

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПИСАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛОТНОГО СЛОЯ ИЗ ЧАСТИЦ РАЗНОЙ ФОРМЫ

**Юрьев Б.П.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Гольцев В.А.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (v.a.goltsev@urfu.ru)

**Луговкин В.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Ярчук В.Ф.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

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

**Аннотация.** Приведены результаты анализа расчетных выражений, полученных разными исследователями, для определения величины гидравлического сопротивления плотного слоя, состоящего из различного вида частиц (шаровидные частицы, окатыши, частицы произвольной формы). В качестве критерия для выявления общих закономерностей зависимости гидравлического сопротивления слоя от температуры и скорости фильтрации был использован приведенный коэффициент гидравлического сопротивления. Показано, что на характер зависимости гидравлического сопротивления слоя от порозности практически не влияет форма частиц. Рекомендована формула, с помощью которой достаточно надежно можно рассчитывать коэффициент гидравлического сопротивления слоя окатышей при их естественной засыпке и отсутствии значительного количества мелочи, а, следовательно, определять потери энергии в самом слое и в целом по всему газозвудному тракту обжиговых установок.

**Ключевые слова:** слой, частицы, окатыши, анализ, гидравлическое сопротивление, порозность, скорость фильтрации, потери энергии.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-688-695

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа расчетных выражений, используемых для определения гидравлического сопротивления слоя, состоящего из частиц разной формы, а также железорудных окатышей, и обоснование и выбор формулы, которая бы позволяла надежно рассчитывать эту величину, а также коэффициента гидравлического сопротивления, без которого невозможно определить близкие к реальным потери давления в слое.

Наиболее активно работы по определению гидравлического сопротивления плотного слоя, в том числе слоя из железорудных окатышей, проводились в 60–80 годы прошлого столетия [1–6]. В последнее время этим вопросам уделяется мало внимания.

Обычно выражения, предлагаемые различными авторами для расчета гидравлического сопротивления слоя  $\Delta p$ , Па, могут быть записаны либо в виде известной формулы Дарси-Вейсбаха

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

либо в виде [1]

$$\Delta p = C_{\text{сл}} \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H, \quad (2)$$

где  $\zeta_{\text{сл}}$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность фильтрующей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $w_{\text{г}}$  – ско-

рость фильтрации, м/с;  $H$  – высота слоя, м;  $d$  – размер частиц слоя, м;  $C_{\text{сл}}$  – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления, м<sup>-1</sup>.

Введение приведенного коэффициента гидравлического сопротивления  $C_{\text{сл}}$  можно оправдать тем, что коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta_{\text{сл}}$  сам зависит от размера частиц  $d$ , хотя из формулы (1) этого не видно. В остальном введение коэффициента  $C_{\text{сл}}$  ничего нового не вносит, так как имеется простая зависимость

$$C_{\text{сл}} = \frac{\zeta_{\text{сл}}}{2d}. \quad (3)$$

Обрабатывая данные лабораторных исследований, одни авторы [1] считают коэффициент  $C_{\text{сл}}$  функцией только критерия Рейнольдса  $Re_{\text{сл}} = wd/v$ , не усматривая зависимости  $\zeta_{\text{сл}}$  от порозности (или не усматривая зависимости последней от размера частиц  $d$ ). Другие авторы находят, что порозность слоя  $m$  значительно зависит от  $d$ , и потому  $\zeta_{\text{сл}}$  является функцией  $Re_{\text{сл}}$  и  $m$ . Третьи авторы [4] отмечают зависимость  $m$  от  $d$ . Авторы работ [2, 7] считают, что при расчете гидравлического сопротивления слоя из любых частиц достаточно учитывать зависимость  $C_{\text{сл}}$  (и, следовательно,  $\zeta_{\text{сл}}$ ) только от размера частиц  $d$ , а зависимостью  $C_{\text{сл}}$  от скорости фильтрации, температуры, формы частиц, порозности (при естественной засыпке) можно пренебречь.

Поскольку окатыши имеют шаровидную форму, то представляется очевидным, что их гидравлическое сопротивление должно быть несколько выше, чем слоя шаров, и значительно ниже, чем слоя частиц неправильной формы. Более неопределенным является вопрос о том, как зависит гидравлическое сопротивление слоя окатышей (при естественной засыпке) от порозности и

как зависит порозность от размера окатышей. С целью получения сравнимых данных были выполнены расчеты приведенного коэффициента  $C_{сл}$  по данным ряда работ для различных видов частиц (шаровидные частицы, окатыши, частицы произвольной формы) (табл. 1). Порозность для всех расчетных выражений принята в соответствии с выражением

Таблица 1

**Расчетные выражения для определения величины гидравлического сопротивления слоя по данным ряда авторов**

Table 1. Calculated expressions for definition of hydraulic resistance of the layer according to some authors

