

УДК 621.396.969

М.А. Рыбальченко, В.П. Иващенко,
В.И. Головки, Р.В. Кирия, Г.А. Папанов

ПРОВЕРКА НА АДЕКВАТНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ РАСХОДА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ОТ УГЛА ОТКРЫТИЯ ЗАСЛОНКИ

Получена математическая модель зависимости расхода сыпучего материала от угла открытия заслонки в зависимости от параметров выпускного отверстия, размеров частиц, свойств выгружаемого сыпучего груза, длины выпуска и скорости открытия затвора. Выполнен сравнительный анализ теоретических расчетов со статистическими данными фактической производительности загрузки наклонного (скипового) конвейера шихтовыми материалами действующей системы шихтоподачи доменной печи, полученными с использованием разработанной методики расчета секундных объемов.

Ключевые слова: ШИХТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ВЕСОВОЙ БУНКЕР, РАСХОД, ЗАСЛОНКА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, АДЕКВАТНОСТЬ.

Отримана математична модель залежності витрати сипучого матеріалу від кута відкриття заслінки залежно від параметрів выпускного отвору, розмірів часток, властивостей сипучого матеріалу, що вивантажується, довжини випуску й швидкості відкриття затвору. Виконаний порівняльний аналіз теоретичних розрахунків зі статистичними даними фактичної продуктивності завантаження похилого (скіпового) конвеєра шихтовими матеріалами діючої системи шихтоподачі доменної печі, отриманими з використанням розробленої методики розрахунків секундних об'ємів.

Ключові слова: ШИХТОВІ МАТЕРІАЛИ, ВАГОВИЙ БУНКЕР, ВИТРАТА, ЗАСЛІНКА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, АДЕКВАТНІСТЬ.

The mathematical model of dependence of expense of friable material is got from the corner of opening of zaslonki depending on the parameters of tape-hole, sizes of particles, properties of checkpointable friable load, lengths of issue and speed opening of breech-block. The comparative analysis of theoretical calculations is executed with statistical information of the actual productivity of load of sloping (skipovogo) conveyer shikhtovymi materials of the operating system of shikhtopodachi of high furnace, got with the use of the developed method of calculation of the second volumes.

Key words: CHARGE MATERIALS, WEIGH HOPPER, FLOW VALVE, MATHEMATICAL MODEL, ADEQUACY.

Для решения задачи увеличения объема шихтовых материалов, загружаемых в печь за время одной подачи [1] необходимо увеличить по сравнению с существующими объемы весовых воронок системы шихтоподачи. Вместе с тем, увеличение объема весовой воронки связано с коренной реконструкцией шихтоподачи и, следовательно, со значительным ростом капитальных затрат.

В результате проведенных измерений численных значений высоты и длины параметров слоя, лежащего на конвейере, установлено, что очертание дозы материала, лежащего на конвейере имеет в сечении четко выраженную головную, центральную и хвостовую часть (высота и длина

слоя материала фиксировалась в трех точках сечения: центральной – по оси конвейера, левой и правой от центральной). Концевые части дозы на конвейере составляли от общей длины более 55 % (по коксу) и 46% (по агломерату и окатышам). Это связано с неравномерным характером поступления материала из весовой воронки, режимом работы, неравномерностью слоя материала.

Таким образом, значительная часть времени загрузки материалом конвейера расходуется непроизводительно и требует его сокращения. В связи с этим, одним из решений данной задачи может быть совмещение двух или нескольких доз материала, что позволит уменьшить цикл разгрузки весовых воронок. Это может быть достигнуто совмещением концевых частей этих доз за время их выдачи на конвейер.

В тоже время применение бесконусных загрузочных устройств значительно расширило технологические возможности регулирования и распределения шихты по радиусу колошника. При этом возникла возможность разработки новых методов управления газовым потоком, отличных от традиционных. Одним из таких методов является загрузка в печь многокомпонентных порций шихты с технологически обоснованным соотношением компонентов.

Однако бесконусное загрузочное устройство не предназначено для формирования порций шихты путем смешивания с одновременным сдвигом в процессе загрузки одного вида материала относительно другого на заданную величину. Реализовать формирование таких порций можно с помощью ЭВМ системы шихтоподачи в процессе разгрузки материалов из весовых воронок на доменный конвейер.

