

УДК 669.162.12:536.244

ИЗМЕНЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПОРОЗНОСТИ СЛОЯ ОКАТЫШЕЙ ПО ДЛИНЕ ОБЖИГОВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЫ*

Юрьев Б.П., к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики
в металлургии (yurev-b@mail.ru)

Гольцев В.А., к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики
в металлургии (v.a.qoltsev@urfu.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Рассмотрены сложности в определении величины газодинамического сопротивления слоя окатышей в процессе термообработки на обжиговой машине конвейерного типа, связанные со значительными изменениями структуры слоя из-за его усадки в процессе сушки, низкой прочности сырых окатышей, сегрегации по высоте слоя, спекания и оплавления окатышей. В результате газодинамическое сопротивление слоя окатышей на конвейерных машинах значительно превышает величину сопротивления, которую получают при лабораторных исследованиях газодинамики слоя окатышей. Учитывая влияние большого количества факторов на структуру обжигаемого слоя окатышей, учесть которые можно только в их совокупном действии, введено понятие эквивалентной порозности. В результате расчета величины эквивалентной порозности по имеющимся в литературе данным и данным, полученным при отработке технологии обжига окатышей в высоком слое на конвейерных машинах Качканарского ГОКа, выявлена закономерность ее распределения по длине конвейерной машины. Установлено, что наиболее существенно порозность слоя снижается из-за усадки слоя в зоне сушки и растрескивания окатышей на выходе из нее. Проведенный анализ расчетных выражений для определения газодинамических характеристик слоя из окатышей позволил получить зависимости, которые с достаточной степенью точности можно использовать для расчета газодинамических характеристик слоя на конвейерных машинах с учетом различной порозности. Полученные в работе результаты могут быть использованы при определении газодинамических и тепловых режимов, обеспечивающих работу обжиговых конвейерных машин с низкими удельными расходами топлива и высоким качеством обожженного продукта.

Ключевые слова: коэффициент газодинамического сопротивления, эквивалентная порозность, железорудные окатыши, режим, обжиговая конвейерная машина, зона, термическая обработка, параметры, расход топлива, качество.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-116-123

Определение газодинамического сопротивления слоя окатышей на обжиговых машинах конвейерного типа связано с определенными трудностями. В процессе обжига железорудных окатышей структура слоя подвергается значительным изменениям. Причинами этих изменений являются усадка слоя окатышей в процессе сушки из-за переувлажнения и относительно низкой прочности сырых окатышей, растрескивания окатышей, значительного увеличения мелочи внизу слоя, сегрегации по высоте слоя, спекания и оплавления окатышей. Образование сегрегации по высоте и ширине слоя происходит уже в процессе укладки окатышей на ленту обжиговой машины. Отмеченные факторы приводят, с одной стороны, к увеличению газодинамического сопротивления слоя, а с другой, вследствие локального воздействия ряда факторов, к увеличению неоднородности структуры слоя. Изменение газодинамического сопротивления слоя окатышей приводит к неравномерному и неполному их обжигу по длине ленты. Результаты некачественного обжига сказываются на механическом износе и повышенном образовании пыли в

доменном процессе [1]. Также при помощи математических моделей исследовалось падение давления потока в плотном слое по высоте и радиусу [2 – 4] и газодинамика псевдооживленного состояния частиц [5 – 7]. Определенного интереса заслуживают работы авторов, исследующих на математических моделях газодинамику трехфазных потоков [8], охлаждение слоя окатышей [9, 10], а также падение давления в плотном слое, осложненное процессами адсорбции и десорбции [11].

Большое влияние на газодинамическое сопротивление слоя оказывает его порозность, под которой понимают отношение объема пустот слоя к общему объему слоя и которая по ходу обжига может уменьшаться на 20 – 30 %. Сама порозность слоя зависит от фракционного состава окатышей, способа их загрузки и других факторов. Погрешности в определении порозности оказывают большее влияние на газодинамические характеристики слоя, чем погрешности в реализации предлагаемой ниже методики расчета. Так, авторы работы [12] отмечают увеличение газодинамического сопротивления слоя окатышей в 3 – 7 раз уже в конце зоны подогрева и снижение коэффициента теплопередачи из-за неравномерной структуры слоя в 8 – 10 раз. Наиболее

* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, постановление № 211, контракт № 02.A03.21.0006.

сильно изменение структуры слоя сказывается на величине его порозности. Например, при исходной порозности слоя сырых окатышей порядка 0,38 порозность слоя после обжига может снизиться до 0,27 – 0,30 [13]. Поэтому целесообразно ввести понятие эквивалентной порозности слоя $m_{\text{экв}}$, которое в наиболее общем виде отражает изменение газодинамических свойств слоя в процессе термической обработки [14].

Целью настоящей работы является изучение влияния изменения эквивалентной порозности слоя по длине обжиговой конвейерной машины на газодинамическое сопротивление слоя окатышей.

Разработка любых методов расчета процессов в плотном слое осложнена как методическими трудностями определения тех или иных параметров, так и интерпретацией полученных экспериментальных данных в связи с большим их разбросом, обусловленным принципиальной неповторяемостью опытных данных. Поэтому всегда существует вероятность того, что действительные локальные параметры слоя будут заметно отличаться от вычисленных средних. Это требует при газодинамических расчетах слоя введения определенного запаса прочности [15 – 18]. Следовательно, газодинамическая теория плотного слоя принципиально не может быть точной. Подтверждением этому служит наличие многочисленных расчетных формул (только для газодинамического сопротивления их более сотни), справедливых исключительно для тех условий, в которых они получены.

