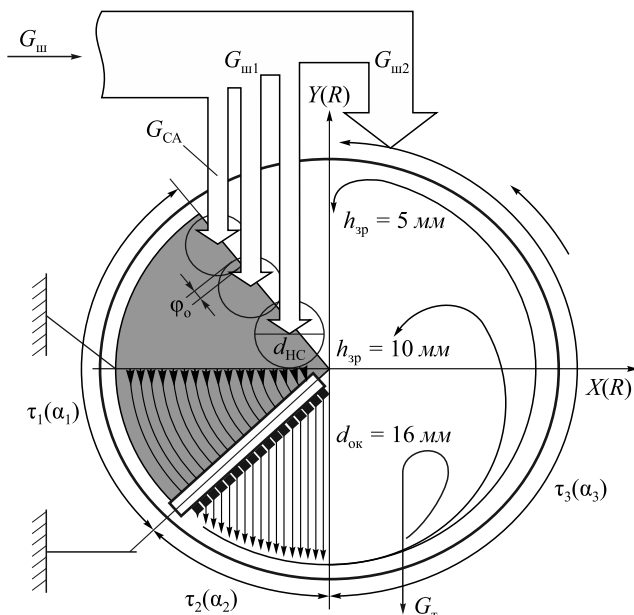


Рис. 3. Схема формирования зародышей по технологии принудительного зародышеобразования на тарельчатом окомкователе

Параметр τ_2 – длительность переката зародышей из зоны деления НС в нижнюю часть IV окомкователя, которая определяется экспериментально в зависимости от значений D_t и β (β – угол наклона днища окомкователя).

Величина τ_3 – продолжительность перемещения зародышей в восходящем слое материалов рабочей зоны тарели в место отрыва, находящееся в верхней точке вертикального диаметра; для $h_{\text{зр}} = 0,005 \text{ м}$ имеем $\tau_3 = \frac{Y_o(\alpha_3) 60}{n_t}$, $Y_o(\alpha_3) = \frac{\alpha_3}{360}$, $\alpha_3 = 180^\circ$; α_3 – угол, на который перемещаются зародыши одновременно с днищем окомкователя при осуществлении этой операции; для $h_{\text{зр}} = 0,010 \text{ м}$ получим $\tau_3 = \frac{Y_o(\alpha_3) 60}{n_t}$, где

$$Y_o(\alpha_3) = \frac{\alpha_3}{360}, \alpha_3 = 90^\circ.$$

Параметр τ_4 – длительность однократного переката зародышей из верхней точки вертикального диаметра тарели в нижнюю часть окомкователя. Это время учитывается в первой фазе переката, так как в последующих фазах идет рост массы зародыша за счет роста массы оболочки. Эта длительность зависит от величин D_t и β и определяется экспериментально. Для параметров $D_t = 5 \text{ м}$, $h_{\text{зр}} = 0,005 \text{ м}$ значение τ_4 составляет 10 с; для $h_{\text{зр}} = 0,010 \text{ м}$ – τ_4 уменьшается до 5 с.

Длительность формирования массы оболочки окатышей определяли по выражению

$$\tau_{\text{об}} = \tau_{\text{ок}} - \tau_{\text{зр}}, \quad (21)$$

где $\tau_{\text{ок}}$ и $\tau_{\text{зр}}$ – длительности формирования массы окатыша и его сферического зародыша по технологии действующего производства (ЗО), параметры которого представлены в учебной и научной литературе, с.

Для определения параметров $\tau_{ок}$ и $\tau_{зро}$ воспользовались литературными данными [6, 7], согласно которым средняя длительность формирования окатышей диаметром $d_{ок} = 16$ мм и влажностью 9–11 % составляет 260–280 с. В расчете приняли $\tau_{ок} = 260$ с. Величина $\tau_{зро}$ для сферического зародыша, у которого масса равна массе кубического зародыша размером $h_{зр} = 0,005$ м, не превышает 80 с. Параметр $\tau_{зро}$ для значений $h_{зр}$, равных 0,0075; 0,0010 и 0,0012 м, приняли 120, 160 и 200 с соответственно.