Результаты работ по повышению эффективности смешивания различных железосодержащих материалов на печах большого объема показали, что рациональное решение этих задач может быть получено и реализовано лишь при использовании комплексного подхода, учитывающего применение специальных приемов управления выпуском шихты, особенности формирования порций, конструкции весовых бункеров, механизмов выпуска и требований распределения материалов на колошнике.

К настоящему времени в доменном производстве опробованы и нашли применение двухкомпонентные порции [2], состоящие из агломерата и окатышей, окатышей и кокса, агломерата и кокса, а также трехкомпонентные [3], включающие в себя агломерат, кокс и окатыши. Как правило, смешанные порции, сформированные на конвейере имеют головную и смешанную части, отличающиеся составом компонентов. При этом общим требованием для порций любой структуры следует считать минимизацию длины порции на конвейере, что обеспечивает максимальное использование пропускной способности системы загрузки и рациональные режимы эксплуатации оборудования. Это требование выполняется при соблюдении зависимости:

$$\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\gamma_i} = \Pi, \quad (1)$$

где n – количество компонентов, подлежащих смешиванию в данной части порции;

q_i – расход i -го компонента при выгрузке из бункерных весов, кг/с;

γ_i – насыпная масса i -го компонента, кг/м³;

Π – пропускная способность конвейера, м³/с.

Необходимым условием формирования многокомпонентной порции является применение адекватной математической модели процесса истечения сыпучего груза из весового бункера с регулируемой заслонкой.

Экспериментальные исследования процесса истечения шихтовых материалов на действующих системах показали, что традиционно применяемые для расчета требуемых величин расхода формулы Алферова, Зенкова дают завышенные значения. Расхождение расчетных и экспериментальных значений для шихтовых материалов доменной плавки достигает 30 % [4].

Поскольку математических моделей истечения сыпучего груза из весового бункера с регулируемой заслонкой не существует, то целью явилась разработка математической модели истечения материала из бункера с регулируемой заслонкой и установление зависимости расхода материала от угла открытия заслонки.

Такая модель была получена в результате математического описания структурно-механического состояния сыпучего материала в разных зонах в результате его истечения [5].

Полученная зависимость расхода и скорости истечения сыпучих материалов из бункера в зависимости от угла открытия заслонки, параметров выпускного отверстия, размеров частиц и свойств данного выгружаемого сыпучего груза [6] не описывает неустановившейся режим движения сыпучего материала, возникающий при быстром открытии затвора (на шихтоподаче доменной печи № 9 открытие затвора весового бункера кокса равно 4,4 с, агломерата – 4с).

В этой связи, в математическую модель, описывающую движение материала на выходе из весового бункера, была введена составляющая-инерционный напор, необходимый для преодоления инерции сыпучего материала. Длина выпускного лотка (установленного после секторного затвора) при истечении материала на конвейер также оказывает влияние, например, при увеличении его длины инерционный напор повышается.

В результате была получена зависимость расхода сыпучего материала от угла открытия заслонки в зависимости от параметров выпускного отверстия, размеров частиц, свойств выгружаемого сыпучего материала, длины выпуска и скорости открытия затвора:

$$Q = \eta b a^{1.5} \sqrt{g} - \frac{b \cdot B \cdot \cos(\phi - \beta) \cdot a \cdot l \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 + \xi) \cdot (K_1 + \operatorname{tg} \alpha) \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

где $\eta = \frac{\delta \eta_0 \sin \alpha}{\sqrt{\delta^2 \sin^2 \alpha + k^2 K_2}}$; $\delta = \frac{a}{d}$, $K_2 = K_u \cdot \frac{l}{0.24 \cdot a \cdot \sin \alpha}$;

$$\eta_0 = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cos(\phi_c - \beta) B \sqrt{A + \chi'} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{K_1 + \operatorname{tg} \alpha} \right)^{1.5};$$

$$K_1 = \frac{1}{2} (f + \sqrt{1 + f^2}); \quad \chi' = f + \frac{1}{f} - \sqrt{1 + f^2};$$

$$A = \frac{\operatorname{tg} \phi_c (1 - K_1 \operatorname{tg} \beta)}{1 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \phi_c}; \quad B = \frac{(K_1 + \operatorname{tg} \phi_c) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}{1 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \phi_c}.$$