Номер формулы	Вид частиц	$\Delta p$ , Па	$\zeta_{сл}$	$C_{сл}$ , $m^{-1}$	Источник
1	Шаровидные	$\Delta p = \zeta_{сл} \frac{\rho_r w_r^2 H}{2 d}$	$\zeta_{сл} = \frac{1,53}{m^{4,2}} \left( 0,3 + \frac{3}{Re_{стр}^{0,7}} + \frac{30}{Re_{стр}} \right)$ $Re_{стр} = \frac{0,45}{(1-m)\sqrt{m}} Re_{сл}$	$C_{сл} = \frac{\zeta_{сл}}{2d}$	[8]
2	Куски произвольной формы	$\Delta p = \zeta_{сл} \frac{\rho_r w_r^2 H}{2 d}$	$\zeta_{сл} = \frac{1,53}{m^{4,2}} \left( 1 + \frac{15}{Re_{стр}^{0,5}} + \frac{75}{Re_{стр}} \right)$ $Re_{стр} = \frac{0,45}{(1-m)\sqrt{m}} Re_{сл}$	$C_{сл} = \frac{\zeta_{сл}}{2d}$	[8]
3	Окатыши (восстановленные)	$\Delta p = \lambda \frac{\rho_r w_r^2}{2} \frac{6(1-m) H}{m^3 d}$	$\lambda = \frac{3,9m^3}{1-m}, Re_{к} > Re_{кр}$ $\lambda = \frac{17,35m^{2,5}}{(1-m)^5 Re_{к}}, Re_{к} \leq Re_{кр}$ $Re_{к} = \frac{0,667}{1-m} Re_{сл}, Re_{кр} = 294\,000d$	$C_{сл} = \frac{3\lambda}{d} \frac{1-m}{m^3}$ $m = 0,222d^{0,252}$	-
4	Шаровидные	$\Delta p = \xi \frac{\rho_r w_r^2}{2} \frac{6(1-m) H}{m^3 d}$	$\xi = \frac{2,22}{Re_{к}^{0,2}}$ $Re_{к} = 45 - 4000$ $Re_{к} = \frac{0,667}{1-m} Re_{сл}$	$C_{сл} = \frac{3\xi}{d} \frac{1-m}{m^3}$	[9]
5	Куски произвольной формы	$\Delta p = \xi \frac{\rho_r w_r^2}{2} \frac{77(1-m) H}{m^3 d}$	$\xi = \frac{211}{Re_{к}} + 0,85$ $Re_{к} = \frac{0,519}{1-m} Re_{сл}$ $Re_{к} = 50 - 800$	$C_{сл} = \frac{3,85}{d} \frac{\xi(1-m)}{m^3}$	[10]
6	Куски произвольной формы	$\Delta p = C_{сл} \rho_r w_r^2 H$	-	$C_{сл} = \frac{0,15}{d^2} + 200$	[7]
7	Окатыши	$\Delta p = C_{сл} \rho_r w_r^2 H$	-	$C_{сл} = 141 \exp\left(\frac{0,021}{d}\right)$	[2]
8	Окатыши	$\Delta p = \zeta_{сл} \frac{\rho_r w_r^2 H}{2 d}$	$\xi_{сл} = \frac{100}{Re_{сл}^{0,214}}$ $Re_{сл} = \frac{w_r d}{\nu}$	$C_{сл} = \frac{\zeta_{сл}}{2d}$	[1]
9	Окатыши	$\Delta p = \zeta_{сл} \frac{\rho_r w_r^2 H}{2 d}$	$\xi_{сл} = \frac{3300}{Re_{сл}} + 16$ $200 \leq Re_{сл} \leq 2000$	$C_{сл} = \frac{\zeta_{сл}}{2d}$	[11]

$$m = 0,222d^{0,252}. \quad (4)$$

Результаты расчетов зависимости приведенного коэффициента  $C_{сл}$  от размера частиц показаны на рис. 1 (скорость фильтрации  $w_r = 0,6$  м/с, температура воздуха  $t_r = 0$  °С). Номера кривых на рис. 1 (а также ниже на рис. 3) соответствуют номеру расчетного выражения по табл. 1. Обращает на себя внимание эквидистантность некоторых кривых (1, 2, 4, 5) на рис. 1, несмотря на то, что соответствующие расчетные выражения получены авторами независимо друг от друга и для частиц разной формы (1, 4 – для частиц шаровой формы; 2, 5 – для частиц типа неправильных кусков). Эквидистантности кривых в полулогарифмических координатах соответствует эквипропорциональность соответствующих значений коэффициента  $C_{сл}$  в обычных координатах. Это хорошо видно из табл. 2, где вычислены отношения  $C_{слi}/C_{сл1}$  при разных размерах частиц слоя  $d$ . Приведенные коэффициенты  $C_{сл}$ , вычисленные по формулам (1), (2), (4) и (5), эквипропорциональны в диапазоне  $d = 8 - 20$  мм с точностью до  $\pm 3\%$ . Это указывает на то, что характер зависимости коэффициента  $C_{сл}$  от размера слабо зависит от рода частиц. Кроме того, эти кривые получены при условии, что порозность су-

щественно меняется с изменением диаметра. Отсюда можно заключить, что зависимость коэффициента  $C_{сл}$  от порозности примерно одинакова для частиц различной формы.

