

## ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ БАРАБАННОГО ОКОМКОВАТЕЛЯ

*Запорожская государственная инженерная академия*

Виконано аналіз умов руху сипкого матеріалу в поперечному перерізі барабанного гранулятора, що обертається. Показано, що оптимальною умовою взаємодії фракції, яка комкує, та фракції, котра комкується, є кут нахилу сипкого матеріалу, що дорівнює 45 градусів, при цьому кількість матеріалу в агрегаті не повинна перевищувати 10...11 % його об'єму.

Выполнен анализ условий движения сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабанного гранулятора. Показано, что оптимальные условия взаимодействия комкуемой и комкующей фракций наблюдаются при угле подъема сыпучего материала, равном 45 градусов, и количестве материала в агрегате не более 10...11 % его объема.

*Введение.* Качество подготовки железорудного сырья к процессу спекания оказывает значительное влияние, как на качество конечного продукта, так и на экономические показатели самого процесса спекания. Одним из этапов подготовки материала к спеканию является окомкование.

*Анализ достижений.* На протекание процесса окомкования сыпучего материала существенное влияние оказывает соотношение скоростей перемещения его комкующей и комкуемой фракций в поперечном сечении барабанного окомкователя. Траекторию движения сыпучего материала по внутренней поверхности данного агрегата можно разделить на два самостоятельных участка: подъема и скатывания. Скорость движения всех фракций сыпучего материала в поднимающемся потоке практически одинаковая и приближается к окружной скорости вращения внутренней поверхности барабанного окомкователя [1]. Поэтому во время подъема массы сыпучего материала окомкование практически не происходит. При скатывании частиц сыпучего материала происходит его псевдооживление и разделение потока на отдельные фракции в зависимости от их физико-механических характеристик.

Значительная степень разрыхления сыпучего материала не позволяет принимать этот поток сплошным и его следует рассматривать как совокупность отдельных частиц, которые достаточно свободно скатываются. Это позволяет при исследовании движения сыпучего материала на плоскости скатывания использовать результаты моделирования движения отдельной частицы сферической формы [2].

*Постановка задачи.* Задачей исследования является определение факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс окомкования в барабанном окомкователе, а также оптимальных условий работы окомкователя.

*Основная часть исследований.* Отдельная частица материала под действием сил трения увлекается вверх по внутренней поверхности вращающегося барабана окомкователя до наступления состояния равновесия [3]:

$$m \cdot g \cdot \sin \beta_{cp} = f_1^1 \cdot m \cdot \left( \frac{V^2}{R} + g \cdot \sin \beta_{cp} \right), \quad (1)$$

---

© Пазюк Ю.М., 2012

где  $m$  – масса частицы, кг;  $g$  – ускорение свободного падения частицы, м/с<sup>2</sup>;  $\beta_{cp}$  – угол подъема частицы, град;  $f_1^1$  – коэффициент трения частицы о внутреннюю поверхность барабана;  $R$  – радиус барабанного агрегата, м.

При решении уравнение (1) относительно  $\beta_{cp}$ , определяют зависимость, характеризующую взаимосвязь указанного параметра с величинами  $f_1^1$ ,  $V$  и  $R$ :

$$\beta_{cp} = -\arcsin \left( \frac{f_1^1 \cdot V^2}{R \cdot g \cdot (f_1^1 - 1)} \right). \quad (2)$$

Скорости комкуемой и комкующей фракций на этом участке движения материала существенно различаются, что создает условия для перемещения слоя крупных фракций по образуемому слою мелких частиц. Учитывая непрерывность потока движущегося сыпучего материала, можно записать

$$S_n \cdot V_n = S_c \cdot V_c, \quad (3)$$

где  $S_n$ ,  $S_c$  – площадь поперечного сечения поднимающегося и скатывающегося потока материала, м<sup>2</sup>, соответственно;  $V_n$ ,  $V_c$  – средняя скорость подъема и скатывания материала, м/с, соответственно.