Здесь η – безразмерный коэффициент расхода сыпучего груза из бункера с горизонтальным выпускным отверстием и регулируемой заслонкой;

b – длина щелевого выпускного отверстия, м;

a – ширина выпускного отверстия, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²

d – средний размер частиц сыпучего груза, м;

k – кинетический коэффициент, характеризующий потерю механической энергии потока сыпучего груза в результате столкновения частиц ($k = 10-13$);

K_2 – некоторый безразмерный коэффициент, зависящий от условий истечения сыпучего груза из бункера;

K_u – некоторый безразмерный коэффициент, определяющий инерцию на повороте, определяемый из эксперимента;

f – коэффициент внутреннего трения сыпучего груза;

α – угол наклона заслонки, град.;

β – угол наклона выходного сечения сыпучего груза из бункера с регулируемой заслонкой, град.;

ϕ_c – среднее значение угла наклона вектора скорости выхода частиц груза из бункера к горизонтали, град.;

l – длина выпуска;

Δt – время открывания затвора;

ξ – коэффициент местных потерь [7].

При этом угол β определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{a/l - \cos \alpha}{\sin \alpha}, \quad (0 \leq \alpha \leq 0,5\pi; \alpha - \beta \leq 0,5\pi). \quad (3)$$

Среднее значение угла ϕ_c приблизительно можно определить по формуле:

$$\phi_c \approx \begin{cases} \frac{0,5\pi + \alpha}{2}, & \text{если } \beta \geq 0, (\alpha \leq \phi_c \leq 0,5\pi); \\ \frac{(0,5\pi + \beta) + \alpha}{2}, & \text{если } \beta < 0, (\alpha \leq \phi_c \leq 0,5\pi + \beta). \end{cases} \quad (4)$$

Для проверки адекватности полученной математической модели необходимо сравнение теоретических расчетов со статистическими данными фактической производительности загрузки наклонного (скипового) конвейера шихтовыми материалами действующей системы шихтоподачи доменной печи.

Решение данной задачи требует определения секундных объемов, позволяющих установить характер и величину неравномерности загрузки конвейера коксом, агломератом и окатышами в единицу времени.

Секундный объем прямо пропорционален средней площади поперечного сечения S_m материала, расположенного на ленте, и скорости движения ленты $v_{кн}$:

$$V_{м.т.} = \frac{(S_t + S_{t-1} + \sqrt{S_t \cdot S_{t-1}})}{3} \cdot v_{кн}, \quad (5)$$

где t – текущее время поступления материала на конвейер;

S_t – площадь поперечного сечения в момент времени t ;

S_{t-1} – площадь поперечного сечения в момент времени $(t - 1)$.

Относительно формы сечения дозы на ленте существует ряд предположений, рассмотренных, например, в работе Н.С.Полякова и И.Г.Штокмана [8], на основании которых можно выразить площадь S_t через ширину поперечного сечения материала. Так, К.Штуммелен предложил считать, что материал расположен на ленте слоем, ограниченным сверху дугой окружности, касательные которой АВ :и СВ в точках А и С пересечения с лентой наклонены к горизонтали под углом естественного откоса ρ_0 (рис. 1). Ограничение материала снизу осуществляется лентой конвейера, поперечное сечение которой является частью окружности. Проверка этого предложения, выполненная по формуле

$$Z_k = \sqrt{l_k + \frac{16}{3} \cdot h_k^2} \quad (6)$$

где Z_k – длина дуги, образованной в сечении лентой конвейера;

l_k , h_k – соответственно ширина и высота сегмента, образованного лентой конвейера показала, что допущение является правильным, так как отклонение Z_k от действительной менее 0,5 %. Тогда радиус этой части окружности определится по формуле:

$$R_k = \frac{l_k^2 + 4 \cdot h_k^2}{8h_k} \quad (7)$$

Текущее значение величины $h_{ц.в.}$ (рис. 1) получим из уравнения:

$$h_{ц.в.} = R_k - \sqrt{R_k^2 - \frac{l_0^2}{4}} \quad (8)$$

где l_0 – текущее значение ширины поперечного сечения материала.