Расчет величин $\tau_{зр}$ по выражению (19) и $\tau_{об}$ по формуле (21) для диаметра тарели, равном 5 м, и скорости ее вращения 3 об/мин и заданной величины $h_{зр} = 0,005$ м показал, что для технологии ЗНД $\tau_{зр} = 31$ с, $\tau_{об} = 180$ с. Аналогичный расчет для заданного значения $h_{зр} = 0,010$ м дает $\tau_{зр} = 22$ с, $\tau_{об} = 100$ с.

Расчеты скоростей $V_{зр}$ и $V_{об}$ для параметров $\rho_{ок} = 3600$ кг/м³, $d_{ок} = 16$ мм, $\rho_{зр} = 2400$ кг/м³, $\phi = 0,5$, $\chi = 0,03$ (первый граничный случай) показали, что при $h_{НС}$ менее 0,005 м скорости роста массы зародышей (технология ЗНД) близки к скоростям роста массы зародышей по технологии ЗО из-за значительной разрушаемости зародышей. Аналогичный расчет для величин $\rho_{ок} = \rho_{зр} = 3600$ кг/м³, $\phi = 0,05$, $\chi = 0,6$ (второй граничный случай) показал, что при $h_{НС}$ более 0,014 м скорости роста массы зародышей приближаются к скоростям роста массы оболочки. На основании расчетов сделали вывод о том, что средняя высота напыленного слоя должна изменяться в пределах 0,005–0,014 м ($\chi = 0,03–0,6$) и может незначительно колебаться для других значений D_t и n_t .

Первое условие, которое необходимо учесть после получения результата расчета по формуле (4),

заключается в том, чтобы подобрать координату $X(R)$, при которой ширина напыленного слоя шихты $d_{НС}N$ не превышала радиуса тарели R_t окомкователя. Второе условие заключается в том, чтобы при заданном целом числе СА, диаметр напыленного слоя шихты не превышал величины $d_{НС}$, рассчитанной по выражению (11). Расчеты параметра $d_{НС}N$ по уравнению (4) с учетом полученных ограничений представлены в табл. 2.

Расчетные данные, приведенные в табл. 2, позволяют выбрать количество струйных аппаратов с заданными параметрами ($\rho_{НС}$, $h_{НС}$, $d_{НС}$) напыленного слоя шихты, зная массовую долю зародыша в окатыше и координату тарели, которая является центром напыленного слоя шихты. Расчеты показывают (табл. 2), что координата НС $X(R) = 0,1$ полностью не удовлетворяет условиям технологии ЗНД для $\chi = 0,1–0,8$, так как напыленный слой выходит за границу холостой зоны тарели. Координата $X(R) = 0,2$ для большинства исходных параметров ($\chi = 0,4$, $\rho_{НС} = 2400–2800$ кг/м³; $\chi = 0,6$, $\rho_{НС} = 2400–3000$ кг/м³; $\chi = 0,8$, $\rho_{НС} = 2400–3600$ кг/м³) так же является неблагоприятной. И только расположение НС в координатах $X(R) = 0,3–0,9$ (за исключением $\chi = 0,6–0,8$, $\rho_{НС} = 2400$ кг/м³) позволяет удовлетворить необходимым требованиям технологии ЗНД и использовать 1–2 струйных аппарата для его формирования на ШГ окомкователя [8, 9].

Выводы. На основе расчетно-аналитического метода проектирования технологии получения окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании, получены характеристики, необходимые для теплосилового напыления влажной шихты на гарнисаж окомкователя.

