

DOI 10.23859/1994-0637-2019-2-89-2  
УДК 669.162.24

© Кабаков З. К., Бажанов П. И., Малыгин Л. Л., Харахнин К. А., 2019

**Кабаков Зотей Константинович**

Доктор технических наук, профессор,  
Череповецкий государственный университет  
(Череповец, Россия)  
E-mail: kabakovzk@mail.ru

**Kabakov Zotei Konstantinovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Cherepovets State University  
(Cherepovets, Russia)  
E-mail: kabakovzk@mail.ru

**Бажанов Павел Иванович**

Аспирант,  
Череповецкий государственный университет  
(Череповец, Россия)  
E-mail: bazhanov.pavel@bk.ru

**Bazhanov Pavel Ivanovich**

Post-graduate student,  
Cherepovets State University  
(Cherepovets, Russia)  
E-mail: bazhanov.pavel@bk.ru

**Малыгин Леонид Леонидович**

Доктор технических наук, доцент,  
президент ООО «Малленом Системс»  
(Череповец, Россия)  
E-mail: malygin@mallenom.ru

**Malygin Leonid Leonidovich**

Doctor of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
President of "Mallenom Systems"  
(Cherepovets, Russia)  
E-mail: malygin@mallenom.ru

**Харахнин Константин Аркадьевич**

Кандидат технических наук, доцент,  
Череповецкий государственный университет  
(Череповец, Россия)  
E-mail: harahninka@chsu.ru

**Harahnin Konstantin Arkadieovich**

PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Cherepovets State University  
(Cherepovets, Russia)  
E-mail: harahninka@chsu.ru

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ПРОФИЛЯ ЗАСЫПИ ШИХТОВЫХ  
МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

**ANALYTICAL MODEL OF THE  
PROFILE OF FILLING CHARGE  
MATERIALS IN THE BLAST  
FURNACE**

**Аннотация.** Приведена аналитическая модель профиля засыпки по радиусу доменной печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством. При выводе уравнений модели был учтен угол естественного откоса шихтовых материалов и порядок загрузки равновеликих зон по радиусу колошника. Представлены результаты сравнения программного распределения шихтовых материалов по зонам и результатов расчета высоты материала по радиусу колошника доменной печи.

**Abstract.** An analytical model of the material profile along the radius of the blast furnace is shown, which is equipped with a coneless loading device. The model equations take into account the slope angle of charge materials and the order of loading of equal-sized zones along the radius of the furnace top. The results of comparing the program distribution of charge materials by zones and the results of calculating the height of the material along the radius of the blast furnace top are presented.

**Ключевые слова:** доменная печь, распределение материалов, профиль засыпи, кольцевая зона, колошник

**Keywords:** blast furnace, distribution of materials, mound profile, annular zone, furnace top

### Введение

Нормальный ход доменной плавки связан с распределением шихтовых материалов (кокса и железорудной части – ЖРЧ) по радиусу колошника, от которого зависит производительность печи и расход кокса. Оптимальное распределение получают загрузкой материалов на колошник доменной печи из расходных бункеров с помощью бесконусного загрузочного устройства. Загрузка осуществляется подачами, каждая из которых состоит из порции кокса и порции ЖРЧ. Каждая порция загружается по своей программе, представляющей таблицу распределения массы материала по зонам. Такое распределение массы не гарантирует получить необходимое распределение толщин слоев кокса и ЖРЧ по радиусу колошника. Распределение массы материала по зонам является сложной задачей, так как в процессе загрузки массы по зонам происходит процесс растекания материала от места удара струи подаваемого материала, который, в свою очередь, зависит от порядка загрузки зон и других факторов. Для решения этой сложной задачи применяют методы математического и физического моделирования.