Кроме указанной группы кривых, на рис. 1 есть еще одна группа примерно эквидистантных кривых в диапазоне  $d = 12 - 24$  мм. Это кривые 3, 7 – 9, которые описывают зависимость  $C_{сл} = f(d)$  для окатышей. Кривая 6 также может быть отнесена к этой группе, хотя авторы работы [7] отводят ей роль универсальной кривой, пригодной для расчета  $C_{сл}$  во всех случаях (из рис. 1 видно, что кривые 2, 3, 5 отклоняются от кривой 6 на 200 – 300%). Из этой группы относительно близких друг к другу ( $d = 8 - 20$  мм) кривых резко выделяется кривая 3, полученная для слоя из восстановленных окатышей.

Результаты расчета коэффициента  $C_{сл}$  по формуле (3) (см. табл. 1) выше, чем по (7) – (9), в 1,5 – 2,0 раза. Характер зависимости  $C_{сл}$  от порозности по формуле (3) резко отличается от той, которая определяется всеми другими формулами. Это можно объяснить только спецификой гидравлических свойств слоя из восстановленных окатышей.

К такому же выводу можно прийти, рассматривая на рис. 2 зависимости гидравлического сопротивления слоя окатышей высотой 1 м от скорости фильтрации. Видно, что при диаметре окатышей 11,0 – 11,5 мм кривая 1 (восстановленные окатыши) проходит выше на 50 – 100% (при  $w_r = 0,5 - 1,0$  м/с), чем кривые по данным других авторов. Из рис. 2 и табл. 3, в которой содержатся пояснения к рис. 2, видно, что данные авторов [1 – 3], полученные на сухих и обожженных окатышах из отечественных [1, 2] и зарубежных [3] концентратов, весьма близки между собой. Резкое расхождение кривой 1 с кривыми 2 – 4 на рис. 2 и еще более резкое расхождение кривой 3 с кривыми 7 – 9 (см. рис. 1) приводит к необходимости исключения результатов, полученных для восстановленных окатышей, из дальнейшего рассмотрения.

Для выявления общих закономерностей зависимости гидравлического сопротивления слоя от температуры  $t_r$  и скорости фильтрации  $w_r$ , были проведены расчеты коэффициента  $C_{сл}$  по формулам тех же авторов при  $d = 14$  мм,  $w_r = 0,6$  м/с,  $t_r = var$  (результаты приве-

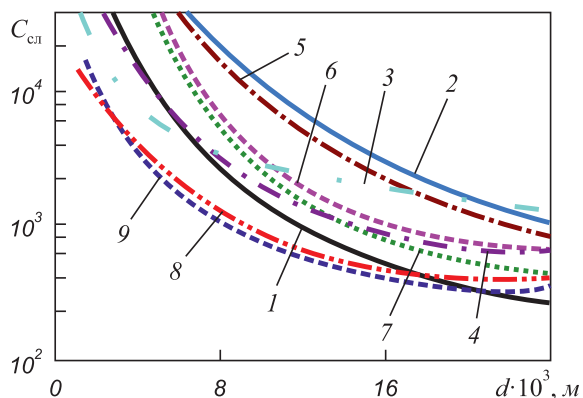


Рис. 1. Зависимость приведенного коэффициента  $C_{сл}$  от размера частиц; цифры у кривых соответствуют номерам формул в табл. 1

Fig. 1. Dependence of the reduced  $C_{сл}$  coefficient from the particle size; figures on the curves correspond to the numbers of the formulas in Table 1

Таблица 2

**Эквипропорциональность приведенных коэффициентов  $C_{сл}$  для частиц разной формы**

Table 2. Equiproportionality of the reduced  $C_{сл}$  coefficients for particles of different shapes

Отношение	Значения отношений при $d_{cp}$ , мм							Среднее значение
	8	10	12	14	16	18	20	
$C_{сл4}/C_{сл1}$	1,24	1,27	1,29	1,30	1,30	1,30	1,30	1,27
$C_{сл5}/C_{сл1}$	3,55	3,46	3,43	3,39	3,37	3,35	3,33	3,44
$C_{сл2}/C_{сл1}$	4,57	4,52	4,47	4,42	4,39	4,35	4,31	4,44

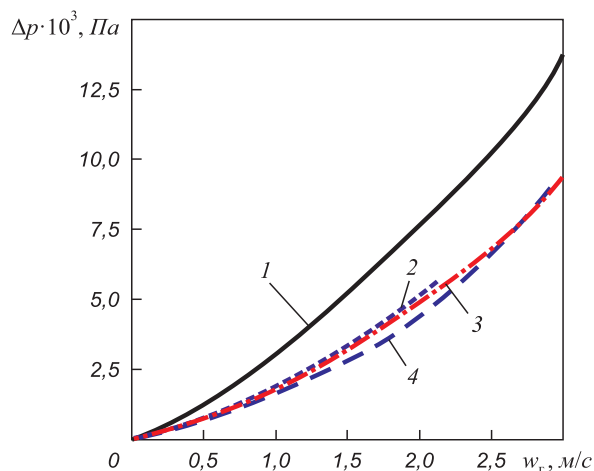


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления слоя окатышей высотой 1 м от скорости фильтрации (пояснения в табл. 3): 1 – для восстановленных окатышей; 2 – по данным работы [3]; 3 – по данным работы [1]; 4 – по данным работы [2]

