

## ОСОБЕННОСТИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВАГРАНОЧНОГО ПРОЦЕССА\*

**Феоктистов А.В.**, к.т.н., доцент (umu@sibsiu.ru)

**Модзелевская О.Г.**, старший преподаватель

**Бедарев С.А.**, к.т.н., доцент

**Куценко А.А.**, аспирант

Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., Кирова, 42)

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы переноса и адекватности результатов плавки, полученных на вагранках малого диаметра, на вагранки промышленного назначения. Проведен анализ условий подобия при переходе от вагранок малого диаметра к вагранкам большего диаметра, который показал, что основные требования натурного (физического) моделирования выполняются. Сделан вывод, что температурный режим в холостой колоше и в зоне нагрева шихты не зависит от диаметра печи при условии выполнения полученных в работе основных соотношений между геометрическими параметрами печи, размерами кусков кокса и шихты, вытекающих из главных требований (теорем) теории подобия и натурного моделирования.

**Ключевые слова:** вагранка, моделирование, подобие, геометрические параметры печи, шихта, кокс.

Физическое моделирование теплообменных и аэродинамических процессов в металлургических печах с применением теории подобия широко используется в научных исследованиях на лабораторных установках, а их результаты применяются при создании новых конструкций промышленных агрегатов. Натурное моделирование позволяет в значительной степени снизить материальные и временные затраты при создании эффективно работающих конструкций печей, разработке рациональных температурных и тепловых режимов их работы.

Анализ условий подобия при переходе от вагранок малого диаметра к вагранкам большего диаметра показывает, что основные требования натурного (физического) моделирования при асимптотике по внутреннему диаметру печи к меньшим и большим значениям выполняются.

Геометрическое подобие выполняется четким соотношением между высотными параметрами печи и ее внутренним диаметром  $D$ , т.е.  $H_{\text{п}} = 4,345\sqrt{D}$ ;  $H_{\text{х.к}} = 1,165\sqrt{D}$ ;  $H_{\text{пд}} = 3,18\sqrt{D}$ , где  $H_{\text{п}}$ ,  $H_{\text{х.к}}$  и  $H_{\text{пд}}$  – высота полезная, холостой колоши и зоны подогрева печи [1].

Физическое моделирование ваграночных процессов стали применять еще в середине прошлого века. Так, Л.И. Леви исследование влияния дутья, обогащенного кислородом, проводил на печах с внутренним диам. 150 и 310 мм [2]; многоуровневая подача дутья без подогрева и с подогревом исследовалась Л.М. Мариенбахом на вагранке диам. 250 мм [3]. Лабораторные плавки прово-

дили с использованием кокса и шихтовых материалов, которые применяются в литейных цехах для выплавки чугуна, но, соответственно, меньших размеров.

В работе [3] количество поступающего в вагранку воздуха варьировалось в пределах от 50 до 150 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·мин). Средний размер кусков кокса в различных опытах изменялся от 30 – 50 до 70 – 90 мм. Температура подогрева дутья варьировалась от 17 до 200 °С. По результатам исследований были разработаны первичные технологические инструкции для их опробирования и внедрения в производственный процесс.

Настоящая работа посвящена проблеме переноса и адекватности результатов плавки, полученных на вагранках малого диаметра, на вагранки промышленного назначения.

Как показывает анализ, геометрические параметры вагранок, применяемых в промышленности, имеют широкий диапазон размеров [4 – 6]. Номинальная удельная производительность вагранок  $P_{\text{в}}$ , кг/(м<sup>2</sup>·с), не зависит от диаметра, а определяется расходом воздуха  $q_0$ , м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с), содержанием кислорода в дутье  $O_2^0$ , %, расходом кокса  $k$ , %, содержанием углерода в коксе  $C$ , %, составом отходящих газов по  $CO$  и по  $CO_2$ , % [1]:

$$P_{\text{в}} = 53,7 \frac{q_0 O_2^0}{kC} \cdot \frac{CO_2 + CO}{CO_2 + 0,5CO}, \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}. \quad (1)$$

Номинальная удельная производительность всех вагранок, рассчитанная по формуле (1), составляет  $P_{\text{в}} = 2,08$  кг/(м<sup>2</sup>·с) при  $q_0 = 2,0$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $O_2^0 = 21$  %;  $k = 14$  %;  $C = 90$  %;  $CO_2 = 14$  %;  $CO = 11,5$  %.