Таблица 2

Параметры напыленного слоя шихты

$\rho_{зр},$ кг/м ³	$h_{HC},$ мм	Параметры ($d_{HC}N, d_{HC}, N$) напыленного слоя шихты при $X(R)$						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
$\chi = 0,1$								
2400	8,48	*1,35	0,67	0,45	0,33	0,27	0,19	0,15
		0,67	0,67	0,45	0,33	0,27	0,19	0,15
		2	1	1	1	1	1	1
2600	7,41	*1,01	0,51	0,33	0,25	0,20	0,14	0,11
		0,51	0,51	0,33	0,25	0,20	0,14	0,11
		2	1	1	1	1	1	1
2800	6,93	*0,88	0,44	0,29	0,22	0,17	0,12	0,098
		0,44	0,44	0,29	0,22	0,17	0,12	0,098
		2	1	1	1	1	1	1
3000	6,53	*0,77	0,38	0,25	0,19	0,15	0,11	0,0854
		0,38	0,38	0,25	0,19	0,15	0,11	0,0854
		2	1	1	1	1	1	1
3600	6,08	*0,66	0,33	0,22	0,16	0,13	0,09	0,0734
		0,33	0,33	0,22	0,16	0,13	0,09	0,0734
		2	1	1	1	1	1	1

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

Параметры напыленного слоя шихты

$\rho_{\text{зр}},$ кг/м ³	$h_{\text{НС}},$ мм	Параметры ($d_{\text{НС}}N, d_{\text{НС}}, N$) напыленного слоя шихты при $X(R)$						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
$\chi = 0,2$								
2400	10,53	*2,17 0,72 3	*1,08 0,504 2	0,72 0,72 1	0,54 0,54 1	0,43 0,43 1	0,31 0,31 1	0,24 0,24 1
2600	9,23	*1,6 0,81 2	0,81 0,81 1	0,54 0,54 1	0,41 0,41 1	0,32 0,32 1	0,23 0,23 1	0,18 0,18 1
2800	8,66	*1,41 0,71 2	0,71 0,71 1	0,47 0,47 1	0,35 0,35 1	0,28 0,28 1	0,20 0,20 1	0,15 0,15 1
3000	8,19	*1,24 0,62 2	0,62 0,62 1	0,41 0,41 1	0,31 0,31 1	0,25 0,25 1	0,18 0,18 1	0,13 0,13 1
3600	7,66	*1,04 0,52 2	0,52 0,52 1	0,34 0,34 1	0,26 0,26 1	0,21 0,21 1	0,15 0,15 1	0,11 0,11 1
$\chi = 0,4$								
2400	12,88	*3,55 0,88 4	*1,77 0,88 2	1,18 0,63 2	0,88 0,59 1	0,71 0,71 1	0,50 0,50 1	0,39 0,39 1
2600	11,36	*2,66 0,88 3	*1,33 0,66 2	0,88 0,88 1	0,66 0,66 1	0,53 0,53 1	0,38 0,38 1	0,29 0,29 1
2800	10,72	*2,29 0,76 3	1,14 0,57 2	0,76 0,76 1	0,57 0,57 1	0,45 0,45 1	0,32 0,32 1	0,25 0,25 1
3000	10,18	*2,00 0,66 3	1,00 0,50 2	0,66 0,66 1	0,50 0,50 1	0,40 0,40 1	0,28 0,28 1	0,22 0,22 1
3600	9,65	*1,66 0,83 2	0,83 0,83 1	0,55 0,55 1	0,41 0,41 1	0,33 0,33 1	0,23 0,23 1	0,18 0,18 1
$\chi = 0,6$								
2400	14,36	*4,78 0,95 5	*2,39 0,80 3	*1,59 0,80 2	1,19 0,6 2	0,95 0,95 1	0,68 0,68 1	*0,53 0,53 1
2600	13,46	*3,32 0,83 4	*1,66 0,83 2	1,10 0,55 2	0,83 0,83 1	0,66 0,66 1	0,47 0,47 1	0,36 0,36 1
2800	12,91	*2,58 0,95 3	*1,42 0,71 2	0,95 0,95 1	0,71 0,71 1	0,57 0,57 1	0,40 0,40 1	0,31 0,31 1
3000	12,29	*2,48 0,83 3	*1,24 0,62 2	0,82 0,82 1	0,62 0,62 1	0,49 0,49 1	0,35 0,35 1	0,27 0,27 1
3600	11,72	*2,05 0,68 3	1,02 0,51 2	0,68 0,68 1	0,51 0,51 1	0,41 0,41 1	0,29 0,29 1	0,22 0,22 1

