

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОКАТЫШЕЙ

**Якубовский А. В., магистрант; Хорхордин А. В., проф., к.т.н., доц.**  
(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР)

Процесс производства металлизированных окатышей стал неотъемлемой частью металлургического комплекса, а в силу своей механической и физико-химической природы представляет собой весьма интересный объект научных исследований. Что еще более возбуждает научный интерес к процессу окомкования, так это факт, что «окомкование применяют как в металлургии железа, так и в металлургии цветных металлов, в цементной, силикатной, фармацевтической и пищевой промышленности» [1].

В данной статье обсуждается один из возможных подходов описания процессов, происходящих в барабанном грануляторе. Гранулятор длиной 10 м. на всем своем протяжении, на каждом отрезке  $\Delta l$  имеет разный закон распределения это происходит в связи с тем, что с длиной  $l$  в процессе роста окатышей закон распределения перемещается правее по оси  $\xi$ , меняется его математическое ожидание и СКО. Но т.к. задачу моделирования такой системы решить сложно, то в данной работе будет рассматриваться только закон распределения окатышей  $k$ -го слоя, находящегося ближе к разгрузочному концу гранулятора.

Процессы происходящие в грануляторе довольно сложны [1]. Подобный окомкованию в барабане, процесс гранулирования [2, 3] может быть описан уравнением баланса популяции частиц (1) [3], в котором учитываются такие параметры, как распределение частиц по размерам  $n(\xi, t)$ , внутренняя координата  $\xi$ , например, диаметр гранул и зародышей, их скорость роста  $G(\xi)$ :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial G(\xi)n}{\partial \xi} + F(n, \xi). \quad (1)$$

Здесь также учитываются входные потоки  $F(n, \xi)$ , например, объем вводимого сырья и объем возвращаемых на обработку заново перемолотых гранул  $\dot{n}_{mill}$ , превысивших размер кондиционных гранул. Здесь также учитываются и выходы, например, отток кондиционных гранул  $\dot{n}_{prod}$  и отток гранул на повторную обработку  $\dot{n}_{oversize}$ . Уравнение (2) более точно описывает этот процесс:

$$\frac{\partial n(\xi, t)}{\partial t} = -\frac{\partial G(\xi)n(\xi, t)}{\partial \xi} - \dot{n}_{prod} - \dot{n}_{oversize} + \dot{n}_{mill}. \quad (2)$$

В этом уравнении не учтены мелкие частицы, которые удаляются из гранулятора и затем сразу же возвращаются в гранулятор.

Процессы изготовления окатышей в первом приближении можно попытаться описать подобным уравнением материального баланса. Только в нём вместо входного потока  $\dot{n}_{mill}$  будет  $\dot{n}_{out, k-1}$ , а вместо выходных потоков  $\dot{n}_{prod}$  и  $\dot{n}_{oversize}$  будет  $\dot{n}_{out, k}$ . А скорость роста окатышей может быть описана уравнением, подобным уравнению скорости роста гранул. В процессе окомкования также учитываются такие параметры, как угол наклона барабана, скорость его вращения, толщина гарниссажа. На процесс окомкования оказывают влияние скорость подачи воды на форсунки и брызгала, крупность капель, распыляемых форсунками, температурный режим, а также параметры, различные для каждого гранулятора, такие, как диаметр барабана, его длина (если это барабанный гранулятор), диаметр тарели (если это

тарельчатый гранулятор), основность шихты, ее состав, крупность фракции, влажность поступающей шихты, скорость ее подачи и заполненность гранулятора.

В связи с тем, что на процесс окомкования влияют многочисленные факторы, перечисленные выше, можно предположить, что распределение гранулометрического состава шихты в барабанном грануляторе по диаметру гранул (окатышей) в  $k$ -ом слое подчиняется закону, близкому к нормальному закону распределения. Математическое ожидание  $M(\xi, t)$  и среднеквадратическое отклонением  $\sigma(\xi, t)$  этого распределения являются также функциями времени. На справедливость такого предположения указывают результаты исследований, описанные в книге [1, рис. 47-49]. Таким образом, можно утверждать, что мгновенное распределение гранулометрического состава комкуемой смеси по диаметру окатышей в  $k$ -ом слое имеет вид (3):

$$n_k(\xi, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma(\xi, t)} e^{-\frac{(\xi - M(\xi, t))^2}{2\sigma(\xi, t)^2}} . \quad (3)$$