\* Работа выполнена согласно заданию № 2014/213 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России.

Для получения номинальной производительности в размерности т/ч необходимо значение  $P_b = 2,08 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  умножить на площадь пода печи  $S_b = \pi D^2/4$  и домножить на полученный эмпирическим путем коэффициент  $A = 3600/1000$ .

В производственных условиях производительность вагранки изменяется в определенном диапазоне (см. табл. 1), так как расход кокса в зависимости от принятой технологии плавки и другие показатели колеблются в следующих пределах:  $11 \leq k \leq 16 \%$ ;  $q_0 = 1,7 - 2,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $\text{CO}_2 = 10 - 16 \%$ ;  $\text{CO} = 8,5 - 18 \%$ ;  $\text{C} = 84 - 95 \%$ ; кроме того, изменяется влажность дутья, что также ведет к изменению производительности печи.

Для вагранок нормального ряда между полезной высотой печи  $H_{\Pi}$  и ее внутренним диаметром  $D$  существует эмпирическая зависимость [1]

$$H_{\Pi} = 4,345\sqrt{D}, \text{ м.} \quad (2)$$

Аналогичная эмпирическая зависимость справедлива и для доменных печей [1]:

$$H_{\Pi} = 9,39\sqrt{D_r}, \text{ м,} \quad (3)$$

где  $D_r$  – диаметр горна доменной печи, м.

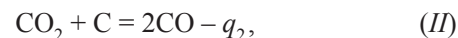
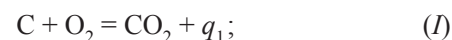
Коэффициент пропорциональности для доменных печей в 2,16 раз больше, чем для вагранок. Это обстоятельство связано с наличием в доменных печах восстановительной зоны, которая отсутствует у печей, работающих на переплав.

Для вагранок, диаметр которых меньше 500 мм, также справедлива зависимость типа (2) [1]. Основные параметры лабораторных вагранок представлены ниже:

$D$ , мм	200	300	400
$H_{\Pi}$ , мм	1950	2380	2750
$P_b$ , кг/(\text{м}^2·с)	2,08	2,08	2,08
$P_b$ , т/ч	0,235	0,529	0,940

Условия постоянства температурного режима в холостой колоше вагранок с различным внутренним диаметром.

В холостой колоше вагранки идут две последовательные реакции



где  $q_1 = 408\,842 \text{ кДж/кмоль}$ ;  $q_2 = 162\,405 \text{ кДж/кмоль}$ .

Первая реакция в кислородной зоне идет практически до конца, пока не прореагирует весь кислород дутья. Вторая реакция восстановительной зоны, как правило, заканчивается, когда прореагирует половина молекул  $\text{CO}_2$ , поступивших с газами из низлежащей кислородной зоны. Общее количество тепла, выделяющееся в холостой колоше, составит  $\Delta q = q_1 - q_2 = 408\,842 - 162\,405/2 = 327\,640 \text{ кДж/кмоль}$ .

Количество тепла, выделяющееся в единицу времени, запишется в виде [1]

$$\Delta q \frac{dc}{d\tau} = \Delta q \beta F_k c \frac{1}{1 + \text{Sm}}, \quad (4)$$

где  $c$  – концентрация реагирующего газа;  $\beta$  – коэффициент массообмена;  $F_k$  – удельная поверхность кусков топлива;  $\text{Sm}$  – критерияльное число Семенова.