### Основная часть

В данной статье поставлена задача создать простую аналитическую модель формирования распределения материала по радиусу на основе данных о программе загрузки с учетом угла естественного откоса и порядке загрузки зон. Модель будет разработана для условий доменной печи полезным объемом 5500 м<sup>3</sup>. Подача состоит из порции кокса – 31 т и порции железорудной части шихтовых материалов – 120 т [1]. Каждая порция распределяется по радиусу колошника в виде засыпи по определенной программе [1]. Для этого площадь сечения  $F = \pi R^2$  разделяется на 10 равновеликих зон, площадь каждой из которых составляет  $S = \frac{F}{10} = \frac{\pi R^2}{10} = \pi \cdot \frac{5,6^2}{10} = 9,852 \text{ м}^2$ , где  $R = 5,6 \text{ м}$  – радиус сечения колошника. Основные геометрические характеристики равновеликих зон сечения колошника представлены в таблице 1. Программное распределение шихтовых материалов по зонам колошника приведено в работах [1].

Таблица 1

Характеристика равновеликих зон колошника

№ равновеликой зоны	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Границы зон, м	1,77	2,50	3,07	3,54	3,96	4,34	4,69	5,01	5,31	5,60
Ширина зон, м	1,77	0,73	0,56	0,47	0,42	0,37	0,35	0,32	0,30	0,29
Средний радиус зон $\bar{R}_i$ , м	0,89	2,14	2,79	3,30	3,75	4,15	4,51	4,85	5,16	5,46
Площадь кольца, м <sup>2</sup>	9,86	9,828	9,87	9,79	9,94	9,746	9,915	9,8	9,852	9,868

Зная объемы материалов, выгруженные на равновеликие зоны, и площадь зоны  $S = 9,852 \text{ м}^2$ , можно найти высоту засыпи в каждой зоне при допущении равномерного распределения материала в ней. Результаты расчета по формуле  $h_i = \frac{V_i}{S}$  приведены для порций ЖРЧ и кокса в табл. 2 и на рис. 1 в виде распределения высоты по радиусу колошника согласно программе засыпи, которое в первом приближении определяет профиль засыпи.

Таблица 2

Распределение высоты шихтовых материалов по равновеликим зонам согласно программе засыпи

№ равновеликой зоны	1	2	3	4	5
Высота ЖРЧ, м	-	-	0,45	0,77	0,90
Высота кокса, м	-	-	1,02	1,08	1,02
№ равновеликой зоны	6	7	8	9	10
Высота ЖРЧ, м	0,96	0,96	0,90	0,83	0,64
Высота кокса, м	0,93	0,93	0,87	0,45	-



x – средний радиус равновеликих зон

Рис. 1. Программа распределения высоты слоя ЖРЧ ( — ) и кокса ( - - ) по радиусу колошника

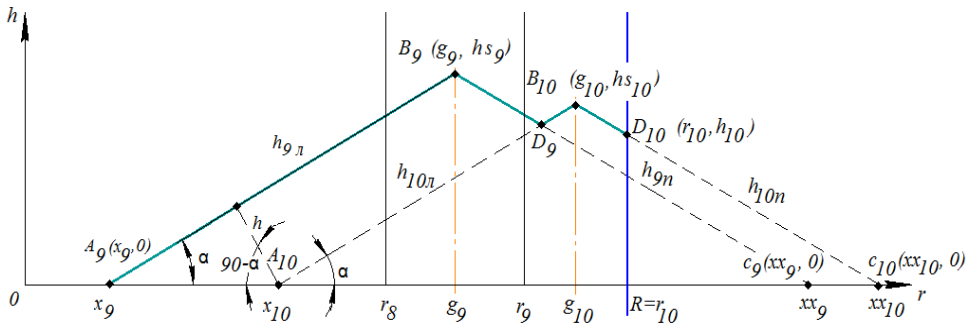
Как следует из рис. 1, на краях распределения материал будет осыпаться, и высота слоя на краях будет недостоверной. Полученные данные по высоте слоя нуждаются в учете естественного угла откоса, который характеризует каждый сыпучий материал.