С целью упрощения дальнейшего изложения предположим, что ряд факторов, таких как скорость вращения и угол наклона барабана, основность шихты и ее состав, крупность фракции и влажность поступающей шихты, а также заполненность гранулятора являются величинами постоянными. Поскольку влажность комкуемого тонкозернистого материала, зависящая от количества подаваемой воды на брызгала, в решающей мере влияет на скорость окомкования и на свойства окатышей [1], исследуем на основании уравнения баланса (2) именно влияние влажности на гранулометрический состав смеси. По аналогии с этими исследованиями можно будет в дальнейшем исследовать влияние и других факторов.

Известно, что «скорость роста окатышей в значительной мере определяется влажностью комкуемой смеси: с ее увеличением рост окатышей ускоряется» [1], в то же время скорость роста замедляется с увеличением диаметра окатышей. Следовательно, моделью скорости роста окатышей в зависимости от влажности комкуемой смеси и диаметра окатышей могла быть функция вида (4), представляющая собой произведение функций, графики которых представлены на рис. 1.

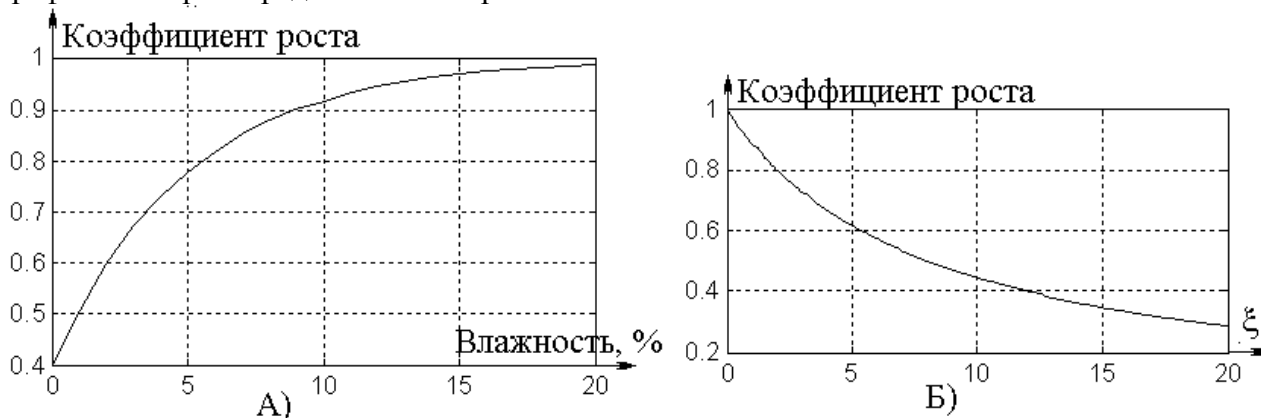


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента роста окатышей:  
 А) – от влажности комкуемой смеси и Б) – от диаметра окатышей

Скорость роста окатышей может быть описана следующим уравнением, учитывающим тот факт, что с увеличением влажности скорость роста окатышей возрастает, но уменьшается с увеличением диаметра:

$$G(c, \xi) = e^{-\alpha\xi} \cdot f(c), \text{ где } f(c) = 1,0 - \lambda e^{-\beta \cdot c} \quad (4)$$

В уравнении (4) (для примера) влажность  $c$  может изменяться от 0 до 20%, а диаметр окатышей  $\xi$  – от 0 до 30...36 мм. Значения коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$  в формуле (4) приняты равными 0,03, 0,2 и 0,6.

Применим уравнение баланса популяции частиц (2) к барабанному гранулятору:

$$\frac{\partial n_k(\xi, t)}{\partial t} = -\frac{\partial G(\xi)n_k(\xi, t)}{\partial \xi} - \dot{n}_{out, k} + \dot{n}_{out, k-1} \quad (5)$$

где  $\dot{n}_{out, k}$  - Поток частиц удаляемых из k-го слоя:  $\dot{n}_{out, k} = Kn_k(\xi, t)$ , где  $K$  – доля окатышей, удаляемых из слоя за секунду. Этот поток делится в свою очередь на  $\dot{n}_{fines}$ ,  $\dot{n}_{prod}$  и  $\dot{n}_{oversize}$ . А  $\dot{n}_{out, k-1}$  - частицы, поступающие в k-ый слой и удаляемые из k-1-го слоя.