Хотя геометрические параметры вагранок, включая и лабораторные, изменяются значительно, температурные условия в период плавки должны оставаться неизменными. Для этого в холостой колоше различных вагранок за счет горения кускового топлива должно выделяться в единицу времени одинаковое количество тепла, вне зависимости от размера внутреннего диаметра печи<sup>1</sup>.

От внутреннего диаметра печи зависит только общая поверхность реагирования, определяемая как [1]

$$F_k^0 = F_k H_{x,k} = \frac{6(1-\varepsilon)\varphi}{d_k} 1,165\sqrt{D} = B; \quad (5)$$

здесь  $H_{x,k} = 1,165\sqrt{D}$  [1];  $\varepsilon$  – порозность слоя топлива;  $\varphi$  и  $d_k$  – коэффициент формы и размер куса топлива.

Т а б л и ц а 1

Основные параметры вагранок [4, 5]

Показатель	Значение показателя при внутреннем диаметре печи, мм									
	500	600	700	800	900	1100	1300	1500	1800	2100
Полезная высота, мм	3000	3300	3500	3800	4000	4900	5000	5500	6300	7100
Производительность, т/ч	1,3 – 1,65	2,0 – 3,0	2,7 – 3,5	3,6 – 4,6	4,8 – 6,1	6,5 – 8,3	9,0 – 12,0	13 – 16	18 – 23	25 – 32
Номинальная производительность по уравнению (1), т/ч	1,63	2,41	3,2	4,17	5,28	7,89	11,02	14,67	21,13	28,75

<sup>1</sup> Постоянство интенсивности потерь тепла через стенки шахты регулируется толщиной огнеупорной футеровки.

Общая поверхность реагирования должна быть постоянной величиной ( $B$ ), тогда постоянным будет количество тепла, выделяемое в единицу времени, т.е. определяемое выражением (4).

Из соотношения (5) получается искомая зависимость

$$\frac{\sqrt{D}}{d_k} = \frac{B}{7(1-\varepsilon)\varphi}, \text{ или } d_k = B_1 \sqrt{D}, \quad (6)$$

где  $B_1 = \frac{7(1-\varepsilon)\varphi}{B}$  – коэффициент пропорциональности.

Определим значение  $B_1$  по данным эталонной плавки. На вагранке диам.  $D = 0,85$  м достигается максимальная температура металла  $T_m \approx 1400 - 1420$  °C при  $q_0 = 2,0$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с) после отсева кусков кокса до среднего размера  $d_k = 0,075 - 0,080$  м. Следовательно  $A_1 = d_k/\sqrt{D} = 0,081$  м<sup>0,5</sup>.

Высота кислородной зоны ( $z_{к.з.}$ ) также зависит от размера куска топлива [1]:

$$z_{к.з.} = \frac{\ln 20 d_k \text{Re}^{0,17}}{1,68(1-\varepsilon)\varphi}, \quad (7)$$

где  $\text{Re} = \frac{q_0 d_k}{\nu} \frac{\bar{T}_r}{273}$  – критериальное число Рейнольдса;  $\nu$  и  $\bar{T}_r$  – кинематическая вязкость и средняя температура газа в кислородной зоне.

Крупный размер кусков топлива повышает высоту кислородной зоны:  $z_{к.з.} \approx d_k^{1,17}$ , или с учетом выражения (6)  $z_{к.з.} \approx D^{0,585}$ , что способствует повышению температуры чугуна. При этом одновременно снижается скорость реакции ( $I$ ) горения топлива, а, следовательно, и скорость выделения тепла по геометрической координате  $z$  [1]:

$$q_0 \frac{dc}{dz} = -\psi \frac{6(1-\varepsilon)\varphi}{d_k} c \frac{1}{1+\text{Sm}}; \quad (8)$$

здесь  $\psi = \beta/\nu$  – функция переноса;  $\nu$  – скорость газа.

