

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 622.788.36.012.5(476)(045)

Н.А. Высоцкая¹, В.С. Францкевич², А.А. Дубовский¹, В.В. Салцевич³¹ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,
г. Солигорск, Беларусь²УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь³Филиал БНТУ ОВО «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки
кадров по менеджменту и развитию персонала БНТУ», г. Солигорск, БеларусьГРАНУЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ОКАТЫВАНИЯ
НА ДВИЖУЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация. В статье описано движение частицы во вращающемся барабане. Отмечено, что на перемещение частиц в барабане влияют 3 силы: трения, тяжести и центробежная. Основной динамической характеристикой порошкообразных и гранулируемых материалов является коэффициент внутреннего трения, который характеризуется плотностью укладки, упругими свойствами частиц твердой фазы, формой частиц, размерами, площадью фактических контактов. Немаловажной характеристикой при гранулировании методом окатывания является угол внутреннего трения, зависящий от влагосодержания шихты, гранулометрического состава порошковых материалов и от того, находится ли материал в покое или движении. Движение частиц в барабане зависит от скорости вращения, степени заполнения и состояния внутренней поверхности барабана. При вращении в барабанном грануляторе гранулы внутри потока делятся на поднимающиеся слои и скатывающиеся. При подборе скорости вращения барабанного гранулятора необходимо стремиться к тому, чтобы создавались условия, препятствующие разрушению образовавшихся гранул нужного размера.

Ключевые слова: барабан, вращение, движение, поверхность, скорость, угол, частицы.

N.A. Vysotskaya¹, V.S. Frantskevich², A.A. Dubovsky¹, V.V. Salcevich³¹JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus²Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus³Branch of the BNTU DFE "Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining
on Management and Personnel Development BNTU", Soligorsk, Belarus

PELLETIZING BY ROLLING ON A MOVING SURFACE

Abstract. The article describes the movement of a particle in a rotating drum. It is noted that three forces influence the movement of particles in the drum: friction, gravity and centrifugal. The main dynamic characteristic of powdered and granulated materials is the coefficient of internal friction, which is characterized by packing density, elastic properties of solid phase particles, particle shape, size, actual contact area. An important characteristic of pelletizing by rolling is the angle of internal friction, which depends on the moisture content of the charge, the granulometric composition of powder materials and whether the material is at rest or in motion. The movement of particles in the drum depends on the speed of rotation, the degree of filling and the condition of the inner surface of the drum. When rotating in a drum granulator, the granules inside the flow are divided into rising layers and rolling ones. When selecting the rotation speed of the drum granulator, it is necessary to strive to create conditions that prevent the destruction of the formed granules of the desired size.

Keywords: drum, rotation, movement, surface, speed, angle, particles.

Введение

Во многих отраслях промышленности, в том числе в сельском хозяйстве, широкое применение получили гранулированные материалы [1], [2]. Получение высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур часто возможно лишь при создании оптимальной системы питания растений и, прежде всего, за счет применения удобрений [3]. В настоящее время в химической промышленности получили широкое распространение процессы гранулирования тонкодисперсных порошков методом окатывания в барабанных грануляторах [4].

Основная часть

Числовое значение динамических усилий на гранулу определенного размера зависит от вида ее движения. Частицы, которые находятся внутри вращающегося барабана, прижимаются к поверхности барабана под действием центробежной силы и силы тяжести, отклоняются от вертикали на угол β_d – угол ссыпания (подъема) (рисунок 1). Величина данного угла зависит от коэффициента трения тела о поверхность барабана, от радиуса барабана, а также от скорости вращения барабана. На перемещение частиц в барабане влияют 3 силы: трения, тяжести и центробежная. По достижении максимального угла β_d частица теряет равновесие по отношению к барабану, то есть сдвигающая сила становится больше силы трения, что перемещает частицу вниз.