Вначале проведем анализ расчетных выражений для определения газодинамических характеристик слоя из железорудных окатышей.

Перепад давления в неподвижном слое Δp , Па, обычно находят из выражения [19 – 21]

$$\Delta p = \zeta_{\text{сл}} \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2}{2} \frac{H}{d_{\text{ср}}} k_t, \quad (1)$$

в котором $\zeta_{\text{сл}} = f(\text{Re}_{\text{сл}}, m) = f_1(\text{Re}_{\text{сл}}) f_2(m) = f_1(\text{Re}_{\text{сл}}) f_2^0(m)$ – коэффициент газодинамического сопротивления слоя; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³; $w_{\text{г}}$ – скорость газа в свободном сечении слоя, м/с; H – высота слоя, м; $k_t = \frac{t_{\text{г}} + 273}{273}$;

$t_{\text{г}}$ – температура газа, °С; $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр окатышей, м; $\text{Re}_{\text{сл}}$ – число Рейнольдса; m – порозность слоя, доли ед.; $f_2^0(m)$ – функция, учитывающая изменение параметра $\zeta_{\text{сл}}$ при отклонении порозности слоя m от ее среднего значения m_0 .

Функция $f_2^0(m)$ мало зависит от формы, размеров, материала частиц слоя. В работах [22, 23] приведены расчетные зависимости для определения $\zeta_{\text{сл}}$: для шаровых кусков

$$\zeta_{\text{сл}} = \frac{1,53}{m^{4,2}} \left(0,3 + \frac{3}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,7}} + \frac{30}{\text{Re}_{\text{сл}}} \right); \quad (2)$$

для кусков неправильной формы

$$\zeta_{\text{сл}} = \frac{1,53}{m^{4,2}} \left(1 + \frac{15}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,5}} + \frac{75}{\text{Re}_{\text{сл}}} \right). \quad (3)$$

В пределах $m = 0,25 - 0,45$ функция $f_2(m)$ изменяется незначительно, что видно из следующих данных:

m	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
$\frac{0,45}{(1-m)\sqrt{m}}$	1,20	1,19	1,17	1,17	1,20	1,26

Ее можно принять равной 1,185, поэтому можно записать

$$\zeta_{\text{сл}} = f_{\text{ш}}(\text{Re}_{\text{сл}}) f_2(m); \quad \zeta_{\text{сл}} = f_{\text{к}}(\text{Re}_{\text{сл}}) f_2(m),$$

где

$$f_2(m) = \frac{1}{m^{4,2}}. \quad (4)$$

Формулу Н.В. Жаворонкова [24] для слоя шаровых частиц $\zeta = \frac{2,22}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,2}}$ можно преобразовать в выражение

$$\zeta_{\text{сл}} = \frac{14,44}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,2}} \frac{(1-m)^{1,2}}{m^3}, \quad (5)$$

тогда

$$f_2(m) = \frac{(1-m)^{1,2}}{m^3}. \quad (6)$$

Несмотря на внешнее различие функций $f_2(m)$ по уравнениям (4) и (6), они численно близки в диапазоне $m = 0,25 - 0,45$.

Результаты сравнения некоторых функций, выражающих зависимость гидравлического сопротивления слоя от порозности m , приведены в табл. 1.

Если полагать более верной универсальную зависимость $f_2(m) = \frac{1}{m^{4,2}}$, то различия между относительными значениями $f_2^0(m)$ по позициям 1 и 2 (табл. 1) не превышают 22 %. Функция $f_2(m) = \frac{1}{m^4}$ обладает промежуточными значениями между формулами по позициям 1 и 2. Поскольку точная функция $f_2(m)$ для окатышей пока неизвестна, то для них принимаем

$$f_2(m) = \frac{1}{m^4}. \quad (7)$$

Функция $f_2^0(m) = \left(\frac{0,45}{m} \right)^4$ с уменьшением порозности увеличивает расчетное значение $\zeta_{\text{сл}}$ в сравнении с

Т а б л и ц а 1

Зависимость газодинамического сопротивления слоя от порозности

Table 1. Dependence of gas-dynamic resistance of the layer on porosity

Номер п/п	Вид функции	Значения функций в зависимости от порозности слоя m					
		0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
1	$\frac{(1-m)^{1,2}}{m^3}$	<u>45,32</u> 8,46	<u>24,14</u> 4,50	<u>13,91</u> 2,60	<u>8,46</u> 1,58	<u>5,36</u> 1,00	<u>3,48</u> 0,65
2	$\frac{1}{m^{4,2}}$	<u>338,00</u> 10,81	<u>157,00</u> 5,49	<u>81,21</u> 2,87	<u>46,90</u> 1,64	<u>28,61</u> 1,00	<u>18,38</u> 0,64
3	$\frac{1}{m^{4,0}}$	<u>256,00</u> 10,50	<u>123,50</u> 5,07	<u>66,67</u> 2,73	<u>39,06</u> 1,60	<u>24,38</u> 1,00	<u>16,00</u> 0,66

П р и м е ч а н и е. В числителе – $f_2(m)$, в знаменателе – относительные значения функции $f_2^o(m) = \frac{f_2(m)}{f_2^o(0,45)}$.