Fig. 2. Dependence of hydraulic resistance layer pellets height of 1 m from the filtration rate (explanation in Table 3): 1 – to recover pellets; 2 – according to [3]; 3 – according to [1]; 4 – according to [2]

дены на рис. 3, а) и при  $d = 14$  мм,  $t_r = 0$  °С,  $w_r = \text{var}$  (результаты приведены на рис. 3, б). Из рис. 3, а видно, что величина  $C_{\text{сл}}$  зависит от  $t_r$  довольно слабо и при изменении  $t_r$  от 0 до 1000 °С возрастает не более, чем на 40 – 60 % (в среднем ~50%). Авторы работы [7] считают, что при расчете гидравлических сопротивлений слоя зависимость  $C_{\text{сл}}$  от  $t_r$  можно не учитывать (штриховые линии б, 7 на рис. 3, а). В среднем можно рекомендовать зависимость

$$C_{\text{сл}}(t) = C_{\text{сл}(0)}(1 + 0,5t_r \cdot 10^{-3}), \quad (5)$$

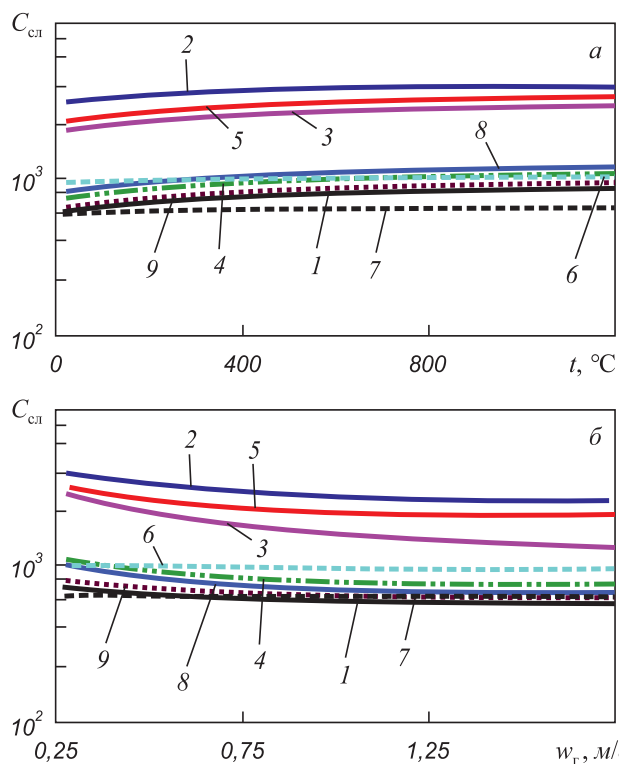


Рис. 3. Зависимости приведенного коэффициента  $C_{\text{сл}}$  от температуры воздуха (а) и скорости фильтрации (б); цифры у кривых соответствуют номерам формул в табл. 1

Fig. 3. Dependence of the  $C_{\text{сл}}$  coefficient from air temperature (а) and filtration rate (б); figures on the curves correspond to the numbers of the formulas in Table 1

где  $C_{\text{сл}(0)}$  – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления при  $t_r = 0$ . При температурах  $t_r < 500$  °С величина  $C_{\text{сл}}$  растет с повышением температуры относительно быстрее, чем при  $t_r > 500$  °С.

Таблица 3

Пояснения к рис. 2

Table 3. Explanations for Fig. 2

Номер кривой на рис. 2	Концентрат	Фракция, мм	$d_{\text{ср}}$ , мм	Метод расчета $d_{\text{ср}}$	Вид окатышей	$m$	Метод получения зависимости $\Delta p = f(w)$	$C_{\text{сл}}$	Источник
1	Тулачермет	$11,5 \pm 10$ %	11,50	Среднестатистический	Восстановленные	0,410	Эксперимент	–	–
2	Зарубежный	9,5 – 12,5	10,94	Среднеобъемный	Обоженные в лаборатории	0,408	Эксперимент	–	[12]
3	ЮГОК	–	11,30	Не указан	Сухие и обоженные в лаборатории	0,317*	Расчет** по формуле (2)	$\frac{1}{2d_{\text{ср}}} \frac{100}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}}$	[1]
4	ССГОК	10,0 – 12,5	11,30	Средневзвешенный	Сухие	0,449	–	840	[2]

\* По данным работы [1] соответствует  $d_{\text{ср}} = 12$  мм.

\*\* Расчет произведен авторами статьи.