Продуваемость топливной насадки с ростом размера кусков топлива резко возрастает. На холодном дутье за счет замедления отдачи тепла газу в соответствии с выражением (8) в области фурм до центра холостой колоши возникают захлаживающие зоны, которые сни-

жают эффект повышения температуры металла, связанной с ростом высоты кислородной зоны. Кроме того, скорость прохождения капель чугуна через зону высоких температур возрастает с увеличением параметра  $d_k$ . Поэтому прямой зависимости температуры металла на выпуске ( $T_m$ ) от размера  $d_k$  не наблюдается, если  $H_{х.к} = 1,165\sqrt{D}$ .

С подогревом дутья температура газа в захлаживающих зонах повышается, и в соответствии с этим оптимальный размер кусков топлива будет выше значений, указанных в табл. 2.

*Температурные условия в зоне нагрева шихты для вагранок лабораторного и промышленного рядов.*

Как уже отмечалось [1],  $H_{х.к} = 1,165\sqrt{D}$ .

С уменьшением диаметра печи  $D$  снижается и высота зоны подогрева шихты ( $H_{пл}$ ) до температуры плавления:  $H_{пл} = H_{п} - H_{х.к} = 4,345\sqrt{D} - 1,165\sqrt{D} = 3,18\sqrt{D}$ .

Температура шихты на выходе из зоны нагрева ( $T''_{ш}$ ) определяется как [1]

$$T''_{ш} = T'_{ш} + (T'_r - T'_{ш}) \frac{W_r}{W_{ш}} z; \quad (9)$$

$$z = \frac{1 - \exp\left[-\left(1 - \frac{W_r}{W_{ш}}\right) \frac{\alpha_F F}{W_r}\right]}{1 - \frac{W_r}{W_{ш}} \exp\left[-\left(1 - \frac{W_r}{W_{ш}}\right) \frac{\alpha_F F}{W_r}\right]}, \quad (10)$$

где  $T'_r$  – температура газа на входе в зону нагрева;  $W_r = C_r \nu_r$  – удельная теплоемкость потока газа, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $W_{ш} = \rho_{ш} C_{ш} \nu_{ш}$  – удельная теплоемкость потока шихты, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $C_r$  и  $C_{ш}$  – теплоемкости газа и шихты;  $\nu_r$  и  $\nu_{ш}$  – скорости газа и шихты в противотоке;  $\rho_{ш}$  – насыпная плотность шихты;  $T'_{ш}$  – температура шихты на входе в зону нагрева;  $\alpha_F$  и  $F$  – коэффициент и площадь теплообмена.

Температура газа на выходе из зоны нагрева равна

$$T''_r = T'_r - (T'_r - T'_{ш}) z. \quad (11)$$

Отношение удельных теплоемкостей потоков  $W_r/W_{ш}$  не зависит от диаметра печи. Скорость схода шихты определяется из отношения

Т а б л и ц а 2

Оптимальный размер кусков кокса для вагранок различных диаметров

Показатель	Значение показателя при внутреннем диаметре печи, м									
	0,20	0,30	0,40	0,50	0,85	1,10	1,35	1,70	2,10	2,65
$H_{х.к} = 1,165\sqrt{D}$ , м	0,521	0,638	0,737	0,824	1,074	1,22	1,35	1,52	1,69	1,896
$\bar{d}_k = 0,081\sqrt{D}$ , м	0,036	0,044	0,051	0,057	0,075	0,085	0,094	0,107	0,117	0,132

$$v_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{в}}}{\rho_{\text{ш}}} = \frac{53,7 q_0 \text{O}_2^0 \frac{A}{kC}}{\rho_{\text{м}} + \frac{k}{100} \rho_{\text{к}} + \frac{u}{100} \rho_{\text{и}}}, \quad (12)$$

где  $k$  и  $u$  – расход кокса и известняка, %;  $\rho_{\text{м}}$ ,  $\rho_{\text{к}}$  и  $\rho_{\text{и}}$  – плотности металлической составляющей шихты, кокса и известняка.