Сразу исчезает действие центробежной силы на частицу, это приводит к нарушению динамического баланса и уменьшению силы трения. Скатывание частиц со стенок барабана характеризуется ускорением. Так как частица начинает двигаться по криволинейной траектории, центробежная сила возникает снова. Наибольшая скорость достигается, когда силы сдвига и трения уравниваются. Скорость падает, затем при определенном значении угла трения β тело останавливается. Частицы, оставаясь без движения относительно внешней системы координат, будут непрерывно скатываться по внутренней поверхности барабана, такой вид движения – обкатывание. В случае, если частица остановилось после пересечения вертикальной плоскости, то под действием силы тяжести она будет вращаться в ту же сторону, что и барабан. Такое движение будет характеризоваться подъемом-скатыванием.

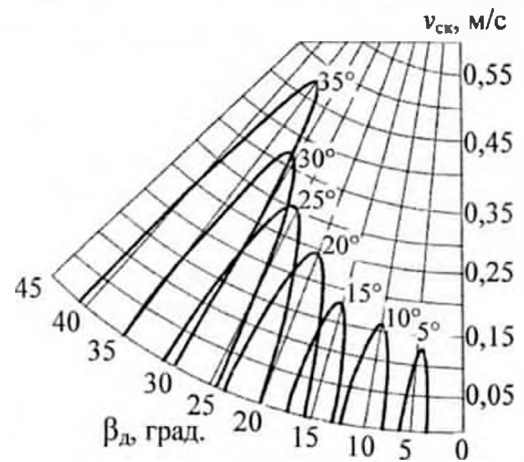


Рисунок 1 – Скорость скатывания частиц, обладающих разным трением, в барабане диаметром 3 м при частоте вращения барабана 10 об/мин

С ростом скорости вращения барабана увеличивается угол ссыпания (подъема). Увеличение происходит с ростом коэффициента трения. Режим обкатывания является основным режимом движения частиц в барабанах небольшого размера. При высоких скоростях вращения барабана наблюдается челночный режим.

Основной динамической характеристикой порошкообразных и гранулируемых материалов является коэффициент внутреннего трения f . Внутреннее трение происходит в слое сыпучего материала и характеризуется плотностью укладки, упругими свойствами частиц твердой фазы, формой частиц, размерами, площадью фактических контактов. Для порошкообразных материалов, между частицами которых существует сцепление, показатель внутреннего трения равен тангенсу угла внутреннего трения:

$$f = \operatorname{tg}\beta.$$

Углом трения называется наименьший угол, при котором частицы под действием силы тяжести начинают двигаться по наклонной поверхности.

При гранулировании методом окатывания в барабанном грануляторе немаловажную роль играет влагосодержание шихты. Увеличение влажности приводит к росту адсорбционных и капиллярных сил связи, а также к увеличению механического сцепления между частицами, что приводит к уменьшению угла внутреннего трения.

Сила капиллярного сцепления в объеме увлажненного сыпучего материала тем ниже, чем из более крупных зерен он состоит. Высокое среднеэффективное расстояние между частицами приводит к понижению прочности сцепления [5].

Также величина коэффициента внутреннего трения может быть выражена уравнением:

$$f = f_{\min} + a \frac{k - k_{\min}}{k_{\max} - k}, \quad (1)$$

где f_{\min} – минимальное значение коэффициента внутреннего трения [6];

a – постоянная;

k_{\min} , k_{\max} – минимальные и максимальные значения коэффициентов плотности укладки частиц сыпучего материала.

Коэффициент внутреннего трения порошковых материалов зависит от их гранулометрического состава. Уменьшение коэффициента внутреннего трения связано с увеличением размера частиц, что приводит к уменьшению числа контактов между ними. Коэффициент внешнего трения сыпучих материалов зависит от того, находится ли материал в покое или движении.

Сыпучесть материалов – способность порошков под действием собственной силы тяжести скатываться с наклонной поверхности, в случае гранулирования методом окатывания в барабанном грануляторе – с изогнутой поверхности. Средний размер частиц сыпучих материалов составляет менее 0,1 мм. Сыпучесть зависит от формы поверхности частиц, плотности, гранулометрического состава и характеризуется углом трения крупы о поверхность барабана и друг о друга.