Для оценки слагаемых  $\dot{n}_{out, k-1}$  и  $\dot{n}_{out, k}$  в уравнении (5) предположим, что мгновенное распределение окатышей по диаметру (3) характеризуется СКО = 7мм и математическим ожиданием  $M\{\xi\} = 18$ мм. График этого распределения показан на рис. 2. Как следует из рисунка, доля кондиционных окатышей в k-ом слое может быть вычислена для каждого момента времени следующим образом:  $\dot{n}_{prod, k} = T_1(1 - T_2)\dot{n}_{out, k}$ . Аналогично могут быть вычислены  $\dot{n}_{fines, k} = (1 - T_1)\dot{n}_{out, k}$  и  $\dot{n}_{oversize, k} = T_2\dot{n}_{out, k}$ . Функции разделения  $T_1$  и  $T_2$  выглядят следующим образом:  $T_1 = 1(\xi - \xi_{min})$ , а  $T_2 = 1(\xi - \xi_{max})$ .

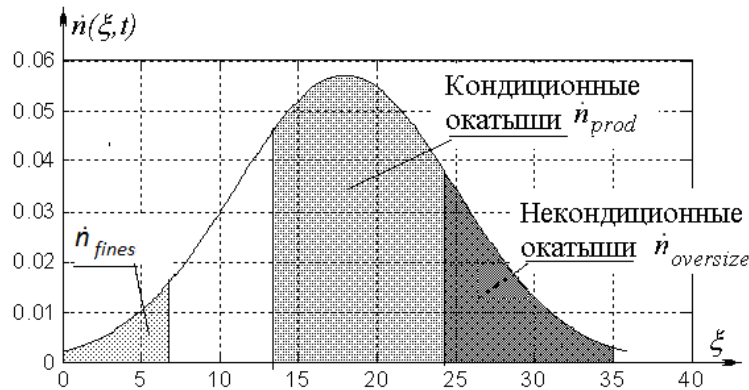


Рисунок 2 – Определение доли кондиционных и некондиционных окатышей

Таким образом, уравнение баланса (2) может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{\partial n_k(\xi, t)}{\partial t} = -\frac{\partial G(\xi, c)n_k(\xi, t)}{\partial \xi} - \dot{n}_{fines, k} - \dot{n}_{prod, k} - \dot{n}_{oversize, k} + Kn_{k-1}(\xi, t) \quad (6)$$

Решение уравнения (6) в значительной степени определяется четырьмя последними слагаемыми в этом уравнении, в каждое из которых входит искомый закон распределения (рис. 2). Для численного решения уравнения (6) следует также учесть тот факт, что математическое ожидание диаметра окатышей зависит от влажности комкуемой смеси, причем эту зависимость (сравни с [1, с. 60]) можно аппроксимировать для  $c = 8...16\%$  следующим образом:

$$M\{\xi\} = D - D/(0,15c) \quad (7)$$

В результате совместного численного решения уравнений (6) и (7) получены следующие законы распределения по диаметру окатышей в зависимости от влажности комкуемой смеси (рис. 3).

С точки зрения теории управления представляет интерес исследование поведения во времени объекта (6) и (7) при изменении влажности. На рис. 4 представлен график изменения во времени СКО диаметра окатышей при изменении влажности от 8% до 12% и от 12% до 8%. Как следует из анализа переходных процессов, объекту управления (5) присуща нелинейная динамика в том смысле, что поведение объекта различно при возрастании и при убывании влажности комкуемой смеси. Это может объясняться следующим: поскольку границы для кондиционных, некондиционных окатышей и границы для диаметра

зародышей и вновь перемолотых некондиционных окатышей остаются неизменными (см. рис. 2), то составляющие в правой части уравнения (6) для законов распределения с различными математическими ожиданиями разные. Это влечет за собой разную начальную скорость изменения закона распределения, что и отражается на переходных процессах.