Из рис. 3, б видно, что величина  $C_{сл}$  наиболее сильно зависит от скорости фильтрации при  $w_r < 1,0$  м/с, причем с уменьшением  $w_r$  происходит все более быстрое возрастание коэффициента  $C_{сл}$ . При изменении  $w_r$  от 0,3 до 1,5 м/с различие в величине  $C_{сл}$  может быть в 30 – 40 % (авторы работ [2, 7] пренебрегают этими различиями – см. штриховые линии 6, 7 на рис. 3, б). Следует отметить тот факт, что кривые 8, 9 при увеличении  $w_r$  приближаются к линии 7 ( $C_{сл7} = const$ ). При скорости  $w_r = 3$  м/с величины коэффициентов  $C_{сл}$ , рассчитанные по формулам (7) – (9), будут соответственно равны  $C_{сл7} = 632$ ,  $C_{сл8} = 636$ ,  $C_{сл9} = 608$  м<sup>-1</sup>, т. е. различие не более 4 %. Сравнение не совсем законно, потому что авторы работы [1] ограничивают область применения своей формулы  $w_r < 1,65$  м/с. Но с учетом рис. 3, б можно заключить, что с возрастанием скорости фильтрации формулы (7) – (9) согласуются значительно лучше. Особенно хорошо при  $w_r = 3$  м/с совпадают величины  $C_{сл7}$  и  $C_{сл8}$ , хотя при  $w_r = 0,3$  м/с они различаются на 60 %. Причина этого заключается в том, что по формуле (7) (соответствует с точностью  $\pm 5$  % графику на рис. 2 [2]) коэффициенты  $C_{сл7}$  получаются заниженными, так как соответствуют скоростям фильтрации 2 – 3 м/с, а в действительности коэффициенты  $C_{сл}$  с уменьшением скорости фильтрации растут и довольно существенно. Это подтверждают исследования многих авторов, в том числе авторов зависимости (7) [2].

На рис. 4 показаны результаты расчета коэффициента  $C_{сл}$  по данным работы [4] при скоростях фильтрации 2, 3 и 4 м/с в зависимости от размера окатышей. Видно, что величина  $C_{сл}$  слабо зависит от скорости фильтрации лишь при  $w_r > 3$  м/с (относительная разность  $C_{сл}$  при  $w_r = 3$  и 4 м/с уже сравнительно невелика). При этом с увеличением скорости фильтрации величина коэффициента  $C_{сл}$  становится ниже. Поэтому, по данным авторов работы [2], зависимостью коэффициента  $C_{сл}$  от размера  $d$  при скоростях  $w_r < 2$  м/с пользоваться нельзя, так как при этом получаются заниженные значения  $C_{сл}$ . Это было видно уже на рис. 2, где кривая 4 при скоростях  $w_r < 1$  м/с проходит существенно ниже, чем, например, кривая 3.

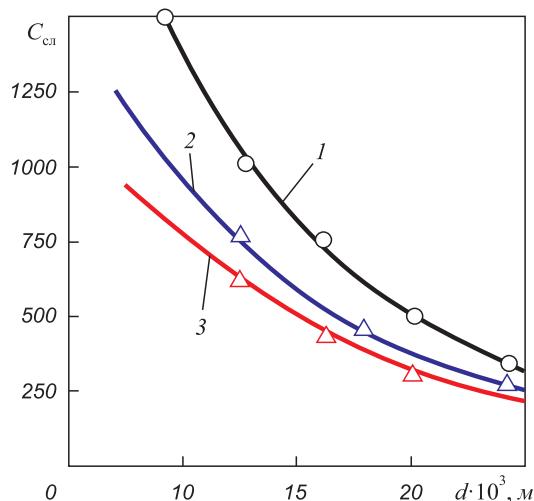


Рис. 4. Зависимость приведенного коэффициента  $C_{сл}$  от размера окатышей при  $w_r$ , м/с: 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4 по данным работы [4]

Fig. 4. Dependence of the reduced  $C_{сл}$  coefficient from the size of the pellets at  $w_r$ , m/s: 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4 according to [4]

Более отчетливо, чем на рис. 2, расхождение результатов, по данным авторов исследований [1, 2], видно из табл. 4, где приведены расчеты величины гидравлического сопротивления для слоя с параметрами  $d = 11,3$  мм,  $H = 1$  м,  $t_r = 0$  °С,  $w_r = var$  (позициям 1, 2 в табл. 4 соответствуют кривые 3, 4 на рис. 2). Как видно из табл. 4, занижение величины  $\Delta p$  по данным работы [2] при  $w_r = 0,4 – 0,8$  м/с достигает 25 – 35 %. При этом причина этих расхождений не в том, что опытные данные работ [2, 7] не подтверждают увеличения  $C_{сл}$  при уменьшении  $w_r$ . В табл. 5 приведены результаты расчета  $C_{сл}$  по опытным данным (рис. 3) [10], которые используются в работах [2, 7], и по формуле (8). Совпадение результатов очень хорошее, хотя авторы работ [2, 7] получили по этим данным значение  $C_{сл} = 981$  м<sup>-1</sup>, соответствующее  $w_r \approx 2$  м/с, т. е. заниженное для малых значений  $w_r$ .