Сыпучесть порошковой массы зависит от характеристики частиц – размера, формы, состояния поверхности. Сыпучесть ухудшается при увеличении влажности, засоренности. Также сыпучесть порошковых материалов зависит от сцепления частиц и трения между ними.

Коэффициент сыпучести m определяется выражением (2):

$$m = 1 - 2 \cdot \left(\frac{\tau_{\text{сц}}}{\sigma_0} + f \right) (1 + f^2 - f), \quad (2)$$

где $\tau_{\text{сц}}$ – напряжение сцепления;

σ_0 – нормальное напряжение.

Также коэффициент сыпучести можно рассчитать через угол внутреннего трения:

$$m = \frac{1 - \sin \beta}{1 + \sin \beta}.$$

Характер движения частиц в барабане зависит от скорости вращения, степени заполнения и состояния внутренней поверхности барабана. При малой степени заполнения барабана и при относительно небольшой силе трения материала о внутреннюю поверхность барабана сыпучий материал, состоящий из множества отдельно взятых частиц, ведет себя, как сплошное тело, и движется в челночном режиме, но чаще в режиме обкатывания.

В случае режима обкатывания угол подъема центра тяжести загрузки меньше угла естественного откоса (угол, образованный свободной поверхностью рыхлой горной массы или иного сыпучего вещества с горизонтальной плоскостью). При увеличении наклона поверхности загрузки до значения выше, чем угол естественного откоса, избыточный материал начинает осыпаться, стремясь при этом восстановить первоначальный угол. Центр тяжести при этом остается неизменным, вокруг него вращается материал: по свободной поверхности он сыпается вниз, около стенки – поднимается вверх. Отличительная черта движения в режиме переката – отсутствие у частиц параболического участка траектории, таким образом, после кругового участка пути частицы сразу переходят на участок ссыпания.

При гранулировании наиболее практичным является режим переката, при котором основная масса сыпучего материала перемещается, описывая круги, со скоростью, равной угловой скорости вращения барабана, в котором происходит процесс гранулирования или смешивания. По достижении наивысшей точки слой материала определенной толщины осыпается вниз. Нижние слои переходят на круговые траектории, расположенные ближе к центру барабана, а верхние слои переходят на траектории большего радиуса. Далее картина повторяется: то есть каждый элементарный слой вращается вокруг неподвижной точки. Совокупность этих точек образует линию раздела поднимающегося и скатывающегося слоев.

Числовые значения линейных скоростей определяются силами трения слоев материала друг о друга и скоростью вращения барабана. Чем больший коэффициент трения имеет частица, тем быстрее она теряет свою скорость при ссыпании. В процессе окатывания немаловажную роль имеет толщина слоя ссыпающегося материала. Вблизи линии раздела зон подъема и скатывания образуется скопление мелких фракций.

Коэффициент ψ , отражающий отношение количества поднимающегося сыпучего материала $G_{\text{под}}$ к общему количеству материала $G_{\text{об}}$, зависящий от параметров вращения барабана, определяется формулой (3):

$$\psi = \frac{G_{\text{под}}}{G_{\text{об}}} = f\left(\frac{\omega^2 R}{g}\right), \quad (3)$$

где ω – угловая скорость вращения барабана;

R – радиус барабана;

g – ускорение свободного падения.

Толщина ссыпающегося слоя характеризуется коэффициентом заполнения. Гранулы, находящиеся внутри потока и соприкасающиеся с поднимающимся слоем, подвергаются большим динамическим нагрузкам, нежели гранулы, скатывающиеся из верхней части потока. Толщина скатывающегося слоя влияет на гранулометрический состав продукта окатывания. Коэффициент заполнения при этом должен быть оптимальным для требуемого гранулометрического состава и должен составлять не более 25 %. Для каждого случая коэффициент заполнения находится индивидуально.