Для интенсификации процесса окомкования необходимо создать условия, обес-печивающие максимальное количество контактов между взаимодействующими компонентами сыпучего материала при минимальных ударных нагрузках на отдельные частицы.

Указанные требования выполняются в случае, когда

$$S_n \cdot V_n + S_c \cdot V_c = M, \quad (4)$$

где  $M$  – объем материала, прошедшего через поперечное сечение агрегата за единицу времени, м<sup>3</sup>/с.

Совместное рассмотрение уравнений (3) и (4) показывает, что в процессе активного окомкования в оптимальных условиях может непосредственно участвовать только половина массы материала, находящегося в грануляторе.

Так как площади поперечного сечения неподвижной массы сыпучего материала в грануляторе и его массы, движущейся в режиме переката, практически одинаковы [1], можно сделать вывод, что условия окомкования сыпучего материала, близкие к оптимальным, наблюдаются при равенстве угла подъема его массы  $\beta_{cp}$  половине центрального угла заполнения агрегата  $\beta_0$ , то есть  $2\beta_{cp} = \beta_0$ . При этом необходимо соблюдать ограничение угла наклона плоскости скатывания сыпучего материала величиной угла внутреннего трения  $\alpha_{mp}$  его комкуемой фракции,  $\alpha_1 \leq \alpha_{mp}$ .

Увеличение угла подъема массы сыпучего материала в указанных пределах ( $\alpha_1 \leq \alpha_{mp}$ ) не изменяет соотношения (4), однако длина пути движения отдельных частиц в процессе их скатывания увеличивается, что приводит к возрастанию скорости окомкования сыпучего материала.

При переходе движения сыпучего материала в водопадный режим одновременно с увеличением ударных нагрузок на его отдельные частицы сокращается

длина пути их активного окомкования, что существенно снижает эффективность процесса окомкования.

По мере увеличения угла подъема массы сыпучего материала возрастает длина пути скатывания, на протяжении которого происходит взаимодействие комкуемой фракции с комкующей, в результате чего наблюдается рост гранул, то есть  $N = n \cdot l$ , где  $N$  – общее количество контактов между комкуемой и комкующей фракциями;  $n$  – количество контактов, приходящихся на единицу пути скатывания;  $l$  – длина пути скатывания, м.

Движение сыпучего материала внутри вращающегося гранулятора происходит по криволинейной траектории с постоянным радиусом кривизны (рис. 1). Согласно приведенной схеме, данная траектория с достаточной точностью может быть представлена в виде двух прямолинейных отрезков одинаковой длины, имеющих различные углы наклона плоскостей движения к горизонту. Длина плоскостей движения  $l$  определяется из прямоугольного треугольника  $ABC$ :

$$l = AC = \sqrt{AB^2 + BC^2}, \quad (5)$$

где  $AB = AO \cdot \cos \alpha_4$ ;  $BC = AO \cdot (1 - \sin \alpha_4)$ .