$f_2^o(m)$ по уравнению (6), но не более, чем на 15 %, и уменьшает $\zeta_{\text{сл}}$ в сравнении с $f_2^o(m)$ по формуле (4), но не более, чем на 10 %. Эти погрешности соизмеримы с погрешностями расчета $\zeta_{\text{сл}}$ по формулам (2), и (3) или (5) при изменении порозности всего на 2 – 3 %.

Коэффициент газодинамического сопротивления слоя можно рассчитывать по формуле

$$\zeta_{\text{сл}} = f_1(\text{Re}_{\text{сл}}) \left(\frac{m_0}{m} \right)^4. \quad (8)$$

При $0,3 \leq m_0 \leq 0,5$ ошибка по сравнению с расчетом по точным формулам (2), (3) и (5) не превышает 15 – 20 %. Приняв в качестве функции $f_1(\text{Re}_{\text{сл}})$ формулу, полученную авторами работы [25]

$$f_1(\text{Re}_{\text{сл}}) = \frac{100}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}} \quad (9)$$

и полагая $m_0 = 0,46$, приходим к следующей обобщенной формуле:

$$\zeta_{\text{сл}} = \frac{100}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}} \left(\frac{0,46}{m} \right)^4 = \frac{4,48}{m^4 \text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}}. \quad (10)$$

С точностью до $\pm 3 \%$ в диапазоне $\text{Re}_{\text{сл}} = 50 - 5000$ те же результаты дает формула

$$\zeta_{\text{сл}} = \frac{4,1}{m^4 \text{Re}_{\text{сл}}^{0,2}}. \quad (11)$$

Если же воспользоваться формулой [18] $f_1(\text{Re}_{\text{сл}}) = \frac{3300}{\text{Re}_{\text{сл}}} + 16$, то при $m = 0,45 - 0,50$, $m_0 = 0,475$ и $\text{Re}_{\text{сл}} = 200 - 2000$ имеем

$$\zeta_{\text{сл}} = \left(\frac{168}{\text{Re}_{\text{сл}}} + 0,8 \right) \frac{1}{m^4}. \quad (12)$$

Формула (12) в диапазоне $\text{Re}_{\text{сл}} = 200 - 2000$ дает те же результаты, что и формула (10). Получены следующие результаты расчета $\zeta_{\text{сл}}$ по формулам (10) – (12):

Формула	Величина $\zeta_{\text{сл}}$ для значений Re								m
	50	200	300	500	1000	2000	5000		
10	43,3	32,2	29,5	26,4	22,8	19,7	16,2	0,46	
11	41,9	31,8	29,3	26,5	23,0	20,1	16,7	0,46	
12	–	36,6	30,4	24,4	20,9	19,8	–	0,46	

Ниже сделана попытка изучить закономерности изменения порозности слоя окатышей по длине обжиговой машины конвейерного типа. Как уже отмечалось, на структуру слоя окатышей оказывает влияние большое количество факторов, учесть которые по отдельности не представляется возможным, а можно оценить только их совокупное действие. С этой целью было введено понятие эквивалентной порозности $m_{\text{экв}}$. Остальные характеристики слоя окатышей (d, H) в процессе термической обработки, во-первых, меняются незначительно, во-вторых, влияют на величину газодинамического сопротивления слоя гораздо слабее, чем порозность.

Сведений о закономерностях изменения порозности слоя окатышей в процессе обжига в литературе очень мало. В работе [25] в опытах на лабораторной установке типа аглочаша отмечено значительное возрастание (в 3 – 7 раз) газодинамического сопротивления слоя после завершения процессов сушки и подогрева окатышей (т.е. еще до начала обжига). В исследовании [26] отмечается возможность значительного образования мелочи в начале зоны подогрева при недостаточно эффективной сушке окатышей. В работе [13] указывается на резкое (в 10 – 15 %) возрастание газодинамического сопротивления слоя окатышей в начале зоны охлаждения из-за вдувания мелочи внутрь слоя. Все эти сведения имеют несистематический и, по существу, качественный характер.

В настоящей работе сделана попытка установить характер изменения порозности слоя окатышей вдоль обжиговой машины на основании имеющихся в литературе опытных данных [27]. В табл. 2 приведены опытные данные, позволяющие рассчитывать коэффициент газодинамического сопротивления слоя на обжиговой машине и эквивалентную порозность.

Необходимые расчетные параметры и результаты расчета коэффициента газодинамического сопротивления слоя $\zeta_{\text{сл}}$ и эквивалентной порозности $m_{\text{эв}}$ для зон сушки, рекуперации и охлаждения приведены в табл. 3.