Реальные распределения материала отличаются от программного, так как подаваемый в каждую зону материал рассыпается с образованием гребня. При этом происходит перемещение материала от места падения (средний радиус зоны) в соседние зоны. Форма гребня в первую очередь зависит от порядка подачи материала по зонам и угла естественного откоса материалов. Каждый шихтовый материал имеет

свой угол естественного откоса [2]: агломерат – 39–43°; окатыши – 30–35°; кокс – 41–45°.

Согласно технологии загрузки шихтовых материалов, равновеликие зоны, как правило, заполняются от периферии (зона 10) к центру (зона 1). Подача шихты осуществляется на середину кольцеобразной полоски каждой зоны.

Составим аналитическую модель формирования профиля засыпи для случая, когда начальный уровень шихты представляет собой горизонтальную поверхность. При этом в модели учтем порядок загрузки зон и угол естественного откоса. Для этого сначала рассмотрим заполнение зоны 10. Основные обозначения приведены на рис. 2.



$r_i$  – большой радиус  $i$  зоны, м;  $g_i$  – средний радиус  $i$  зоны, на которую поступает подача, м.

Рис. 2. Схема обозначений для определения профиля засыпи на плоскости колошника

Материал, который подается в точку, соответствующую центру радиуса  $g_{10} = \bar{R}_{10}$ , рассыпается справа до борта колошника ( $R = r_{10}$ ), а слева попадает даже в зону 9. Таким образом, форма засыпи зоны 10 представляет собой четырехугольник с вершинами  $A_{10}$ ,  $B_{10}$ ,  $D_{10}$ ,  $m$ . ( $r_{10}$ , 0). Площадь четырехугольника составляет величину  $S_{10} = \frac{V_{10}}{2\pi \cdot R_{10}}$ , где  $V_{10}$  – объем материала, подаваемого в 10 зону, м<sup>3</sup>. Для описания профиля засыпи зоны 10 необходимо знать координаты точек  $A_{10}$  ( $x_{10}$ , 0),  $B_{10}$  ( $g_{10}$ ,  $h_{S10}$ ),  $D_{10}$  ( $r_{10}$ ,  $h_{10}$ ) и вспомогательной точки  $C_{10}$  ( $xx_{10}$ , 0). Исходными данными являются площадь сечения зоны  $S_{10}$  и угол откоса  $\alpha$ . Для определения неизвестных  $x_{10}$ ,  $xx_{10}$ ,  $h_{10}$  и  $h_{S10}$  составим систему уравнений. Для этого запишем уравнения прямых (1), (2), (3), (4)  $h_{10л} = h_{10л}(r)$  и  $h_{10п} = h_{10п}(r)$  по двум соответствующим точкам:

$$\frac{0 - h_{10л}}{0 - h_{S10}} = \frac{x_{10} - r}{x_{10} - g_{10}}, \tag{1}$$

$$\frac{0 - h_{10п}}{0 - h_{S10}} = \frac{xx_{10} - r}{xx_{10} - g_{10}}, \tag{2}$$

$$h_{10п} = h_{S10} \frac{xx_{10} - r}{xx_{10} - g_{10}}, \tag{3}$$

$$h_{10л} = h_{S10} \frac{x_{10}-r}{x_{10}-g_{10}}. \quad (4)$$

Запишем выражение (5) для  $tg\alpha$  для двух условий откоса насыпи № 10:

$$tg\alpha = \frac{hs_{10}}{g_{10} - x_{10}}, \quad tg\alpha = \frac{hs_{10}}{xx_{10} - g_{10}}. \quad (5)$$

Площадь фигуры должна совпадать с площадью поперечного сечения насыпи № 10 зоны. Запишем это условие в виде уравнения (6):

$$s_{10} = \frac{1}{2} \cdot hs_{10} \cdot (g_{10} - x_{10}) + \frac{1}{2} \cdot (hs_{10} + h_{10}) \cdot (r_{10} - g_{10}). \quad (6)$$