Верхний угол загрузки φ зависит от угла ссыпания β_d и определяется по следующей формуле:

$$\varphi = 180^\circ - 2\beta_d$$

Угол β_d определяется углом естественного откоса и зависит от скорости вращения барабана. Он увеличивается с увеличением степени заполнения барабана. Как показывает практика, угол β_d на $10\text{-}25^\circ$ больше угла естественного откоса. С увеличением скорости вращения барабана, увеличивается угол ссыпания β_d , при этом уменьшается предельная степень заполнения барабана.

Начало водопадного режима характеризуется равенством углов подъема верхнего края загрузки и отрыва материала от поверхности барабана в случаях, когда верхняя часть загрузки поднимается на угол более 90° , при небольших степенях заполнения. При таких условиях, по формуле (4) можно найти критическую скорость вращения, которая определяет границу между режимами переката и водопадным:

$$v_{кр} = 30 \sqrt{\frac{-\cos \beta_d + \frac{\varphi}{2}}{R}}. \quad (4)$$

Скорости скатывания частиц не должны превышать скорости, при которых происходит разрушение в процессе окатывания, а энергия, переданная от одной гранулы другой в момент столкновения, не должна превышать работу разрушения. Для последнего условия получена формула (5) по определению допустимой скорости скатывания гранул:

$$|v_{ск}| = (0,23 - 0,32) \sqrt{\frac{g\sigma}{\gamma}}, \quad (5)$$

где σ – допустимое напряжение в грануле;
 γ – удельный вес материала.

Скорость скатывания материала в барабанном грануляторе характеризуется параметрами: насышной плотностью материала $\rho_{нас}$, коэффициентом внутреннего трения материала f , углом подъема (ссыпания) засыпки β_d , радиусом барабана R , расстоянием от центра барабана до скатывающего слоя R_0 , толщиной скатывающегося слоя $h_{ск}$, предельным напряжением сдвига τ . Учитывая данные параметры, получена формула (6) для определения скорости скатывания материала:

$$v_{ск} = \frac{\rho_{нас} g}{f} \sin \beta_d \left(\frac{(R_0 + h_{ск} - R)^2}{2} - R_0 (R_0 + h_{ск} - R) \right) - \frac{\tau}{f} (R_0 - R). \quad (6)$$

Из условия непрерывности потока: количество поднимающегося слоя материала равно количеству скатывающегося. Чем больше материала скатывается, тем больше время скатывания и, соответственно, скорость скатывания меньше. Путь скатывания равен хорде, проведенной между крайними точками засыпки, отсюда получаем выражение (7):

$$\frac{t_{под}}{t_{ск}} = \frac{v_{ск} S_{под}}{S_{ск} v_{под}} = \frac{G_{под}}{G_{ск}} = \frac{\psi}{1 - \psi};$$

$$\frac{v_{ск}}{v_{под}} = \frac{\psi}{1 - \psi} \frac{2R \sin(\varphi/2)}{R\varphi} = \frac{2\psi \sin(\varphi/2)}{(1 - \psi)\varphi}, \quad (7)$$

где $t_{ск}$, $t_{под}$ – время скатывания и подъема, соответственно;
 $S_{ск}$, $S_{под}$ – путь, проходимый гранулой при скатывании либо подъеме;
 ψ – коэффициент, отражающий отношение количества поднимающегося сыпучего материала к общему количеству материала в барабане: $\psi = 0,55-0,6$.

Скорость подъема материала характеризуется параметрами движения барабана. В случае, когда проскальзывания материала возле стенки нет, скорость подъема частиц, расположенных между стенкой барабана и линией, разграничивающей поднимающийся и скатывающийся слой, определяется выражением [7], [8]:

$$v_{\text{под}} = \frac{\omega R}{2}$$

Средняя скорость скатывания в поперечном сечении барабана вычисляется по формуле (8):

$$v_{\text{ск}} = \frac{R\omega\psi \sin(\varphi/2)}{(1-\psi)\varphi} \quad (8)$$

Практика показывает, что данная формула дает заниженные результаты, это связано с тем, что скатывание происходит не по плоскости, а по изогнутой поверхности барабана.