Коэффициент $\zeta_{\text{сл}}$ определяли из выражения (1): $\zeta_{\text{сл}} = \Delta p \frac{2d}{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H k_l}$. Средняя температура газа в слое при-

нята равной $t_{\text{г}} = \frac{\bar{t}_{\text{г.вх}} + \bar{t}_{\text{г.вых}}}{2}$, где $\bar{t}_{\text{г.вх}}$ и $\bar{t}_{\text{г.вых}}$ – средние по зоне температуры газа на входе в слой и на выходе из него. Высота постели везде принята равной 0,07 м. Диаметр окатышей принят на основании расчета $d_{\text{ср}}$ по формуле среднелогарифмического диаметра. Расчет эквивалентной порозности проведен в соответствии с формулой (10). Для облегчения расчета на рис. 1 пред-

ставлены графики функций $\frac{1}{m^4}$ и $\frac{4,48}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}}$. Величину $m_{\text{эв}}$

находили из выражения (10): $m_{\text{эв}} = \left(\frac{4,48}{\zeta_{\text{сл}} \text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}} \right)^{1/4}$.

Расчет эквивалентной порозности слоя проводился в такой последовательности в соответствии с формулой (10). Вначале вычислялось число Рейнольдса для слоя по формуле $\text{Re}_{\text{сл}} = \frac{w_{\text{г}} d_{\text{ср}}}{\nu_{\text{г}}}$, где $w_{\text{г}}$ – средняя скорость

фильтрации газа через слой окатышей, м/с; $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр окатышей, вычисленный из выражения для среднелогарифмического диаметра, м; $\nu_{\text{г}}$ – коэффициент кинематической вязкости газа, определяемый в зависимости от средней температуры газа в слое окатышей, м²/с. С помощью рис. 1 определялось значение комплекса $\frac{4,48}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}}$. С использованием данных табл. 2 и 3 из выражения (1) рассчитывалось значение коэффициента $\zeta_{\text{сл}}$ и из уравнения (10) определялась величина эквивалентной порозности $m_{\text{эв}}$.

Т а б л и ц а 2

Данные для расчета коэффициента газодинамического сопротивления слоя

Table 2. Data for the calculation of the gas-dynamic resistance coefficient of the layer

Зона машины	Опытные параметры					
	$w_{\text{г}}, \text{ м/с}$	$\bar{t}_{\text{г.вх}}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{\text{г.вых}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$d_{\text{ср}}, \text{ м}$	$H_{\text{ср}}, \text{ м}$
Сушки	0,700	295	50	1750	0,0130	0,430
Сушки	0,425	195	50	550	0,0130	0,437
Рекуперации	0,425	1000	400	2100	0,0130	0,437
Охлаждения	0,474	450	860	1110	0,0142	0,184
Охлаждения	0,678	450	860	1870	0,0142	0,151
Охлаждения	0,734	450	860	2830	0,0142	0,193

Т а б л и ц а 3

Расчетные параметры и результаты расчета коэффициента газодинамического сопротивления слоя и эквивалентной порозности

Table 3. Calculated parameters and calculation data of the gas-dynamic resistance coefficient of the layer and equivalent porosity

Зоны машины	$\bar{t}_{\text{г}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$H, \text{ м}$	$\rho_{\text{г}} w_{\text{о}}^2, \text{ кг/(с}^2\cdot\text{м)}$	$d_{\text{ср}}, \text{ м}$	$\zeta_{\text{сл}}$	$\text{Re}_{\text{сл}}$	$m_{\text{эв}}, \text{ доли ед.}$
Сушки	175	1670	0,500	0,632	0,0130	83,8	494,2	0,337
Сушки	125	530	0,507	0,234	0,0130	79,6	329,2	0,349
Рекуперации	750	2000	0,460	0,234	0,0130	128,8	170,0	0,321
Охлаждения	600	1110	0,184	0,290	0,0142	184,6	222,5	0,289
Охлаждения	600	1870	0,151	0,593	0,0142	185,3	318,2	0,283
Охлаждения	600	2830	0,193	0,695	0,0142	197,2	344,5	0,281

П р и м е ч а н и е. Здесь и выше параметры для зон сушки и рекуперации рассчитаны по производственным данным; для зон охлаждения – по данным работы [16].

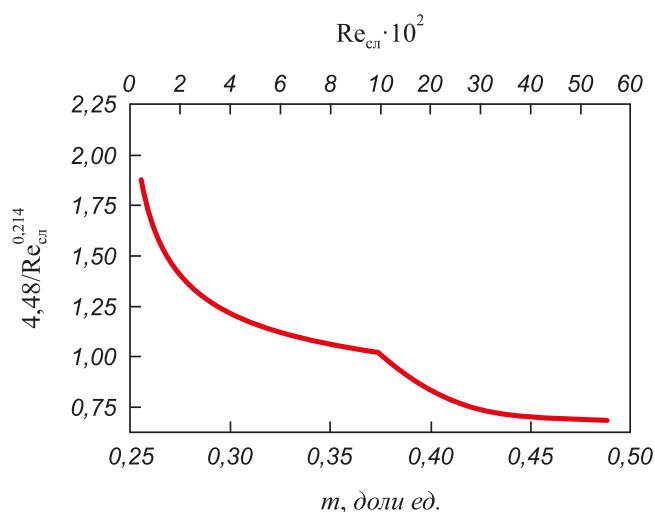


Рис. 1. График функции $4,48/\text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}$

Fig. 1. Graph of the function $4,48/\text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}$

Поскольку представленные результаты по величине $m_{\text{экв}}$ малочисленны, были просчитаны опытные данные, полученные при отработке технологии обжига окатышей в высоком слое на Качканарском горно-обогатительном комбинате (КачГОКе). Эти данные систематизированы в табл. 4. С целью облегчения расчета сделан ряд допущений относительно средней температуры газа, которую на входе в слой (и выходе из слоя) в зоне подогрева и обжига рассчитывали по формуле $\bar{t}_r = \frac{\sum \bar{t}_{ri} n_i}{\sum n_i}$, где \bar{t}_{ri} – средняя температура газа на входе в слой (или на выходе из слоя) в пределах подзоны; n_i – число камер подзоны.