На рис. 5 даны результаты расчета коэффициента  $C_{сл} = f(d)$  по формуле (8) [1] для скоростей фильтрации

Таблица 4

Сравнение величины гидравлического сопротивления слоя при расчете по формулам [1, 2] ( $H = 1$  м,  $d = 11,3$  мм)

Table 4. Comparison of the flow resistance of the layer in calculation by the formulas [1, 2] ( $H = 1$  m,  $d = 11,3$  mm)

Номер п/п	Расчетные выражения	Значения $\Delta p$ , Па при $w_r$ , м/с							Источник
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	2,0	
1	$\Delta p_1 = \frac{100}{Re_{сл}^{0,214}} \frac{\rho_r w_r^2}{2d_{ср}}$	77	261	540	904	1345	1860	4640	[1]
2	$\Delta p_2 = 840 \rho_r w_r^2$	44	173	390	693	1083	1560	4330	[2]
3	$100 \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\Delta p_1}, \%$	43	34	28	23	19	16	7	–

Сравнение приведенных коэффициентов  $C_{сл}$  при расчете по опытным данным [10] и по формуле (8) [1]Table 5. Comparison of calculated  $C_{сл}$  coefficients according to the experimental data [10] and according to the formula (8) [1]

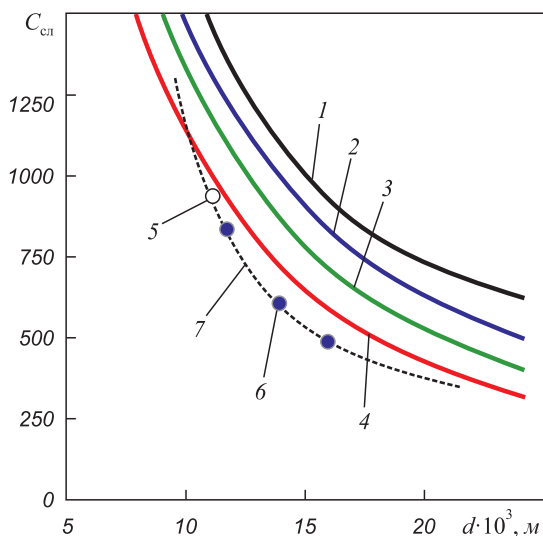
Расчетные выражения	$C_{сл}$ при $w_r$ , м/с					Источник
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	
$C_{сл} = \frac{\Delta p}{\rho_r w_r^2}$	1300*	1160	1020	970	990	[12]
$C_{сл} = \frac{1}{2d_{ср}} \frac{100}{Re_{сл}^{0,214}}$	1315	1130	1040	980	895	[1]

\* Найдено с помощью аппроксимации.

0,25, 0,50, 1,0 и 2,0 м/с. Для сравнения на графике нанесен ряд значений величины  $C_{сл}$  для окатышей по данным работы [2] и рассчитанных по экспериментальным данным исследований [3, 12]. Данные работы [2] хорошо совпадают (несколько ниже) в диапазоне  $d = 10 - 20$  мм с результатами исследования [1] при скорости фильтрации  $w_r = 2$  м/с. При  $d = 10,56$  мм расчеты по данным опытной зависимости  $\Delta p = f(w_r)$  [12] хорошо совпадают с расчетом по [1]. Данные работы [3] при  $d = 11$  мм хорошо совпадают с результатами расчета по [1] при  $w_r = 2$  м/с и несколько хуже при  $w_r = 0,5$  м/с. Все это указывает на отсутствие противоречий данных работы [1] с результатами других исследований. Данные работы [2] при  $w_r \geq 2,0$  м/с,  $d = 10 - 20$  мм хорошо совпада-

ют с результатами других исследователей, однако при низких значениях скорости фильтрации (особенно при  $w_r < 1$  м/с) дают заниженные значения гидравлического сопротивления слоя (на 25 – 40 %) и в дальнейшем здесь не используются.

Таким образом, для расчета гидравлического сопротивления слоя окатышей остаются формулы (8) [1] и (9) [11]. Применение формулы (9) [11] авторы ограничивают по скорости фильтрации диапазоном  $w_r = 0,53 - 1,65$  м/с, по размеру окатышей – диапазоном  $d = 10 - 20$  мм. Для достижения конечного результата данного исследования эти ограничения слишком узки. Авторы работы [1] указывают, что проводили свои опыты при изменении скорости фильтрации от 0 до 4 – 5 м/с с окатышами размером 8 – 30 мм и никаких дополнительных ограничений на применимость формулы (8) не ввели. Результаты расчетов величины  $\zeta_{сл}$  (или  $C_{сл}$ ) при  $Re_{сл} = 200 - 2000$  [область применимости формулы (9)] [11] по формулам (8) и (9) совпадают с точностью до 10 – 20 %, хотя результаты по формуле (9) систематически ниже, что можно объяснить более низкой порозностью окатышей в опытах работы [11]. В дальнейшем предпочтение отдается формуле (8) [1] из-за отсутствия узких ограничений по ее применению. В результате проведенного анализа можно сделать вывод о том, что коэффициент гидравлического сопротивления слоя окатышей  $\zeta_{сл}$  при естественной засыпи в лабораторных условиях (при отсутствии значительного количества мелочи, т. е. критических по размеру фракций, отсутствии значительной сегрегации и др.) достаточно надежно можно рассчитывать по формуле [1]