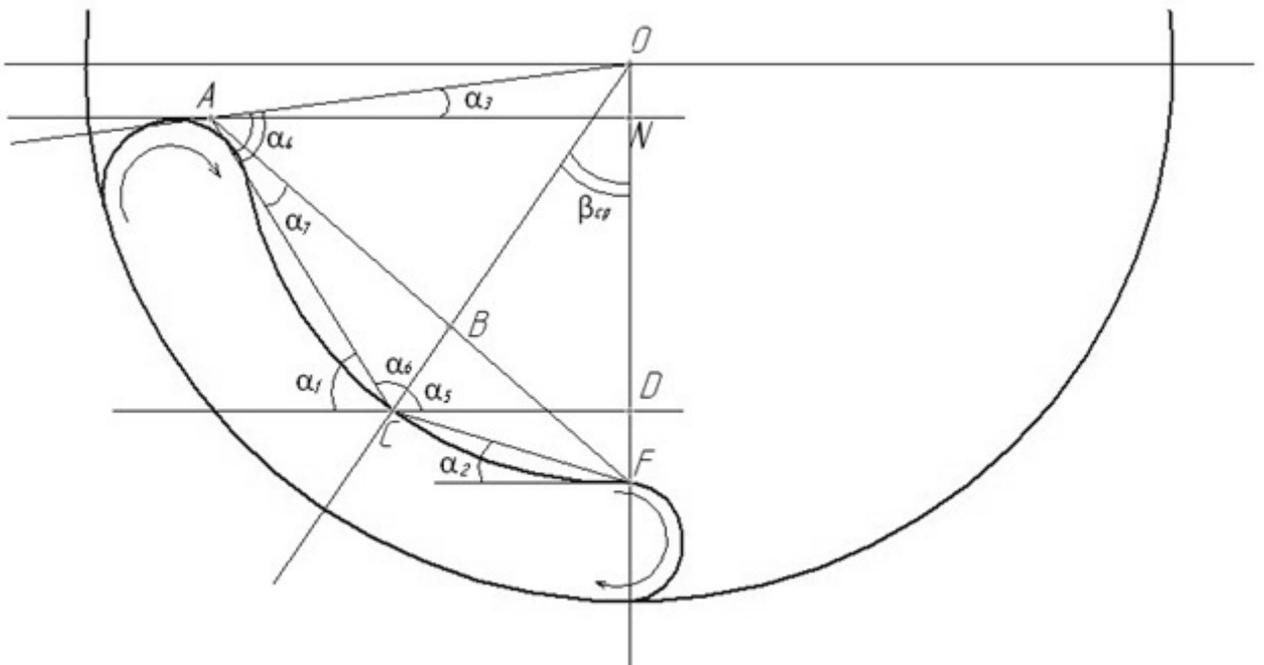
Учитывая, что  $AO = OC$  и представляет собой радиус кривизны траектории движения сыпучего материала ( $R_{кр}$ ), можно записать

$$l = R_{кр} \cdot \sqrt{[\cos(90 - \beta_{cp})]^2 + [1 - \sin(90 - \beta_{cp})]^2}. \quad (6)$$

Угол наклона верхней плоскости движения к горизонту  $\alpha_1$  может быть определен из равенства

$$\alpha_1 = (\alpha_4 - \alpha_3) + \alpha_7, \quad (7)$$

где  $\alpha_3 = 90 - 2\beta_{cp}$ ;  $\alpha_4 = 90 - \beta_{cp}$ ;  $\alpha_7 = \arctg \left[ \frac{1 - \sin(90 - \beta_{cp})}{\cos(90 - \beta_{cp})} \right]$ .



**Рисунок 1** – Движение сыпучего материала внутри вращающегося барабанного гранулятора в режиме переката

Тогда с учетом выражения для углов  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  и  $\alpha_7$  уравнение (7) можно переписать как

$$\alpha_1 = \beta_{cp} + \operatorname{arctg} \left[ \frac{1 - \sin(90 - \beta_{cp})}{\cos(90 - \beta_{cp})} \right] \quad (8)$$

Угол наклона нижней плоскости движения к горизонту  $\alpha_2$  определяют из прямоугольного треугольника  $CDF$ :

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \left( \frac{1 - \cos \beta_{cp}}{\sin \beta_{cp}} \right). \quad (9)$$

По аналогии с химическими реакциями скорость процесса грануляции в целом определяется количеством контактов между комкуемой и комкующей фракциями. Следовательно, максимальную скорость грануляции можно достигнуть при наи-большей разности скоростей движения комкуемой и комкующей фракций сыпучего материала, то есть чем больше разность скоростей, тем большее количество частиц комкующей фракции контактирует в единицу времени с частицами комкуемой части сыпучего материала. Поэтому необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$V_1 - V_2 \Rightarrow \max, \quad (10)$$

где  $V_1$ ,  $V_2$  – скорость скатывания комкующей и комкуемой фракций сыпучего материала, м/с, соответственно.