Результаты расчета промежуточных параметров k_t , t_r , $w_r^2 \rho_r$ и значения $m_{\text{экв}}$ в соответствующих зонах приведены в табл. 5. Все результаты расчета $m_{\text{экв}}$ по данным работы обжиговых машин на КачГОКе приведены ниже:

Т а б л и ц а 4

Исходные данные для расчета газодинамических характеристик слоя окатышей обжиговых машин № 1 и № 3 КачГОКа

Table 4. Basic data for the calculation of gas-dynamic characteristics of pellets layer of burning machines no. 1 and no. 3 of Kachkanar mining and processing works

Параметр	Значения параметров для зоны						
	сушки	подогрева I	подогрева II	обжига I	обжига II	рекуперации	охлаждения
Обжиговая машина № 3, камеры							
	1 – 3	6 – 7	8 – 11	12 – 14	15 – 17	18 – 22	23 – 31
$\bar{t}_{\text{г.вх}}, ^\circ\text{C}$	300	700	1100	1300	1300	850	20
$\bar{t}_{\text{г.вых}}, ^\circ\text{C}$	50	150	500	850	1150	430	–
$w_r^2, \text{м/с}$	1,08	0,75	0,75	0,61	0,61	0,65	–
$\Delta P, \text{Па}$	2650	2550	2550	2550	2550	3000	1450
$\bar{H}, \text{м}$	0,37	0,35	0,35	0,35	0,35	0,34	0,34
Обжиговая машина № 1, камеры							
	1 – 5	6 – 7	8 – 11	12 – 14	15 – 17	18 – 22	23 – 31
$\bar{t}_{\text{г.вх}}, ^\circ\text{C}$	300	600	1080	1300	1300	1020	20
$\bar{t}_{\text{г.вых}}, ^\circ\text{C}$	50	100	200	550	1000	350	–
$w_r^2, \text{м/с}$	0,70	0,71	0,71	0,55	0,55	0,39	–
$\Delta P, \text{Па}$	1600	4550	4550	4550	4550	1900	3050
$\bar{H}, \text{м}$	0,50	0,47	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46
Обжиговая машина № 1, камеры							
	1 – 5	6 – 7	8 – 11	12 – 14	15 – 17	18 – 22	23 – 31
$\bar{t}_{\text{г.вх}}, ^\circ\text{C}$	200	600	1100	1300	1300	1000	20
$\bar{t}_{\text{г.вых}}, ^\circ\text{C}$	50	100	200	500	1000	350	–
$w_r^2, \text{м/с}$	0,47	0,70	0,70	0,54	0,54	0,47	–
$\Delta P, \text{Па}$	470	5500	5500	550	5500	2500	2450
$\bar{H}, \text{м}$	0,50	0,47	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46

К расчету эквивалентной порозности слоя окатышей на обжиговой машине

Table 5. To the calculation of equivalent porosity of the pellets layer on a burning machine

Зона	Параметры							
	$\bar{t}_r, ^\circ\text{C}$	k_t	$H, \text{м}$	$\rho_r w_r^2, \text{кг}/(\text{с}^2 \cdot \text{м})$	$\Delta P, \text{Па}$	$\text{Re}_{\text{сл}}$	$\zeta_{\text{сл}}$	$m_{\text{экв}}, \text{доли ед.}$
Обжиговая машина № 3 КачГОКа								
Сушки	175	1,64	0,37	1,505	2650	762,4	75,5	0,334
Подогрева и обжига	900	4,30	0,35	0,596	2550	249,2	73,9	0,360
Рекуперации	750	3,75	0,34	0,545	3000	259,7	112,3	0,324
Обжиговая машина № 1 КачГОКа								
Сушки	175	1,64	0,50	0,632	1600	494,2	80,3	0,341
Подогрева и обжига	800	3,93	0,47	0,512	4550	244,6	125,1	0,317
Рекуперации	750	3,75	0,46	0,196	1900	155,8	146,1	0,312
Обжиговая машина № 1 КачГОКа								
Сушки	125	1,46	0,50	0,285	480	364,1	60,1	0,372
Подогрева и обжига	800	3,93	0,47	0,496	5500	240,7	156,1	0,300
Рекуперации	750	3,75	0,46	0,285	2500	187,8	133,5	0,313