На основании работы [8], величина $h_{ц.н.}$ будет равна:

$$h_{ц.н.} = \frac{l_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\rho_0}{2} \quad (9)$$

$$h_{ц.н.} = H_{ц.} - h_{ц.в.} \quad (10)$$

где $H_{ц.}$ – текущее значение высоты слоя материала.

Решая совместно уравнения (5)-(7), после преобразований получим:

$$l_0 = \frac{2 \left\{ \left[\operatorname{tg} \frac{\rho_0}{2} (H_{ц.} - R_k) \right] \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \frac{\rho_0}{2} (H_{ц.} - R_k)^2 - (\operatorname{tg}^2 \frac{\rho_0}{2} + 1)(H_{ц.} - 2 \cdot H_{ц.} \cdot R_k)} \right\}}{\operatorname{tg}^2 \frac{\rho_0}{2} + 1} \quad (11)$$

Величина площади поперечного сечения материала может быть рассмотрена в виде суммы:

$$S_t = S_{\varepsilon} + S_n, \quad (12)$$

где S_{ε} – площадь поперечного сечения материала, ограниченная прямой АС и снизу кривой АОС;

S_n – площадь поперечного сечения материала, ограниченная сверху ломанной АД FRC и снизу прямой АС.

С учетом того, что длина \frown АОС равна:

$$Z_{\varepsilon} = \sqrt{l_0^2 + \frac{16}{3} \cdot h_{ц.в.}^2} \quad (13)$$

Численное значение площади S_{ε} определится из выражения:

$$S_{\varepsilon} = \frac{R_k}{2} \left(\sqrt{l_0^2 + \frac{16}{3} \cdot h_{ц.в.}^2} - l_0 \right) + \frac{l_0 \cdot h_{ц.в.}}{2} \quad (14)$$

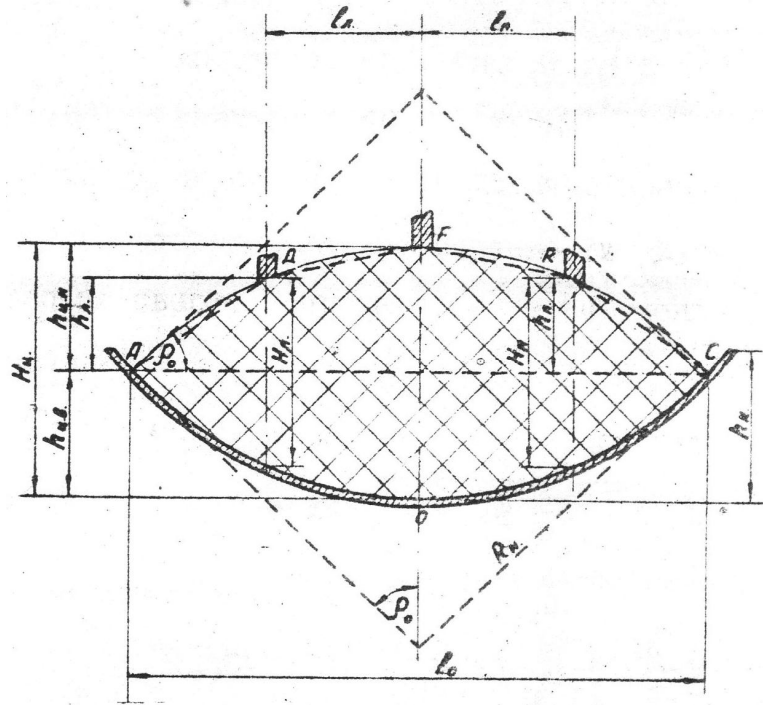


Рисунок – 1. Форма сечения материала на конвейере

Для упрощения вычислений, с некоторым запасом в сторону уменьшения возможной производительности конвейера, можно заменить

— AFC ломанной линией ADFRC. В этом случае величина S_n определится из выражения:

$$S_n = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{l_0}{2} - l_l \right) \cdot h_l + (h_l + h_{ц.н.}) \cdot l_l + \left(\frac{l_0}{2} - l_n \right) \cdot h_n + (h_n + h_{ц.н.}) \cdot l_n \right\} \quad (15)$$

l_l, l_n – соответственно расстояние от оси левого и правого датчика до оси центрального;

h_l, h_n – соответственно текущее значение высоты слоя материала от прямой AC до точки D и R.