Полагая в первом приближении, что поверхность скатывания сыпучего материала состоит из двух равных по длине участков с различными углами наклона их плоскостей к горизонту, можно исследовать условия движения по ним отдельной частицы сферической формы. С учетом того, что начальная скорость скатывания частиц сыпучего материала равна нулю, можно записать [2]:

$$V = \sqrt{2g \cdot l \cdot v \cdot (\sin \alpha_i - f_{2i}^1 \cdot \cos \alpha_i)}, \quad (11)$$

где  $V$  – конечная скорость движения частицы по плоскости, м/с;  $l$  – длина плоскости движения, м;  $v$  – коэффициент формы частицы;  $\alpha_i$  – угол наклона плоскости движения к горизонту, град;  $f_{2i}^1$  – коэффициент трения качения частицы по поверхности плоскости движения.

Угол наклона нижнего участка поверхности скатывания  $\alpha_2$ , при движении сыпучего материала в режиме переката, не превышает угол внутреннего трения качения комкующей фракции, поэтому сыпающийся поток движется по нему с отрицательным ускорением. Угол наклона верхнего участка  $\alpha_1$ , даже при небольших величинах  $\beta_{cp}$ , превышает значение угла внутреннего трения качения комкующей фракции сыпучего материала, что обуславливает скатывание частиц вниз по поверхности ската и способствует их окатыванию. При небольших углах подъема массы окомковываемого материала в скатывающемся потоке перемещаются крупные фракции, так как мелкие частицы самостоятельно не могут двигаться в связи с небольшим значением углов наклона поверхности скатывания к горизонту. С увеличением угла подъема массы сыпучего материала, угол наклона

$\alpha_1$  возрастает, что приводит к соответствующему повышению скорости скатывания подвижных фракций. По мере приближения значения угла подъема окомковываемой массы сыпучего материала к  $\beta_{cp} = 45$  град, величина угла наклона поверхности скатывания достигает граничного значения, превышение которого приводит к переходу движения сыпучего материала по поверхности скатывания в режим скольжения с качением. Это обуславливает выравнивание скоростей движения комкуемой и комкующей фракций на участке активного окомкования. Принимая во внимание, что процесс роста гранул происходит при движении крупных фракций по слою мелких частиц, это приводит к уменьшению скорости окомкования сыпучего материала.

Комкуемая фракция сыпучего материала на этом участке изменения угла  $\beta_{cp}$  самостоятельно перемещаться не может и скапливается в верхней части вращающегося потока. Частичное ее перемещение вызвано захватом мелких фракций скатывающимися крупными частицами. С повышением угла подъема массы сыпучего материала  $\beta_{cp}$  длина пути перемещения мелкой фракции увеличивается одновременно с увеличением скорости движения крупной фракции. Область нахождения мелкой фракции во вращающемся потоке сыпучего материала увеличивается. При достижении углом  $\alpha_2$  величины угла внутреннего трения качения комкуемой фракции мелкие частицы начинают самостоятельно двигаться по поверхности скатывания, что вызывает снижение разности скоростей движения комкуемой и комкующей фракций сыпучего материала при одновременном увеличении пути скатывания. Поэтому, хотя максимальная разность скоростей скатывания взаимодействующих фракций сыпучего материала наблюдается при угле наклона плоскости скатывания 57,7 град., оптимальные условия окомкования, с учетом влияния длины участка скатывания, соответствуют углу 67,5 град, обусловленному подъемом массы окомковываемого сыпучего материала на угол  $\beta_{cp} = 45$  град.

$$K_{оком} = \Delta V \cdot l \Rightarrow \max , \quad (12)$$

где  $K_{оком}$  – постоянная окомкования, м<sup>2</sup>/с.