Значения $m_{\text{экв}}$ по зонам

сушки подогрева и обжига рекуперации

Из табл. 5

0,334	0,360	0,324
0,341	0,317	0,312
0,372	0,300	0,313

Из вышеприведенных данных

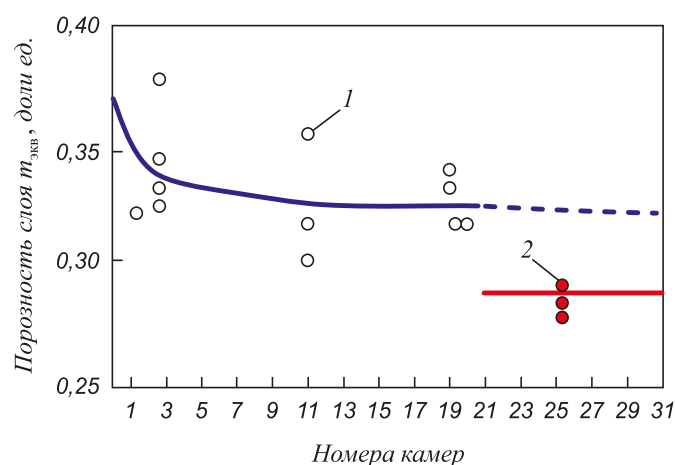
0,337	—	—
0,349	—	0,321

Среднее

0,347	0,326	0,317
-------	-------	-------

По результатам расчета параметра $m_{\text{экв}}$ на рис. 2 приведена средняя кривая распределения $m_{\text{экв}}$ по длине машины. Значение $m_{\text{экв}}$, полученное по данным работы [20], несколько занижено. По представленным значениям порозность слоя в зоне сушки составляет 0,34 – 0,35, в зоне подогрева и обжига 0,32 – 0,33; в зоне рекуперации 0,31 – 0,32; в зоне охлаждения (с учетом выноса мелочи в слой) можно ожидать порозность слоя 0,30 – 0,31. В целом по машине средняя порозность слоя окатышей оказывается равной 0,32 – 0,33. Скорее всего, на величину порозности слоя оказывает влияние изменение его структуры, связанное с усадкой в процессе сушки из-за переувлажнения. По окончании процесса сушки отмечается образование значительной доли мелких фракций из-за растрескивания части окатышей и соответствующее изменение порозности слоя. В зонах обжига при нарушении режимов термической обработки может наблюдаться оплавление окатышей и увеличение газодинамического сопротивления слоя.

Выводы. Проведен анализ расчетных выражений для определения коэффициента газодинамического сопротивления слоя окатышей и даны рекомендации по их применению с использованием опытных данных, полученных при работе обжиговых конвейерных машин. Установлены закономерности изменения порозности слоя окатышей в различных зонах. Полученные данные могут быть использованы при оптимизации газодинамических и тепловых режимов работы конвейерных машин с целью повышения их технико-экономических показателей.

Рис. 2. Распределение порозности $m_{\text{экв}}$ по длине обжиговой машины:

1 – рассчитанное по производственным данным;
2 – по данным работы [16]

Fig. 2. Distribution of porosity $m_{\text{экв}}$ along the length of burning machine:

1 – counted on the production data; 2 – according to [16]

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Liu H., Jonsson L. T. I., Olofsson U., and Jönsson P. G. A Simulation Study of Particles Generated from Pellet Wear Contacts during a Laboratory Test // *ISIJ International*. 2016. Vol. 56, No. 11, pp. 1910–1919.
- Panic B., Janiszewski K. Model investigations 3D of gas-powder two phase flow in descending packed bed in metallurgical shaft furnaces // *Metalurgija*. 2014. Vol. 53 (3), pp. 331–334.
- Liu, Y., Su, F.-Y., Wen Z. CFD modeling of flow, temperature, and concentration fields in a pilot-scale rotary hearth furnace // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014. Vol. 45 (1), pp. 251–261.
- Dai C., Lei Z., Li Q. Pressure drop and mass transfer study in structured catalytic packings // *Sep. Purif. Technol.* 2012. Vol. 98 (1), pp. 78–87.
- Li L., Remmelgas J., van Wachem B.G.M. Effect of drag models on residence time distributions of particles in a wurster fluidized bed: a DEM-CFD study // *Kona powder and particle journal*. 2016. Vol. 33, pp. 264–277.
- Дмитриев Е.А., Носырев М.А., Трушин А.М. К вопросу определения порозности псевдоожиженного слоя в системе твердых частиц – газ // *Химическая промышленность сегодня*. 2013. № 9. С. 53–56.
- К вопросу о порозности неоднородного псевдоожиженного слоя / Е.А. Дмитриев, О.В. Кабанов, М.В. Куликов, М.А. Носырев, А.М. Трушин // *Теоретические основы химической технологии*. 2015. Т. 49. № 6. С. 644–650.
- Guo L., Morita K., Tobita Y. Numerical simulation of three-phase flows with rich solid particles by coupling multi-fluid model with discrete element method // *Proceedings of the 20th international conference on nuclear engineering and the ASME 2012 power conference*. 2012. Vol. 4, pp. 371–382.
- Croft T. N., Cross M., Slone A. K. CFD analysis of an induration cooler on an iron ore grate-kiln pelletising process // *Minerals engineering*. 2009. Vol. 22, pp. 859–873.
- Barati M. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system // *International journal of mineral processing*. 2008. Vol. 89 (1–4), pp. 30–39.
- Todd R.S., Webley, P.A. Pressure drop in a packed bed under non-adsorbing and adsorbing conditions // *Industrial & engineering chemistry research*. 2005. Vol. 44 (18), pp. 7234–7241.
- Schults H.J., Abel O. Durck Störungsverhalten von Formkoks-Erz-Stückkoks-Systemen // *Arch. Eisenhüttenwesen*. 1974. Bd. 45. No. 5. S. 279–285.
- Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.В. Евстюгин и др. Под ред. академика Л.И. Леонтьева. – Екатеринбург: НППП ТОРЭКС, 2012. – 340 с.
- Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A., Lugovkin V.V., Yarchuk V.F. Hydraulic Drag of Dense Beds Consisting of Particles of Different Shape // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 9, pp. 662–668.
- Брюханов О.Н., Коробко В.И., Мелик-Аракелян А.Т. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики. – М.: Изд-во ИНФРА-М, 2012. – 253 с.
- Ртищев А.С. Теоретические основы гидравлики и теплотехники. – Ульяновск: изд. УлГТУ, 2007. – 171 с.
- Стулов В.П. Лекции по газовой динамике. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 192 с.
- Брюханов О.Н., Мелик-Аракелян А.Т., Коробко В.И. Основы гидравлики и теплотехники. – М.: Академия, 2011. – 240 с.
- Гидравлический расчет трубопроводов и выбор тягостельных средств, обеспечивающих работу промышленных печей / С.Н. Гушин, М.Д. Казяев, Е.В. Киселев, В.С. Шаврин, Б.П. Юрьев. Екатеринбург: изд. УрФУ, 2011. – 140 с.
- Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
- Азров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.
- Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н. Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 535 с.
- Волков К.Н., Емельянов В.Н. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 468 с.
- Чечеткин А.В. Высокотемпературные теплоносители. – М.: Энергия, 1971. – 496 с.
- Ровенский И.И., Бережной Н.Н. Исследование газопроницаемости слоя окатышей // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1964. № 1. С. 27–32.
- Теплотехника окускования железорудного сырья / С.Г. Братчиков, Ю.А. Берман, Я.Л. Белоцерковский и др. – М.: Металлургия, 1970. – 344 с.
- Аэродинамические характеристики обжиговых конвейерных машин / Р.Ф. Кузнецов, Г.М. Майзель, Я.Л. Белоцерковский и др. // *Металлург*. 1974. № 7. С. 27–31.