От диаметра печи не зависят такие параметры, как  $C_{\text{ш}}$ ,  $C_{\text{г}}$  и  $v_{\text{г}} = q_0 \frac{\bar{T}_{\text{г}}}{273\varepsilon}$  (здесь  $\bar{T}_{\text{г}}$  – средняя температура газа в зоне нагрева), от него зависит только безразмерный критерий  $\alpha_F F / W_{\text{г}}$ , входящий в выражения для определения температуры шихты ( $T_{\text{ш}}''$ ) и газа ( $T_{\text{г}}''$ ) на выходе из зоны нагрева.

Для того, чтобы величина  $T_{\text{ш}}''$  была постоянной вне зависимости от диаметра печи, параметр  $\alpha_F F / W_{\text{г}}$  также функционально не должен зависеть от этого параметра. Следовательно, можно записать  $\alpha_F F = A_1$ , где  $A_1$  – постоянная величина, которая будет определяться соотношением между диаметром печи и средним размером кусков металлической шихты ( $\bar{d}_{\text{ш}}$ ).

Коэффициент теплообмена находится из выражения

$$\alpha_F = \frac{\bar{d}_{\text{ш}}}{7,5(1-\varepsilon)} \alpha_{\nu}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (13)$$

где  $\alpha_{\nu}$  – коэффициент теплообмена, отнесенный к единице объема шихты, Вт/(м<sup>3</sup>·К).

Б.И. Китаев для расчета коэффициента  $\alpha_{\nu}$  доменной шихты рекомендует формулу [7]

$$\alpha_{\nu} = 186 \frac{q_0^{0,9} \bar{T}_{\text{г}}^{0,3}}{\bar{d}_{\text{ш}}^{0,75}} M, \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}, \quad (14)$$

где  $M$  – коэффициент, зависящий от процентного содержания мелочи в шихте.

Ваграночная шихта по составу и по размерам фрагментов значительно отличается от доменной и состоит в основном из металла более крупной фракции.

Для коксовых вагранок при определении коэффициента теплообмена между газом и шихтой предлагается зависимость вида [8]

$$\alpha_F = 0,475 \frac{q_0^{0,65} \bar{T}_{\text{г}}}{\bar{d}_{\text{ш}}}, \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}. \quad (15)$$

Общая площадь теплообмена составит

$$F = \frac{6(1-\varepsilon)}{\bar{d}_{\text{ш}}} (H_{\text{и}} - H_{\text{х.к}}) = \frac{6(1-\varepsilon)}{\bar{d}_{\text{ш}}} 3,18 \sqrt{D}. \quad (16)$$

Подставляя выражения (15), (16) и (13) в исходную формулу  $\alpha_F F = A_1$ , имеем

$$\alpha_F F = \frac{\bar{d}_{\text{ш}}}{7,5(1-\varepsilon)} 0,475 q_0^{0,65} \frac{\bar{T}_{\text{г}}}{\bar{d}_{\text{ш}}} \frac{6(1-\varepsilon)}{\bar{d}_{\text{ш}}} 3,18 \sqrt{D} = A_1, \quad (17)$$

$$\text{или } \frac{\sqrt{D}}{\bar{d}_{\text{ш}}} = A_2, \text{ где } A_2 = 0,83 \frac{A_1}{q_0^{0,65} \bar{T}_{\text{г}}}.$$

Таким образом, получаем искомое соотношение  $\bar{d}_{\text{ш}} = \frac{\sqrt{D}}{A_2}$ , где  $A_2 = \frac{1}{A_2}$  – постоянный коэффициент. Значение коэффициента  $A_2$  определено в работе [9]:  $A_2 = \frac{0,21}{A}$ , где  $A = \frac{S_{\text{к}}}{S_0}$  – коэффициент формы куска шихты;  $S_{\text{к}}$  и  $S_0$  – площади поверхности куска шихты и равновеликого по объему шара.