Выводы

Процесс гранулирования сложно-смешанных минеральных удобрений на сегодняшний день еще недостаточно изучен и имеет ряд несовершенств. Для решения данной проблемы требуется детальное изучение процесса на каждом его этапе [9].

При подборе скорости вращения барабанного гранулятора необходимо стремиться к тому, чтобы создавались условия, препятствующие разрушению образовавшихся гранул нужного размера.

Повышенная влажность приводит к слеживанию. Слеживаемость – потеря сыпучести гранулированных и порошкообразных материалов и их переход в комкообразное состояние [10].

Список использованных источников

1. Прушак В.Я., Кондратчик Н.Ю., Высоцкая Н.А. Разработка новых технических решений по увеличению выпуска гранулированного хлорида калия с применением валковых прессов, изготавливаемых в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» // Труды БГТУ. – 2020. – Серия 2, № 1. – С. 62-67.
2. Высоцкая Н.А., Францкевич В.С. Особенности получения NPK-удобрений методом окатывания // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 79-85.
3. Леонов Ф.Н., Синевич Т.Г. Эффективность минеральных удобрений в зависимости от обеспеченности подвижными фосфатами дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // Почвоведение и агрохимия. – 2017. – № 1 (58). – С. 109-116.
4. Высоцкая Н.А., Францкевич В.С. Влияние влагосодержания шихты на качественные характеристики гранул комплексных удобрений // Материалы докладов 85-ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). – Минск, БГТУ. – 2021. – С. 70-72.
5. Высоцкая Н.А., Францкевич В.С. Влагосодержание шихты комплексных удобрений // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 1. – С. 63-70.
6. Волошин Е.В. Элеваторы и склады: методические указания. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 53 с.
7. Движение материала при окатывании в барабане [Электронный ресурс]. – URL: <https://helpiks.org/5-14939.html> (дата обращения 24.01.2023).
8. Движение материала в грануляторах окатывания [Электронный ресурс]. – URL: <https://msd.com.ua/poluchenie-kompozicionnyh-granulirovannyh-materialov-v-planetanom-granulyatore/dvizhenie-materiala-v-granulyatorax-okatyvaniya> (дата обращения 24.01.2023).
9. Высоцкая Н.А., Францкевич В.С. Получение NPK-удобрений методом окатывания // Материалы III Междунар. науч.-технич. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке / БГТУ, г. Минск, (2-3 декабря 2020). – Минск, 2020. – С. 212-215.
10. Высоцкая Н.А. Основные физико-химические и структурно-механические свойства гранулированных минеральных удобрений // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 3. – С. 59-65.

Информация об авторах**Information about the authors**

Надежда Александровна Высоцкая – аспирант УО «Белорусский государственный технологический университет», начальник отдела научно-технической информации, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: onti@sipr.by.

Nadejda Aleksandrovna Vysotskaya – Postgraduate Student, Belarusian State Technological University, Head of the Department of Scientific and Technical Information, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: onti@sipr.by.

Виталий Станиславович Францкевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических и силикатных производств», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: fvs2@tut.by.

Vitali Stanislavovich Frantskevich – Ph. D. (Engineering), Head of the Department “Machines and Apparatuses of Chemical and Silicate Production”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: fvs2@tut.by.

Александр Александрович Дубовский – аспирант Белорусского национального технического университета, начальник бюро комплектации литья и поковок отдела материально-технического снабжения, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

Aleksandr Aleksandrovich Dubovsky – Postgraduate Student, Belarusian National Technical University, Head of the Casting and Forging Procurement Bureau, Material Procurement Department, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Вероника Викторовна Салцевич – магистрант Белорусского национального технического университета, заведующая филиалом БНТУ ОВО «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала БНТУ» (ул. Козлова, 31, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: salcevich@mipk.by.

Veronica Victorovna Salcevich – Master’s Student Belarusian National Technical University, Head of the Branch of the BNTU DFE “Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development BNTU” (31, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: salcevich@mipk.by.

Поступила в редакцию 27.01.2023 г.