Поступила 14 июня 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 2, pp. 116–123.

CHANGE OF EQUIVALENT LAYER POROSITY OF PELLETS ALONG THE LENGTH OF BURNING CONVEYOR MACHINE

B.P. Yur'ev, V.A. Gol'tsev

**Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia**

Abstract. Difficulties in determining the flow resistance of layer of pellets in the burning conveyor type machines during the heat treatment, associated with significant changes in the layer structure due to its shrinkage during the drying process, the low strength of raw pellets, adjustment layer segregation, sintering and melting of pellets, were considered. As a result, flow resistance of pellets layer on conveyor machines greatly exceeds the resistance value which is obtained in laboratory tests of gas dynamics of pellet layer. According to the impact of many factors on the structure of a burnt pellets layer, which can be taken into account only in their cumulative effect, the authors have introduced the concept of an equivalent porosity. As a result of calculating the amount of equivalent porosity with the

available literature data and the data obtained in working out the pellets burning technology in a high layer on Kachkanar conveyor machines, a pattern of its distribution along the length of the conveyor machine was revealed. It was established that most significantly the porosity of the layer reduce due to layer shrinkage in the drying zone and cracking of pellets at the outlet of it. The analysis of estimated expressions to determine the gas-dynamic characteristics of the pellets layer helped to get the dependencies that with a sufficient degree of accuracy can be used to calculate the gas-dynamic characteristics of the layer on the conveyor machines considering different porosity. The obtained results can be used in determining the gas dynamic and thermal conditions, providing work of burning conveyor machines with low specific fuel consumption and high quality of the calcined product.

Keywords: coefficient of flow resistance, equivalent porosity, iron ore pellets, mode, burning conveyor machine, zone, heat treatment, parameters, fuel consumption, quality.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-116-123