Численное значение h_l будет равно:

$$h_l = h_{ц.н.} - [H_{ц} - (L_{ц} - L_l) - H_l], \quad (16)$$

$L_{ц}, L_l$ – соответственно расстояние по вертикали от места крепления центрального и левого датчика до ленты конвейера;

H_l – высота сечения материала в точке его соприкосновения с левым датчиком.

Величина h_n определяется аналогично h_l .

С другой стороны, радиус окружности, дуга которой ограничивает материал сверху, определится из выражения[8]:

$$R_n = \frac{l_0}{2 \sin \rho_0} \quad (17)$$

С учетом того, что длина — AFC равна:

$$Z_n = \sqrt{l_0^2 + \frac{16}{3} \cdot h_{ц.н.}^2} \quad (18)$$

Численное значение площади S_n составит:

$$S_n = \frac{R_n}{2} \left(\sqrt{l_0^2 + \frac{16}{3} \cdot h_{ц.н.}^2} - l_0 \right) + \frac{l_0 \cdot h_{ц.н.}}{2} \quad (19)$$

Необходимо отметить, что расчет секундных объемов до момента касания материалом боковых датчиков и в дальнейшем при установке в вертикальное положение одного из них осуществляется на основании показаний перемещения центрального датчика.

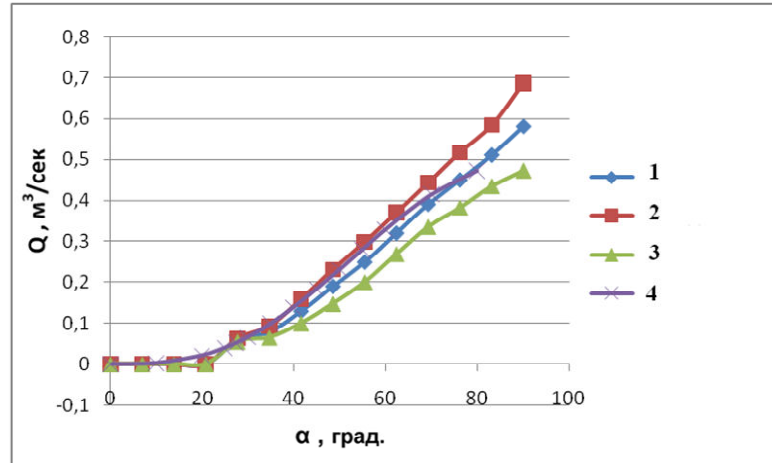
Полученные результаты производительности загрузки конвейера агломератом подтвердили, что расчеты секундных объемов с использованием выражения (15) являются достаточно точными. Так, например, при дозе агломерата в 22 м³ ошибка в вычислениях составила менее 1,5%. При определении секундных объемов, где величина S_n была вычислена по формуле (19), ошибка составила 5,5%. В связи с этим, для получения статистических данных производительности загрузки конвейера шихтовыми материалами, секундные объемы определялись на основании показаний трех датчиков геометрии дозы.

При этом, угол естественного откоса кокса и агломерата был принят равным 43⁰, а окатышей – 34⁰. Результаты статистической обработки загрузки конвейера для одного вида материала (агломерата) представлены в таблице 1. Закон распределения случайных величин носит нормальный характер. Соответствие эмпирических и теоретических частот было проверено по критерию Пирсона.