Система для определения неизвестных имеет вид (7):

$$\begin{cases} 2s_{10} = hs_{10}(g_{10} - x_{10}) + (hs_{10} + h_{10}) \cdot (r_{10} - g_{10}) \\ hs_{10} = (g_{10} - x_{10})tg\alpha \\ hs_{10} = (xx_{10} - g_{10})tg\alpha \\ h_{10} = hs_{10} \frac{xx_{10} - r}{xx_{10} - g_{10}} \end{cases}. \quad (7)$$

Форма поперечного сечения зоны № 9 характеризуется точками  $A_9, B_9, D_9, A_{10}$ , обозначенными на рис. 2. При этом учитывается, что насыпь зоны № 9 не содержит насыпь зоны № 10. Итак, для зоны № 9 неизвестными являются  $x_9, hs_9, hd_9, rd_9$  и  $xx_9$ .

По аналогии запишем уравнения (8), (9) прямых  $h_{9л} = h_{9л}(r)$  и  $h_{9п} = h_{9п}(r)$ :

$$h_{9л} = hs_9 \frac{x_9 - r}{x_9 - g_9}, \quad (8)$$

$$h_{9п} = hs_9 \frac{xx_9 - r}{xx_9 - g_9}. \quad (9)$$

и выражения (10) для  $tg\alpha$  обоих углов откоса насыпи № 9:

$$tg\alpha = \frac{hs_9}{g_9 - x_9}, \quad tg\alpha = \frac{hs_9}{xx_9 - g_9}. \quad (10)$$

Найдем координаты точки  $D (rd_9, hd_9)$  из системы уравнений (11), (12) для  $h_{9п}$  и  $h_{9л}$ :

$$hd_9 = hs_9 \cdot \frac{xx_9 - rd_9}{xx_9 - g_9}, \quad (11)$$

$$hd_9 = hs_{10} \cdot \frac{x_{10} - rd_9}{x_{10} - g_{10}}. \quad (12)$$

Найдем площадь засыпи № 9 как площадь трапеции с высотой (13):

$$h = (x_{10} - x_9) \cos(90 - \alpha) = (x_{10} - x_9) \cdot \sin \alpha. \quad (13)$$

Определим длины отрезков, используя уравнения (14), (15), (16), (17):

$$|A_9B_9| = \sqrt{(g_9 - x_9)^2 + (hs_9)^2}, \quad (14)$$

$$|A_{10}d_9| = \sqrt{(rd_9 - x_{10})^2 + (hd_9)^2}, \quad (15)$$

$$S_9 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(g_9 - x_9)^2 + (hs_9)^2} + \sqrt{(rd_9 - x_{10})^2 + (hd_9)^2} \right] \cdot (x_{10} - x_9) \cdot \sin \alpha, \quad (16)$$

$$2S_9 = (x_{10} - x_9) \cdot \sin \alpha \left( \sqrt{(g_9 - x_9)^2 + (hs_9)^2} + \sqrt{(rd_9 - x_{10})^2 + (hd_9)^2} \right). \quad (17)$$

Итак, получили 5 уравнений (18) с пятью неизвестными:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2S_9 = \sin \alpha \cdot (x_{10} - x_9) \cdot \left( \sqrt{(g_9 - x_9)^2 + (hs_9)^2} + \sqrt{(rd_9 - x_{10})^2 + (hd_9)^2} \right) \\ hs_9 = (g_9 - x_9) \operatorname{tg} \alpha \\ hs_9 = (xx_9 - g_9) \operatorname{tg} \alpha \\ hd_9 = hs_9 \frac{xx_9 - rd_9}{xx_9 - g_9} \\ hd_9 = hS_{10} \frac{x_{10} - rd_9}{x_{10} - g_{10}} \end{array} \right. \quad (18)$$