В предыдущей работе [9] приведена таблица, в которой представлены расчетные значения коэффициента  $A$  для фрагментов шихты различной формы по методике работы [10]. Масса элемента шихты определена из соотношения  $M_{\text{т}} = \frac{\pi}{6} \bar{d}_{\text{ш}}^3 \rho_4 = 3,61 \cdot 10^3 \bar{d}_{\text{ш}}^3$ , кг, где  $\rho_4$  – плотность элемента шихты. Для всех значений  $A$  средние размеры кусков шихты  $\bar{d}_{\text{ш}}$  приведены к эквивалентному диаметру шара. Для  $A > 1,329$  максимальный линейный размер элемента шихты не должен превышать половины внутреннего диаметра вагранки.

Обычная шихта для выплавки чугунов марок СЧ20 и выше имеет следующий состав:

Шихтовые материалы	Содержание в шихте, %	$A$
Чугуны чушковые . . . . .	20	1,329
Лом чугуновый и возврат собственного производства . . . .	30	1,500
Лом стальной кусковый или пакетированный . . . . .	50	1,500

Среднее значение для коэффициента формы составило 1,466.

Рассчитанные по формуле  $\bar{d}_{\text{ш}} = \frac{0,21}{A} \sqrt{D} = 0,143 \sqrt{D}$  значения среднего размера элемента шихты для вагранок различного диаметра приведены ниже:

$D$ , м . . . . .	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
$\bar{d}_{\text{ш}}$ , м . . . . .	0,064	0,078	0,090	0,100	0,120	0,135
$D$ , м . . . . .	1,1	1,3	1,5	1,7	2,1	
$\bar{d}_{\text{ш}}$ , м . . . . .	0,150	0,163	0,175	0,186	0,207	

Выполнение условий подобия для вагранок с различным значением внутреннего диаметра.

Практика эксплуатации вагранок лабораторного типа с внутренними диаметрами  $D = 155$  мм [2],  $D = 200$  мм [1],  $D = 250$  мм [3] и производственного типа (начиная с  $D = 500$  мм) показывает, что основные выходные параметры – температура выпускаемого



чугуна  $T_m''$ , удельная производительность  $P_v$ , кг/(м<sup>2</sup>·с), остаются неизменными и не зависят от величины  $D$ .

Анализ проведенных расчетов позволил сделать следующее заключение. Геометрическое подобие выполняется четким соотношением между высотными параметрами печи и ее внутренним диаметром:  $H_{\text{п}} = 4,345\sqrt{D}$ ;  $H_{\text{х.к}} = 1,165\sqrt{D}$ ;  $H_{\text{пд}} = 3,18\sqrt{D}$ . Критерий Рейнольдса в области холостой колоши и в зоне подогрева шихты в вагранках любого диаметра находится в области чисел  $10^4 \leq Re \leq 10^5$ . Сопротивление слоя шихты при таких числах  $Re$  не зависит от данного критерия и находится в автомодельной области [1, 10, 11]. Движение газовых потоков в области фурм потенциальное [12, 13] вне зависимости от диаметра печи. Слой кокса в области фурм неподвижен без образования зон циркуляции. Физические параметры дутья и газов в шахте вагранки любого диаметра (плотность, вязкость, теплопроводность и теплоемкость) постоянны, так как для плавки применяется твердое топливо (кокс, антрацит, тощие угли) одинакового состава, состав дутья идентичен, что ведет к выполнению условия  $Pr = \text{idem}$ . Средний размер кусков кокса в холостой колоше подчиняется закономерности  $\bar{d}_k = 0,081\sqrt{D}$ , м, что обеспечивает постоянство температурных условий в период плавки для всех вагранок, включая лабораторные и печи промышленного ряда. Постоянство основного критерия теплообмена в противотоке  $\alpha_F F / W_r = \text{idem}$  и симплекса  $W_r / W_{\text{ш}} = \text{idem}$  для лабораторных и промышленных вагранок обеспечивается зависимостью среднего размера фрагмента шихты  $\bar{d}_{\text{ш}} = 0,143\sqrt{D}$ . Постоянство температуры перегрева капель жидкого чугуна в холостой колоше вагранок различного внутреннего диаметра гарантируется зависимостью высоты кислородной зоны  $z_{\text{к.з}}$  от среднего размера куса топлива  $\bar{d}_k$ , а следовательно, и от диаметра печи. Удельная производительность вагранки не зависит от ее диаметра, а определяется удельной подачей дутья  $q_0 = 1,9 - 2,2$ , м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с), содержанием кислорода в дутье  $O_2^0$ , %, расходом кокса  $k$ , %, содержанием

углерода в топливе  $C$ , %, составом отходящих газов по  $CO_2$  и по  $CO$ , %.