REFERENCES

- Liu H., Jonsson L. T.I., Olofsson U., Jönsson P.G. A simulation study of particles generated from pellet wear contacts during a laboratory test. *ISIJ International*. 2016, vol. 56, no. 11, pp. 1910–1919.
- Panic B., Janiszewski K. Model investigations 3D of gas-powder two phase flow in descending packed bed in metallurgical shaft furnaces. *Metallurgija*. 2014, vol. 53 (3), pp. 331–334.
- Liu, Y., Su, F.-Y., Wen Z. CFD modeling of flow, temperature, and concentration fields in a pilot-scale rotary hearth furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014, vol. 45 (1), pp. 251–261.
- Dai C., Lei Z., Li Q. Pressure drop and mass transfer study in structured catalytic packings. *Sep. Purif. Technol.* 2012, vol. 98 (1), pp. 78–87.
- Li L., Rummelgas J., van Wachem B.G.M. Effect of drag models on residence time distributions of particles in a wurster fluidized bed: a DEM-CFD study. *Kona powder and particle journal*. 2016, vol. 33, pp. 264–277.
- Dmitriev E.A., Nosyrev M.A., Trushin A.M. On the issue of determining the porosity of the fluidized bed in the system of solid particles – gas. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*. 2013, no. 9, pp. 53–56. (In Russ.).
- Dmitriev E.A., Kabanov O.V., Kulikov M.V., Nosyrev M.A., Trushin A.M. On the issue of porosity of a heterogeneous fluidized bed. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*. 2015, vol. 49, no. 6, pp. 644–650. (In Russ.).
- Guo L., Morita K., Tobita Y. Numerical simulation of three-phase flows with rich solid particles by coupling multi-fluid model with discrete element method. *Proceedings of the 20th Int. Conf. on Nuclear Engineering and the ASME 2012 Power Conf.* 2012, vol. 4, pp. 371–382.
- Croft T. N., Cross M., Slone A. K. CFD analysis of an induration cooler on an iron ore grate-kiln pelletizing process. *Minerals Engineering*. 2009, vol. 22, pp. 859–873.
- Barati M. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system. *International Journal of Mineral Processing*. 2008, vol. 89 (1–4), pp. 30–39.
- Todd R.S., Webley, P.A. Pressure drop in a packed bed under non-adsorbing and adsorbing conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2005, vol. 44 (18), pp. 7234–7241.
- Schults H.J., Abel O. Durck Störungsverhalten von Formkoks-Erz-Stückkoks-Systemen. *Arch. Eisenhüttenwesen*. 1974, Bd. 45, no. 5, pp. 279–285. (In Germ.)
- Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Evstyugin S.V. etc. *Fiziko-khimicheskie i teplotekhnicheskie osnovy proizvodstva zhelezorudnykh okatyshei* [Physical-chemical and thermotechnical basis of the iron-ore pellet production]. Leont'ev L.I. ed. Ekaterinburg: NPVP TOREKS, 2012, 340 p. (In Russ.).
- Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A., Lugovkin V.V., Yarchuk V.F. Hydraulic drag of dense beds consisting of particles of different shape. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45. no. 9, pp. 662–668.
- Bryukhanov O.N., Korobko V.I., Melik-Arakelyan A.T. *Osnovy gidravliki, teplotekhniki i aerodinamiki* [Basics of hydraulics, thermal technology and aerodynamics]. Moscow: INFRA-M, 2012, 253 p. (In Russ.).
- Rtishchev A.S. *Teoreticheskie osnovy gidravliki i teplotekhniki* [Theoretical basics of hydraulics and thermal technology]. Ulyanovsk: UIGTU, 2007, 171 p. (In Russ.).
- Stulov V.P. *Lektsii po gazovoi dinamike* [Lectures on gas dynamics]. Moscow: FIZMATLIT, 2006, 192 p. (In Russ.).
- Bryukhanov O.N., Melik-Arakelyan A.T., Korobko V.I. *Osnovy gidravliki i teplotekhniki* [Basics of hydraulics and thermal technology]. Moscow: Akademiya, 2011, 240 p. (In Russ.).
- Gushchin S.N., Kazyayev M.D., Kiselev E.V., Shavrin V.S., Yur'ev B.P. *Gidravlicheskie raschet truboprovodov i vybor tyagodui'evykh sredstv, obespechivayushchikh rabotu promyshlennykh pechei* [Pipeline system hydraulic calculation and choice of a draft capacity options providing the work of industrial furnaces]. Ekaterinburg: UrFU, 2011, 140 p. (In Russ.).
- Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Reference book on hydraulic resistance]. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 672 p. (In Russ.).
- Aerov M.E., Todes O.M., Narinskii D.A. *Apparaty so statsionarnym zernistym sloem* [Units with stationary granular layer]. Leningrad: Khimiya, 1979, 176 p. (In Russ.).
- Volkov K.N., Deryugin Yu.N., Emel'yanov V.N. *Metody uskoreniya gazodinamicheskikh raschetov na nestrukturirovannykh setkakh* [Acceleration methods of gas-dynamic calculations on non-structured grids]. Moscow: FIZMATLIT, 2014, 535 p. (In Russ.).
- Volkov K.N., Emel'yanov V.N. *Vychislitel'nye tekhnologii v zadachakh mekhaniki zhidkosti i gaza* [Computing technologies in tasks of liquids and gases mechanics]. Moscow: FIZMATLIT, 2013, 468 p. (In Russ.).
- Chechetkin A.V. *Vysokotemperaturnye teplonositeli* [High-temperature heat-carrying agents]. Moscow: Energiya, 1971, 496 p. (In Russ.).
- Rovenskiy I.I., Berezhnoi N.N. Research of gas transmission in pellets layer. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1964, no. 1, pp. 27–32. (In Russ.).
- Bratchikov S.G., Berman Yu.A., Belotserkovskii Ya.L. etc. *Teplotekhnika okuskovaniya zhelezorudnogo syr'ya* [Thermal technology of iron-ore raw material pelletizing]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 344 p. (In Russ.).
- Kuznetsov R.F., Maizel' G.M., Belotserkovskii Ya.L., Onishchenko A.E., Dokuchaev P.N., Antuganova G.M. Aerodynamic characteristics of calcining conveyor machines. *Metallurgist*. 1974, vol. 18, no. 7, pp. 514–517.

Acknowledgements. The work was supported by Act 211 of the Government of the Russian Federation, contract no. 02.A03.21.0006.

Information about the authors:

B.P. Yur'ev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (yurev-b@mail.ru)

V.A. Gol'tsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (v.a.goltsev@urfu.ru)

Received June 14, 2016