Рис. 5. Зависимость приведенного коэффициента  $C_{сл}$  от размера окатышей при  $w_r$ , м/с:

1 – 0,25; 2, 5 – 0,50; 3 – 1,00; 4, 6 – 2,00; кр. 1 – 4 – расчет по данным [1]; 5 и 6 – расчет по данным [3] (светлые точки) и [12] (черные точки); 7 – данные работы [2]

Fig. 5. Dependence of the reduced  $C_{сл}$  coefficient from the size of the pellets at  $w_r$ , m/s:

1 – 0,25; 2, 5 – 0,50; 3 – 1,00; 4, 6 – 2,00; curves 1 – 4 – calculation according to [1]; 5 and 6 – the calculation according to [3] (open circles) and [12] (black points); 7 – data [2]

$$\zeta_{сл} = \frac{100}{Re_{сл}^{0,214}}. \quad (6)$$

**Выводы.** С использованием коэффициентов гидравлического сопротивления проведены расчеты по определению гидравлического сопротивления плотного слоя, состоящего из частиц разной формы (шаровидные, куски произвольной формы, железорудные окатыши) по формулам ряда авторов. На основании

анализа полученных результатов предложено выражение, позволяющее достаточно надежно рассчитывать гидравлические характеристики слоя окатышей, а, следовательно, оптимизировать как гидравлические, так и тепловые режимы обжига окатышей на ленте конвейерной машины.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ровенский И.И., Бережной Н.Н. Исследование газопроницаемости слоя окатышей // Изв. вуз. Черная металлургия. 1964. № 1. С. 27 – 32.
2. Кузнецов Р.Ф., Мерзляков Ю.И., Антуганова Г.М. Газопроницаемость неподвижного слоя железорудных окатышей: Сб. научных трудов ВНИИМТ «Теплотехника обжиговых и агломерационных машин конвейерного типа. Теплофизика сталеплавильных процессов». – М.: Металлургия, 1969. № 18. С. 11 – 14.
3. Schultr H.J., Abel O. Durckstörung-sverhaltens von Formkoks-Erz-Stückkoks-Systemen // Arch. Eisenhüttenw. 1974. 45. No. 5. S. 279 – 285.
4. Логинов В.И., Соломатин С.М., Корж А.Т. Газопроницаемость агломерата и окатышей: Сб. «Металлургия и коксохимия». – Киев: Техника, 1970. № 19. С. 46 – 51.
5. Стефанович М.А., Сибатуллин С.К., Гушин Д.Н. Закономерности движения шихты и газа в доменной печи / Под ред. С.К. Сибатуллина. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. – 161 с.
6. Гидравлический расчет трубопроводов и выбор тягодутьевых средств, обеспечивающих работу промышленных печей / С.Н. Гушин, М.Д. Казяев, Е.В. Киселев и др. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2011. – 140 с.
7. Чукин В.В., Кузнецов Р.Ф. Гидравлическое сопротивление неподвижного плотного слоя: Сб. науч. тр. ВНИИМТ «Теплотехника подготовки металлургического сырья». – М.: Металлургия, 1969. № 16. С. 50 – 59.
8. Бернштейн Р.С., Померанцев В.В., Шагалова С.Л. Обобщенный метод расчета аэродинамического сопротивления загруженных сечений: Сб. «Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах» / Под ред. Г. Ф. Кнорре. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. С. 267 – 289.
9. Четчин А.В. Высокотемпературные теплоносители. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 424 с.
10. Червоткин В.В., Минаев Ю.Е. Аэродинамическое сопротивление кусковой руды: Сб. науч. тр. ВНИИМТ «Теплотехника подготовки металлургического сырья». – М.: Металлургия, 1969. № 16. С. 67 – 75.
11. Теплотехника окискования железорудного сырья / С.Г. Братчиков, Ю.А. Берман, Я.Л. Белоцерковский и др. – М.: Металлургия, 1970. – 343 с.
12. Чукин В.В., Кузнецов Р.Ф. Гидравлическое сопротивление неподвижного и подвижного слоев кусковых материалов: Сб. науч. тр. ВНИИМТ «Обжиг руд, плавильные печи, нагрев и охлаждение стали». – Свердловск: ВНИИМТ, 1967. № 17. С. 26 – 33.

Поступила 6 апреля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 688–695.