Таблица 1

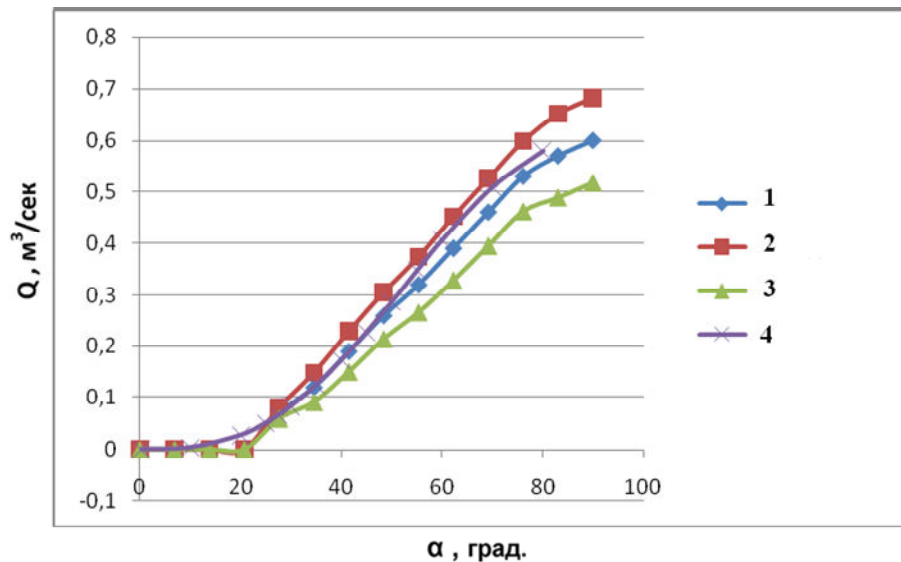
Материал	Время t(сек)	Секундный объем (м ³ /сек)		Отклонение секундного объема (м ³ /сек)		Центральная часть(м ³ /сек)	
		Головная часть М{V _г }	Хвостов. часть М{V _к }	Головная часть σ{V _г }	Хвостов. часть σ{V _к }	М{V _ц }	σ{V _ц }
Агломерат	1	0,06	0,65	0,004	0,093	0,66	0,070
	2	0,08	0,55	0,014	0,098		
	3	0,13	0,42	0,029	0,092		
	4	0,19	0,29	0,042	0,072		
	5	0,25	0,19	0,049	0,048		
	6	0,32	0,13	0,050	0,030		
	7	0,39	0,09	0,054	0,020		
	8	0,45	0,07	0,067	0,011		
	9	0,51	0,06	0,074	0,005		
	10	0,58	0,06	0,106	0,002		

Сравнительный анализ результатов показал, что теоретические расчеты с использованием разработанной математической модели зависимости расхода сыпучего материала от угла открытия заслонки совпадают с данными фактических измерений с отклонением от математического ожидания в пределах среднеквадратического отклонения (рис.2–4).



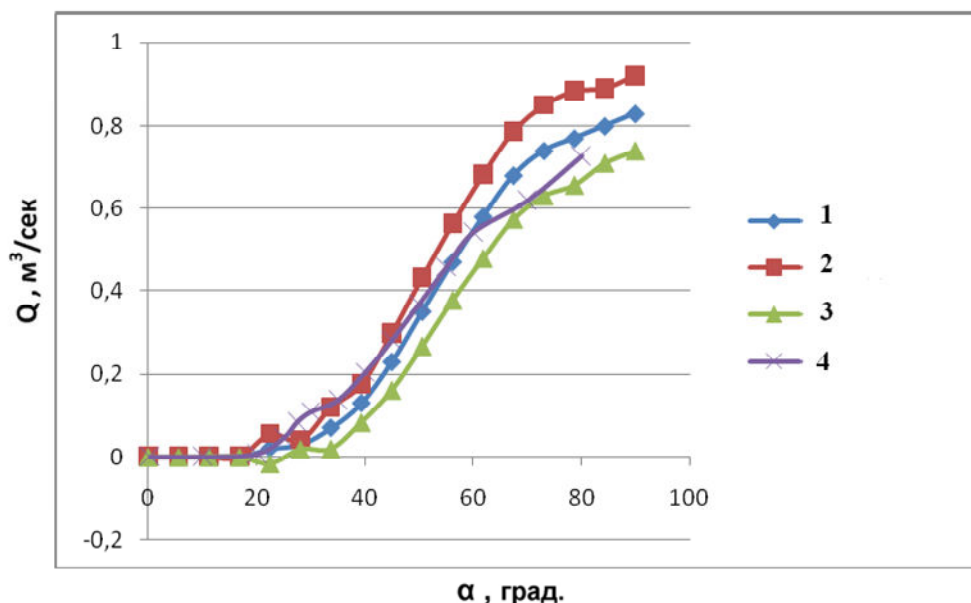
1 –математическое ожидание расхода агломерата $M[Q]$;
 2 – $M[Q]+\sigma[Q]$; 3 – $M[Q]-\sigma[Q]$; 4 – расчетные значения