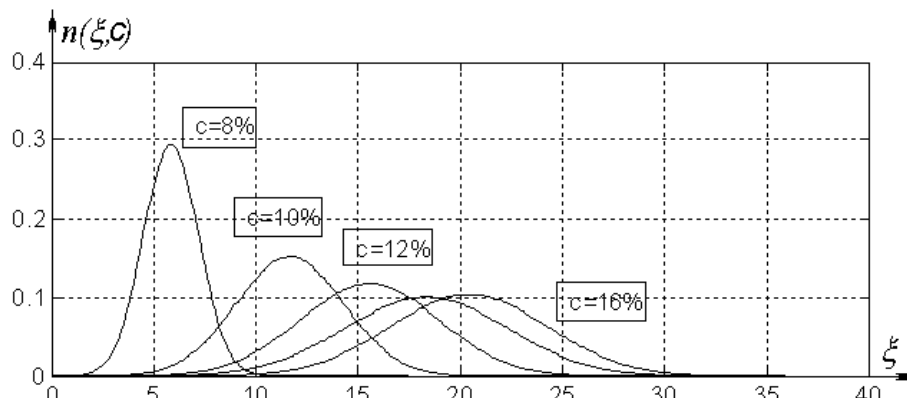


Рисунок 3 – Законы распределения в зависимости от влажности комкуемой смеси

При численном решении уравнения (5) использовались подобранные экспериментальным путем значения различных коэффициентов, так чтобы численные решения не противоречили результатам исследований, представленных в [1]. Исследования ограничивались изучением возможности использовать уравнение материального баланса процесса производства окатышей для задач управления подобно тому, как такие уравнения используют для описания процессов грануляции и кристаллизации.

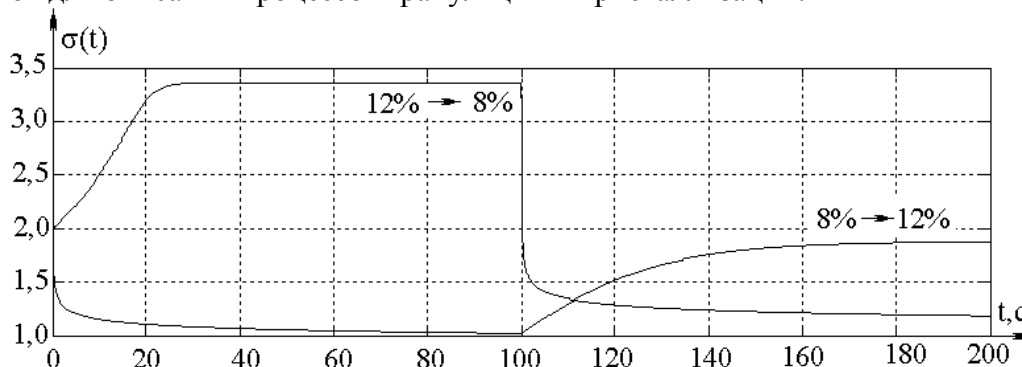


Рисунок 4 – Изменение во времени СКО диаметра окатышей при изменении влажности комкуемой смеси с 8% до 12% и с 12% до 8%

Выводы. Процесс производства окатышей характеризуется целым рядом факторов, определяющих производительность грануляторов и качество сырых окатышей (размер, пористость, прочность). Для описания процесса предложена модель, основанная на использовании закона распределения окатышей по диаметру, в которой за основную управляемую переменную принята влажность комкуемой смеси. По аналогии с данной моделью могут быть построены модели, учитывающие другие факторы, определяющие процесс производства окатышей.

#### Перечень ссылок

1. Маерчак, Ш. Производство окатышей / Ш. Маерчак ; пер. со словац. Т. Григеровой, Я. Григера. – Москва : Металлургия, 1982. – 232 с.
2. Мовчан, А. А. Устойчивость процессов по двум метрикам / А. А. Мовчан // Прикладная математика и механика. – 1960. – т. 24. – С. 988-1001.
3. Palis, S. Diskrepanzbasierte Regelung der kontinuierlichen Kristallisation. Automatisierungstechnik / S. Palis, A. Kienle. – 60 (2012) 3. – Oldenbourg Wissenschaftsverlag. – 2012. – P. 145-154.