Из системы уравнений (18) исключим переменные  $hs_9$  и  $hs_9$  и получим уравнение (19):

$$(g_9 - x_9) = (xx_9 - g_9). \quad (19)$$

В первое уравнение системы уравнений (18) подставим  $hs_9$  из второго уравнения системы уравнений (18) под первый корень. Далее  $hs_9$  из третьего уравнения подставим в четвертое системы уравнений (18) и получим  $hd_9 = \operatorname{tg} \alpha (xx_9 - rd_9)$ , которое подставим под второй корень первого уравнения системы уравнений (18). В результате получим уравнение (20):

$$2S_9 = \sin \alpha \cdot (x_{10} - x_9) \left[ \sqrt{(rd_9 - x_{10})^2 + [\operatorname{tg} \alpha \cdot (xx_9 - rd_9)]^2} + (g_9 - x_9) \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \alpha)^2} \right]. \quad (20)$$

Приравняем  $hd_9$  из четвертого и пятого уравнения системы уравнений (18) и подставим в результат  $hs_9$  из третьего уравнения системы уравнений (18), получив следующее уравнение (21):

$$(xx_9 - g_9) \cdot tg\alpha \cdot \frac{(xx_9 - rd_9)}{(xx_9 - g_9)} = hs_{10} \cdot \frac{x_{10} - rd_9}{x_{10} - g_{10}}. \quad (21)$$

Получим уравнение (22):

$$tg\alpha \cdot (xx_9 - rd_9) \cdot (x_{10} - g_{10}) = hs_{10} \cdot (x_{10} - rd_9). \quad (22)$$

Итак, получили систему трех уравнений (23) относительно  $rd_9$ ,  $x_9$  и  $xx_9$ :

$$\begin{cases} 2s_9 = \sin \alpha \cdot (x_{10} - x_9) \cdot \left[ \sqrt{(rd_9 - x_{10})^2 + [tg\alpha \cdot (xx_9 - rd_9)]^2} + \right. \\ \left. (g_9 - x_9) \cdot \sqrt{1 + (tg\alpha)^2} \right] \\ g_9 - x_9 = xx_9 - g_9 \\ tg\alpha \cdot (xx_9 - rd_9) \cdot (x_{10} - g_{10}) = hs_{10} \cdot (x_{10} - rd_9) \end{cases} \quad (23)$$

Аналогичные системы уравнений (23) выводятся для зон 8–1. Совокупность системы уравнений, определяющих расположение характерных точек, составляет аналитическую модель формирования профиля насыпи. Последовательность решения систем уравнений представлена в виде блок-схемы алгоритма на рис. 3.

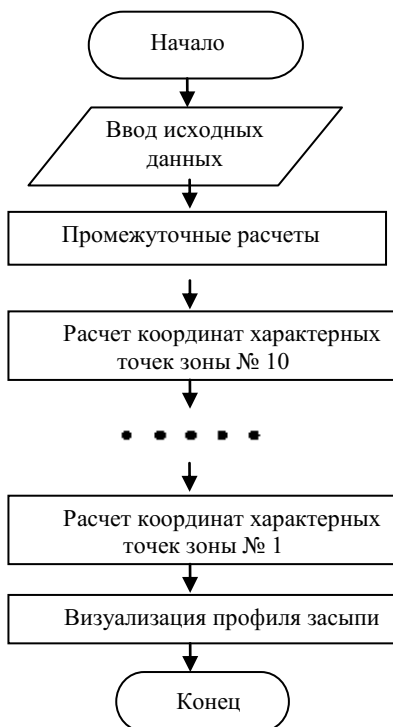


Рис. 3. Блок-схема алгоритма модели формирования профиля насыпи

Алгоритм реализован с использованием ППП Mathcad. Результаты моделирования представлены для указанной доменной печи в виде кусочно-линейной функции толщины материала от радиуса колошника (рис. 4).