Рисунок – 2. График зависимости расхода агломерата от угла открытия заслонки в зависимости от параметров выпускного отверстия, размеров частиц и свойств выгружаемого сыпучего груза, длины выпуска и скорости открытия затвора



1 –математическое ожидание расхода окатышей $M[Q]$;
 2 – $M[Q]+\sigma[Q]$; 3 – $M[Q]-\sigma[Q]$; 4 – расчетные значения

Рисунок – 3. График зависимости расхода окатышей от угла открытия заслонки в зависимости от параметров выпускного отверстия, размеров частиц и свойств выгружаемого сыпучего груза, длины выпуска и скорости открытия затвора



1 – математическое ожидание расхода кокса $M[Q]$;
 2 – $M[Q]+\sigma[Q]$; 3 – $M[Q]-\sigma[Q]$; 4 – расчетные значения

Рисунок – 4. График зависимости расхода кокса от угла открытия заслонки в зависимости от параметров выпускного отверстия, размеров частиц и свойств выгружаемого сыпучего груза, длины выпуска и скорости открытия затвора

Выводы

Анализ обширного статистического материала геометрических параметров дозы, транспортируемой наклонным конвейером, позволил установить, что концевые части дозы на конвейере составляют от общей ее длины: для кокса – более 55%, для агломерата и окатышей – более 46%. Таким образом, реализация подачи шихтовых материалов на сборный конвейер, совмещением цикла разгрузки каналов дает возможность увеличить объем доз шихтовых материалов, подаваемых в печь за время одной подачи.

С целью оптимального формирования многокомпонентной порции шихты на доменном конвейере, получена математическая модель зависимости расхода сыпучего материала от угла открытия заслонки в зависимости от параметров выпускного отверстия, размеров частиц, свойств выгружаемого сыпучего груза, длины выпуска и скорости открытия затвора.

Сравнительный анализ теоретических расчетов со статистическими данными фактической производительности загрузки наклонного (скипового) конвейера шихтовыми материалами действующей системы шихтоподачи доменной печи, полученные с использованием разработанной методики расчета секундных объемов, показал, что расчетные значения совпадают с данными фактических измерений с отклонением от математического ожидания в пределах среднеквадратического отклонения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Некрасов З.И. Анализ работы печи № 9 объемом 5000м³ за период январь-март 1975г. и разработка рекомендаций по технологии ведения печи и оборудования с целью увеличения производительности до 9000т в сутки. ИЧМ, Днепропетровск – Кривой Рог, 1975.
2. А.С. № 694446. Способ подачи шихтовых материалов в доменную печь/Праздников А.В., Клоцман Е.Я., Шутылев Ф.М., Головки В.И. и др.//Зарегистрировано 06.07.1979г.
3. А.С. № 1049549 СССР. Способ управления механизмами транспортной шихтоподачи доменных печей/Золотницкая Г.Д., Френкель М.М., Бургутин Ю.И. и др.//Зарегистрировано 22.06.1983.
4. Большаков В.И., Иванча Н.Г. Формирование смешанных порций шихтовых материалов на доменном конвейере//Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. - №6. – с.79 – 83.
5. К вопросу об истечении сыпучего груза из бункера со щелевым отверстием / Р.В. Кирия, В.Ю. Максютенко, Д.Д. Брагинец, Б.И. Мостовой // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. - Вып 80. - С. 351-362.
6. Определение расхода сыпучего груза из бункера с регулируемой заслонкой/ Р.В. Кирия, В.Ю. Максютенко, Д.Д. Брагинец, Б.И. Мостовой // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины.
7. Кирия, Р.В. О коэффициенте внутренних потерь при движении сыпучей среды по элементам перегрузочных узлов ленточных конвейеров / Р.В. Кирия // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. - Днепропетровск, 2003. – Вып. 41. - С. 159-167.
8. Поляков Н.С., Штокман И.Г. Основы теории и расчеты рудничных транспортных установок. Научно-техническое издательство литературы по горному делу, М., 1962.

Получено 11.06.2012 г.