### COMPARATIVE ANALYSIS OF THE HYDRAULIC RESISTANCE DESCRIPTIONS IN A DENSE LAYER OF DIFFERENT SHAPE PARTICLES

**Yur'ev B.P.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"

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

**Lugovkin V.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"

**Yarchuk V.F.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg 620002 Russia)

**Abstract.** The results of the analysis of calculated expressions obtained by different researchers to determine the hydraulic resistance of the dense layer consisting of different types (spherical particles, pellets, particles of arbitrary shape) were presented. The powered hydraulic resistance coefficient was used as a criterion to identify common patterns depending on the hydraulic resistance of the layer on the temperature and the rate of filtration. It is shown that depending on the nature of the hydraulic resistance of the layer porosity hardly affects the shape of the particles. The authors have recommended the formula by which you can reliably calculate the coefficient of hydraulic resistance of the pellet layer in their natural filling and the absence of a significant amount of detail, and therefore determine the energy loss in the layer and in general throughout the gas path in roasting plants.

**Keywords:** layer, particles, pellets, analysis, flow resistance, porosity, filtration rate, energy loss.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-688-695

#### REFERENCES

1. Rovenskii I.I, Berezhnoi N.N. Investigation of gas permeability of pellets layer. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1964, no. 1, pp. 27–32. (In Russ.).
2. Kuznetsov R.F., Merzlyakov Yu.I., Antuganova G.M. The gas permeability of the fixed bed of iron ore pellets. In: *sb. nauchnykh trudov VNIIMT "Teplotekhnika obzhigovykh i aglomeratsionnykh mashin konveiernogo tipa. Teplofizika staleplavil'nykh protsessov"* [In: Proceedings of VNIIMT: "Heat engineering of firing and sintering machines of conveyor type. Thermal physics of steelmaking processes"]. Moscow: Metallurgiya, 1969, no. 18, pp. 11–14. (In Russ.).
3. Schultr H.J., Abel O. Durck störung-sverhalten von Formkoks-Erz-Stückkoks-Systemen. *Arch. Eisenhüttenw.*, 1974. 45, no. 5, pp. 279–285.
4. Loginov V.I., Solomatin S.M., Korzh A.T. Gas permeability of sinter and pellets. In: *Metallurgiya i koksokhimiya* [Metallurgy and coke industry]. Kiev: Tekhnika, 1970, no. 19, pp. 46–51. (In Russ.).
5. Stefanovich M.A., Sibagatullin S.K., Gushchin D.N. *Zakonomernosti dvizheniya shikhty i gaza v domennoi pechi: monografiya* [Laws of motion of charge and gas in blast furnace: A monograph]. Sibagatullin S.K. ed. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, 2011, 161 p. (In Russ.).
6. Gushchin S.N., Kazyaev M.D., Kiselev E.V., Shavrin V.S., Yur'ev B.P. *Gidravlicheskiy raschet truboprovodov i vybor tyagodut'evykh sredstv, obespechivayushchikh rabotu promyshlennykh pechei* [Hydraulic calculation of pipelines and forced-draft choice of means to ensure the work of industrial furnace]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo fed. un-ta, 2011, 140 p. (In Russ.).
7. Chukin V.V., Kuznetsov R.F. Hydraulic resistance of the still dense layer. In: *sb. nauchnykh trudov VNIIMT "Teplotekhnika podgotovki*

- metallurgicheskogo syr'ya*" [Proceedings of VNIIMT "Heat preparation of metallurgical raw materials"]. Moscow: Metallurgiya, 1969, no. 16, pp. 50–59. (In Russ.).
8. Bernshtein R.S., Pomerantsev V.V., Shagalova S.L. The generalized method of calculating the aerodynamic resistance of the loaded sections. In: *Voprosy aerodinamiki i teploperedachi v kotel'no-topchnykh protsessakh* [Questions of aerodynamics and heat transfer in the boiler-furnace process]. Knorre G.F. ed. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1958, pp. 267–289. (In Russ.).
  9. Chechetkin A.V. *Vysokotemperaturnye teplonositeli* [High-temperature heat transfers]. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1962. 424 p. (In Russ.).
  10. Chervotkin V.V., Minaev Yu.E. The aerodynamic drag of lump ore. In: *sb. nauchnykh trudov VNIIMT "Teplotekhnika podgotovki metallurgicheskogo syr'ya*" [Proceedings of VNIIMT "Heat preparation of metallurgical raw materials"]. Moscow: Metallurgiya, 1969, no. 16, pp. 67–75. (In Russ.).
  11. Bratchikov C.G., Berman Yu.A., Belotserkovskii Ya.L. *Teplotekhnika okuskovaniya zhelezorudnogo syr'ya* [Heat engineering of iron ore agglomeration]. Moscow: Metallurgiya, 1970. 343 p. (In Russ.).
  12. Chukin V.V., Kuznetsov R.F. Hydraulic resistance of fixed and moving layers of lump materials. In: *sb. nauchnykh trudov VNIIMT "Obzhig rud, plavil'nye pechi, nagrev i okhlazhdenie stali*" [Proceedings of VNIIMT "Firing of ores, melting furnaces, heating and cooling of steel"]. Sverdlovsk: VNIIMT, 1967, no. 17, pp. 26–33. (In Russ.).

Received April 6, 2015