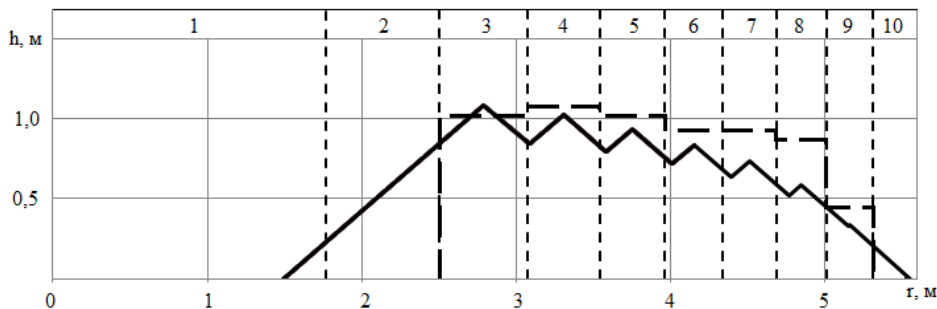


Рис. 4. Распределение кокса по радиусу колошника согласно программе (— —) и полученные результаты моделирования (——)

На рис. 4 представлены варианты моделирования формирования профиля засыпи кокса.

### Выводы

Данные по программному распределению и результаты моделирования значительно отличаются друг от друга. Учет угла естественного откоса и порядка загрузки по зонам (—— модель) привел к перераспределению кокса по радиусу колошника, особенно в сторону зоны 1. Такая особенность согласуется с известными данными [3]. В дальнейшем адекватность модели будет проверена путем сравнения результатов моделирования с данными формирования профиля засыпи, полученными на физической модели.

### Литература

1. Большаков В. И., Гладков Н. А., Шутылев Ф. М. Исследование особенностей распределения шихтовых материалов в доменной печи // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 6. С. 7–10.
2. Сибатуллин С. К., Гушин Д. Н., Тимофеев В. Ю., Филиппов А. И., Сибатуллина М. И. О действии соотношения углов откоса загружаемых материалов на их распределение в колошниковом пространстве доменной печи // *Теория и технология металлургического производства*. 2015. № 1. С. 30–35.
3. Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С. Применение радиолокационных систем измерения поверхности засыпи шихты для контроля и управления доменной плавкой. Днепропетровск: Пороги, 2013. 364 с.

### References

1. Bol'shakov V. I., Gladkov N. A., Shutylev F. M. Issledovanie osobennosti raspredeleniia shikhtovykh materialov v domennoi pechi [Study of the distribution of charge materials in a blast furnace]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], 2006, no. 6, pp. 7–10.

---

2. Sibagatullin S. K., Gushchin D. N., Timofeev V. Iu., Filippov A. I., Sibagatullina M. I. O de-istvii sootnosheniia uglov otkosa zagruzhaemykh materialov na ikh raspredelenie v kolosnikovom prostranstve domennoi pechi [On the effect of the ratio of slope angles of loaded materials on their distribution in the blast furnace top space]. *Teoriia i tekhnologiiia metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical production], 2015, no. 1, pp. 30–35.

3. Bol'shakov V. I., Murav'eva I. G., Semenov Iu. S. *Primenenie radiolokatsionnykh sistem izmereniia poverkhnosti zasypi shikhty dlia kontroliia i upravleniia domennoi plavkoi* [The use of radar systems for measuring the surface of the charge sheet to monitor and control blast furnace smelting]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2013. 364 p.

---

**Для цитирования:** Кабаков З. К., Бажанов П. И., Малыгин Л. Л., Харахнин К. А. Аналитическая модель профиля засыпи шихтовых материалов в доменной печи // Вестник Череповецкого государственного университета. 2019. № 2 (89). С. 23–31. DOI: 10.23859/1994-0637-2019-2-89-2

**For citation:** Kabakov Z. K., Bazhanov P. I., Malygin L. L., Harahnin K. A. Analytical model of the profile of filling charge materials in the blast furnace. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2019, no. 2 (89), pp. 23–31. DOI: 10.23859/1994-0637-2019-2-89-2