**Выводы.** Температурный режим в холостой колоше и в зоне нагрева шихты не зависят от диаметра печи при условии выполнения основных соотношений между геометрическими параметрами печи, размерами кусков кокса и шихты:  $H_{\text{п}} = 4,345\sqrt{D}$ ;  $H_{\text{х.к}} = 1,165\sqrt{D}$ ;  $\bar{d}_k = 0,081\sqrt{D}$ ;  $\bar{d}_{\text{ш}} = 0,143\sqrt{D}$ . Представленные соотношения вытекают из главных требований (теорем) теории подобия и натурального моделирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Бедарев С.А. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных печах малого диаметра. – М.: Теплотехник, 2010. – 379 с.
2. Леви Л.И. Кислород в процессе получения чугуна. – М.: Машгиз, 1955. – 275 с.
3. Мариенбах Л.М. Интенсификация ваграночного процесса. – М.: ГНТИ, 1964. – 386 с.
4. Гиршович Н.Г. Чугунное литье. – М.: Металлургиздат, 1949. – 706 с.
5. Брилах М.М., Горфинкель В.М. Модернизация вагранок. – М.: Машиностроение, 1966. – 173 с.
6. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н.Г. Гиршовича. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
7. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.П. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 354 с.
8. Грачев В.А., Черный А.А. Современные методы плавки чугуна. – Саратов: Приволж. кн. изд., 1973. – 342 с.
9. Феоктистов А.В., Модзелевская О.Г. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 4. С. 29 – 34.
10. Чапыгин Ю.В., Еринов А.Е. Использование природного газа при плавке чугуна. – Киев: Наукова думка, 1976. – 238 с.
11. Богданди Л.Ф., Энгель Г.Ю. Восстановление железных руд. – М.: Металлургия, 1971. – 519 с.
12. Численное моделирование в аэрогидродинамике / Под ред. Г.Г. Черного. – М.: Наука, 1986. – 262 с.
13. Селянин И.Ф., Маркс Г.Л. // Литейное производство. 1987. № 12. С. 23 – 25.

© 2014 г. Феоктистов А.В., Модзелевская О.Г.,  
Бедарев С.А., Куценко А.А.  
Поступила 26 мая 2014 г.

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

## THE PECULIARITIES OF PHYSICAL MODELLING OF HEAT-EXCHANGE AND AERODYNAMICAL PARAMETERS IN THE CUPOLA PROCESS

**Feoktistov A.V.**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor*  
(umu@sibsiu.ru)

**Modzelevskaya O.G.**, *Senior Lecturer*

**Bedarev A.S.**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor*

**Kutsenko A.A.**, *Postgraduate*

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

**Abstract.** This paper deals with the transfer and the adequacy of the results of melting, obtained on small-diameter cupola, on cupola of industrial purpose. The analysis of the similarity consideration in the transition from a small-diameter cupola to the larger diameter cupola

was conducted, which showed that the basic requirements of a full-scale (physical) modeling were carried out. It was concluded that the thermal behavior, in the idler and the charge heating zone, does not depend on the diameter of furnace provided the basic ratio between the geometric parameters of the furnace, the parameters of the charge and coke, which are following from the major requirements (theorem) of the similarity law and full-scale modeling.

**Keywords:** cupola, modeling, similarity, geometric parameters of the furnace, charge, coke.

## REFERENCES

1. Selyanin I.F., Feoktistov A.V., Bedarev S.A. *Teoriya i praktika intensifikatsii tekhnologicheskogo protsessa v shakhtnykh pechakh malogo*

- 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.