Дальнейшее увеличение угла подъема массы сыпучего материала во вращающемся барабанном грануляторе приводит к резкому снижению величины  $\Delta V$  и, как следствие, к ухудшению условий взаимодействия комкуемой и комкующей фракций. Учитывая, что наиболее эффективный режим переката для окомкования сыпучих материалов сохраняется в диапазоне изменения угла подъема окомковываемой массы 0...45 град, а процесс скатывания крупных гранул комкующей фракции начинается, в среднем, при  $\alpha = \arctg f_{2i}^1$ , то диапазон изменения угла подъема массы окомковываемого материала должен находиться в пределах  $\arctg f_{2i}^1 \leq \alpha_{мек} \leq 45$  град.

Значительное влияние на скорость окомкования оказывает толщина слоев взаимодействующих фракций. Поскольку между собой контактируют только пограничные слои комкуемой и комкующей фракций, то степень окомкования будет увеличиваться при уменьшении толщины их слоев, что может быть достигнуто уменьшением количества сыпучего материала в агрегате или увеличением угла подъема окомковываемой массы.

Путь, который проходят частицы сыпучего материала по плоскости скатывания в режиме переката также определяется количеством материала в агрегате согласно зависимости

$$R_i = R_0 \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{\beta_0}{2}\right) \right), \quad (13)$$

где  $R_i$  – радиус траектории скатывания частиц сыпучего материала, м;  $R_0$  – радиус барабана, м.

Поэтому, увеличение количества сыпучего материала в барабанных грануляторах, при неизменных остальных параметрах процесса окомкования, ухудшает условия накатывания комкуемых фракций на комкующие частицы. С этой точки зрения в данном агрегате целесообразно поддерживать минимальное количество сыпучего материала, обеспечивающее сохранение неразрывности движущегося потока по внутренней поверхности вращающегося агрегата. Анализ результатов эксплуатации отечественных и зарубежных барабанных грануляторов показывает, что оптимальная степень их заполнения должна составлять 3...5 % [4,5].

*Заключение.* Таким образом, анализ условий движения сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабанного гранулятора показывает, что оптимальные условия взаимодействия комкуемой и комкующей фракций наблюдаются при угле подъема массы сыпучего материала, равном 45 град. Для обеспечения участия всей массы сыпучего материала в процессе окомкования необходимо, чтобы количество его в агрегате не превышало 10...11 % заполнения, что соответствует  $\beta_0 = 90$  град. При уменьшении степени заполнения гранулятора условия протекания процесса окомкования улучшаются, ограничивающим условием является обеспечение неразрывности потока сыпучего материала, движущегося в режиме переката.

В современных условиях по техническим причинам нет возможности обеспечить подъем массы сыпучего материала на угол, равный 45 град [4]. Поэтому эффективным методом повышения качества грануляции является работа агрегатов с низкой степенью их заполнения, не превышающей удвоенное значение угла подъема окомковываемой массы во вращающемся агрегате. Также целесообразно, при постоянной производительности барабанных грануляторов, увеличивать их диаметр [5].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротич, В. И.* Теоретические основы окомкования железорудных материалов [Текст] / В. И. Коротич. – М. : Metallurgia. – 1966. – 152 с. – Библиогр. : с. 150-152.
2. *Пазюк, М. Ю.* Особенности формирования слоя полидисперсных сыпучих материалов [Текст] / М. Ю. Пазюк, В. И. Гранковский, Г. В. Туровцев // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 10. – С. 13-16.
3. *Пазюк, М. Ю.* Исследование движения сыпучего материала в поперечном сечении цилиндрического окомкователя [Текст] / М. Ю. Пазюк // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 6. – С. 136-138.
4. Повышение эффективности работы агломашины [Текст] / П. А. Ляхов, Б. И. Колокольцев, В. И. Кренин, А. А. Тищенко // Черная металлургия. – 1980. – № 1. – С. 25-27.

5. Исследование работы барабанного окомкователя [Текст] / *В. И. Гранковский, Ю. М. Зин-ченко, Ю. М. Пазюк, А. Н. Николаенко* // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1979. – № 12. – С. 12-15.

Стаття надійшла до редакції 26.09.2011 р.  
Рецензент, проф. О.Д. Шамровський