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

Параметры напыленного слоя шихты

$\rho_{\text{зр}},$ кг/м³	$h_{\text{НС}},$ мм	Параметры ($d_{\text{НС}}, N, d_{\text{НС}}, N$) напыленного слоя шихты при $X(R)$						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
$\chi = 0,8$								
2400	15,42	*5,94	*2,97	*1,98	1,48	1,18	0,84	* 0,66
		0,99	0,99	0,99	0,74	0,59	0,84	0,66
		6	3	2	2	2	1	1
2600	13,96	*4,32	*2,16	1,44	1,08	0,86	0,61	0,48
		0,86	0,72	0,72	0,54	0,86	0,61	0,48
		5	3	2	2	1	1	1
2800	13,08	*3,75	*1,87	1,25	0,93	0,75	0,53	0,41
		0,93	0,93	0,62	0,93	0,75	0,53	0,41
		4	2	2	1	1	1	1
3000	12,34	*3,3	*1,65	1,10	0,82	0,66	0,47	0,36
		0,82	0,82	0,55	0,82	0,66	0,47	0,36
		4	2	2	1	1	1	1
3600	12,17	*2,04	*1,32	0,88	0,66	0,52	0,37	0,29
		0,88	0,66	0,88	0,66	0,52	0,37	0,29
		3	2	1	1	1	1	1

П р и м е ч а н и е. Расчет выполнен для $D_{\text{т}} = 5$ м; $n = 3$ об/мин; $G_{\text{т}} = 8,638$ кг/с; $\varphi_0 = 0,2$; $\zeta_0 = 1,0$.
* – значения параметров, не удовлетворяющие требованиям технологии ЗНД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловец В.М. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 4. С. 3 – 6.
2. Павловец В.М. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 6. С. 9 – 13.
3. Павловец В.М. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.
4. Павловец В.М. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 6. С. 11 – 17.
5. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф., Антоненко Л.К. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
6. Ручкин И.Е. Производство железорудных окатышей. – М.: Металлургия, 1976. – 184 с.
7. Маерчак Ш. Производство окатышей. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
8. Пат. № 2402619 РФ. Способ получения окатышей / Павловец В.М. Заявл. 02.06.09; Опубл. 27.10.10.
9. Пат. № 2464328 РФ. Способ получения окатышей / Павловец В.М. Заявл. 17.06.11; Опубл. 20.10.12.

© 2014 г. Павловец В.М.
Поступила 10 июня 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. No. 10. Vol. 57, pp. 15–22.

DEVELOPMENT OF PRINCIPLES OF FORCED NUCLEATION IN THE PRODUCTION PROCESS OF IRON ORE PELLETS

Pavlovets V.M., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor
(pavlovets.viktormix@yandex.ru)

Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

Keywords: principles of forced nucleation, spraying of wet charge for charge skull, pelletizing disk, air-charge jet, sprayed layer of charge, nucleus, iron ore pellets.

REFERENCES

- Abstract.** The article considers the principles of forced nucleation in the production process of iron ore pellets. It is based on calculating and analytical methods of designing technology for pellets, taking into account parameters of forced formation in the system of wet deposition charge on the skull pelletizer and design characteristics of the deposited layers of charge, embryos and pellets. The design data allows choosing the coordinate of the deposition of the charge on the skull pelletizer and the number of jet devices required for thermal power deposition of wet charge on the skull pelletizer.
1. Pavlovets V.M. The organization principles of forced nucleation in a free-running zone of a pelletizing disk. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 4, pp. 3–6. (In Russ.).
 2. Pavlovets V.M. The research of thermal power sputtering regimes of wet charge intended for forced nucleation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 6, pp. 9–13. (In Russ.).
 3. Pavlovets V.M. The research of the generating process of wet pellets with the use of forced nucleation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metal-*

- lurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 6, pp. 15–20. (In Russ.).
4. Pavlovets V.M. The comparison of the combined pellets process by charge sputtering using low-temperature jets of compressed air. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 6, pp. 11–17. (In Russ.).
 5. Yusfin Yu. S., Pashkov N.F., Antonenko L.K. *Intensifikatsiya proizvodstva i uluchshenie kachestva okatyshei* [Intensification of production and improvement of quality of pellets]. Moscow: Metallurgiya, 1994. 240 p. (In Russ.).
 6. Ruchkin I.E. *Proizvodstvo zhelezorudnykh okatyshei* [Iron ore pelletizing]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 184 p. (In Russ.).
 7. Maerchak Sh. *Proizvodstvo okatyshei* [Pelletizing]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 232 p. (In Russ.).
 8. Pavlovets V.M. *Sposob polucheniya okatyshei* [Pelletizing process]. Patent RF no. 2402619, 2010. (In Russ.).
 9. Pavlovets V.M. *Sposob polucheniya okatyshei* [Pelletizing process]. Patent RF no. 2464328, 2012. (In Russ.).

Received June 10, 2014

УДК 621.746.42

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА В КАНАЛАХ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ

Голубев В.Б., к.т.н., доцент

Касимова И.В., доцент (kasymovainna@gmail.com)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровской обл., Кирова, 42)

Аннотация. Приведено решение уравнений Навье-Стокса, описывающих движение вязкой несжимаемой жидкости. Решение получено путем наложения ряда условий, приближенно выполняемых при движении реальных расплавов, и представляет известное в гидродинамике уравнение Бернулли. Анализ налагаемых на уравнение Навье-Стокса условий, проведенный в работе, позволяет оценить область применения уравнения Бернулли для расчета конструкций литниковых систем.

Ключевые слова: литниковые системы, неразрывность потока, критерий Рейнольдса, безвихревое движение потока.

Процесс получения отливки высокого качества требует решения целого комплекса теоретических и практических задач, главной из которых является организация подвода металла к телу отливки. Появление таких дефектов, как засор, газовая и песчаная раковины, неметаллические включения, связано, прежде всего, с конструкцией литниковой системы, основными элементами которой являются приемная воронка, стояк, литниковый ход и питатели. Переход из одного элемента литниковой системы в другой сопровождается нарушением сплошности (см. рисунок), разрывом формы и как следствие появлением дефектов. Чтобы избежать этих дефектов, литниковая система должна обеспечить спокойное, безвихревое, без разрывов и нарушений сплошности потока движение расплава.

В настоящее время теоретической базой для расчета движения расплава по каналам литейной формы является уравнение Бернулли, которое для двух различных сечений 1–1 и 2–2 канала литейной формы имеет вид

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + h, \quad (1)$$

где $\frac{V^2}{2g}$, $\frac{P}{\gamma}$ и Z – скоростной, статический и пьезометрический напоры в соответствующих сечениях; h – потеря напора на пути от сечения 1–1 до сечения 2–2.

Уравнение Бернулли соблюдается лишь при определенных условиях, которые не всегда выполняются в литейной практике. Исходя из сказанного в настоящей работе поставлена задача – определить условия, при которых уравнение Бернулли применимо для расчета движения расплава по каналам литейной формы.

Рассмотрим движение вязкой сжимаемой жидкости, описываемое в гидромеханике уравнениями Навье-Стокса:

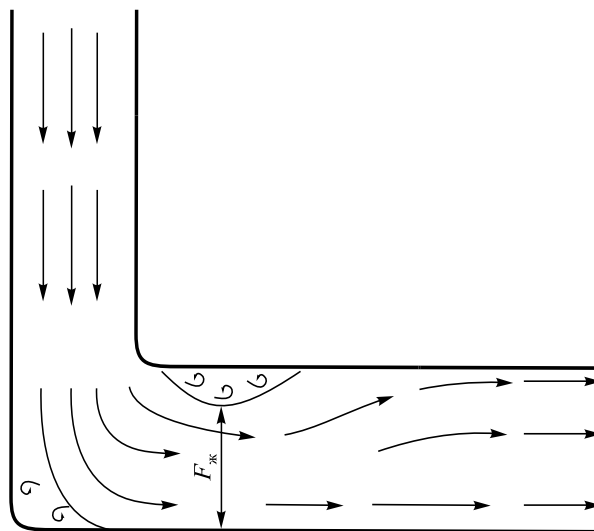


Схема течения потока в канале