

МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Ханин С. И., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ В КОНУСООБРАЗНОМ КОРПУСЕ ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ

dh@intbel.ru

Предложено математическое описание процесса движения мелющих тел в конусообразном корпусе ШБМ, описаны механизм и особенности их распределения по крупности в продольном направлении корпуса.

Ключевые слова: шаровая барабанная мельница, конусообразный корпус, мелющее тело, продольная сегрегация.

Шаровые барабанные мельницы (ШБМ) получили достаточно широкое распространение в промышленности строительных материалов для помола различных материалов. Многообразие свойств измельчаемых материалов способствовало распространению на предприятиях мельниц, различающихся формой корпуса, типом его бронефутеровки. Конструкциями внутримельничных устройств. По сведению авторов [1, 2] использование ШБМ с конусообразными формами барабана или его бронефутеровки позволяет обеспечить распределение мелющих тел (м.т.) по их крупности в направлении от загрузочной части к разгрузочной и повысить эффективность процесса измельчения материала. Однако, определение рациональных значений конструктивно-технологических параметров ШБМ с конусообразным барабаном осуществляется преимущественно экспериментальным путем.

$$(x_{i0} + V_{ix0} \cdot t)^2 + \left(y_{i0} + V_{iy0} \cdot t - \frac{gt^2}{2} \right)^2 = \left(D_{1m}/2 - tg\psi_m \cdot (z_{i0} + V_{iz0} \cdot t) - r_{si}/\cos\psi_m \right)^2, \quad (2)$$

где x_i', y_i' - координаты центров масс м.т. в начальный период времени; V_{xi}', V_{yi}' - проекции вектора скорости на оси координат в начальный период времени; t - время движения до соударения с конусообразным барабаном; r_{si} - радиус шара; D_{1m} - диаметр основания конуса, в плоскости начала координат; ψ_m - угол наклона образующей конуса.

Время движения i -го шара до соударения о j -ый (t_{sij}):

$$At_{sij}^2 + Bt_{sij} + C = 0, \quad (3)$$

где:

$$\begin{aligned} A &= (V_{ix0} - V_{jx0})^2 + (V_{iy0} - V_{jy0})^2 + (V_{iz0} - V_{jz0})^2, \\ B &= (x_{i0} - x_{j0})(V_{ix0} - V_{jx0}) + (y_{i0} - y_{j0})(V_{iy0} - V_{jy0}) + (z_{i0} - z_{j0})(V_{iz0} - V_{jz0}), \\ C &= (x_{i0} - x_{j0})^2 + (y_{i0} - y_{j0})^2 + (z_{i0} - z_{j0})^2 - (r_{si0} + r_{sj0})^2. \end{aligned}$$

Рассмотрим процесс движения каждого м.т., находящегося в корпусе ШБМ как испытывающего последовательность соударений с футеровкой корпуса мельницы и другими м.т. В промежутках времени между соударениями м.т. движутся по параболическим траекториям только под действием силы тяжести. Соударения м.т. представляются как мгновенные изменения их скоростей. Движение центра масс каждого шара описывается известным уравнением:

$$\vec{r}_i = \vec{r}_{i0} + \vec{V}_{i0} \cdot t + \frac{\vec{g}t^2}{2}, \quad (1)$$

где \vec{g} - вектор ускорения свободного падения; t - время движения.

Найдем время, через которое произойдет ближайший удар i -го шара о футеровку, либо о j -ый шар. Время движения шара до удара о футеровку конусообразного барабана определяется выражением:

После определения времен ударов для всех шаров, определяем из них минимальное и для данного шара рассчитываем послеударные скорости в соответствии с теоремой об изменении количества движения и момента количества движения. При ударе шара в любой точке барабана мельницы ударные импульсы определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} S_n = -(1+k) \cdot m \cdot V_{0n} \\ S_\tau = \frac{-V_{0\tau} - r_{si}\omega_{0b} + \omega_0(x_s\tau_y - y_s\tau_x)}{\frac{7}{2} \cdot \frac{1}{m} - \frac{(x_s\tau_y - y_s\tau_x)^2}{I_z}}, \end{cases} \quad (4)$$

где S_n, S_τ - импульсы нормального и касательно-го взаимодействия, I_z - момент инерции корпуса, m - масса м.т., ω_0 - угловая скорость вращения барабана до удара, $V_{0\tau}, V_{0b}$ - проекции линей-

ной скорости центра масс м.т. до удара, $\omega_{об}$ – проекция угловой скорости вращения м.т. до удара, x_s, y_s – координаты точки удара, k – коэффициент восстановления неупругого удара.

Используя S_n и S_t , находим послеударные скорости м.т. и корпуса, затем по формулам (2) и (3) для м.т., участвовавших в соударении, снова находим время движения. Выбираем минимальное, тем самым определив объекты удара, вычисляем ударное взаимодействие и далее повторяем процедуру. Таким образом, мы получаем модель контактного взаимодействия м.т. в конусообразном корпусе. С ее помощью определим кинематические параметры м.т. в корпусе. Зная размеры, координаты центров масс, направления векторов скоростей и их величины для всех шаров, рассмотрим процесс их движения в конусообразном корпусе $D=0,45$ м.

Рассмотрим механизм распределения м.т. по их крупности в корпусе ШБМ с конусообразным барабаном. Режим движения м.т. в поперечном сечении барабана изменяется, по мере удаления от большего торцевого днища, от водопадного до смешанного, а затем и каскадного. В областях с водопадным и смешанным движением мелкие м.т. в поперечных сечениях барабана преимущественно выходят на внешние траектории движения, а крупные перемещаются на внутренние. При достижении точек отрыва мелких м.т. от внутренней поверхности барабана, они имеют возможность перемещаться не только поперечно, но и продольно, по образуемому откосу м.т. в направлении от большего торцевого днища к меньшему (линия AD рис.1). Эти условия обеспечивают перемещение мелких м.т. к меньшему торцевому днищу. Образование откоса мелющей загрузки обусловлено тем, что м.т., находящиеся у большего торцевого днища, прижимаются к нему, получают большее количество энергии, чем удаленные и поднимаются на большую высоту. У меньшего торцевого днища и расположенной у него области, м.т. движутся в каскадном режиме, что способствует выходу на внешние траектории движения крупных м.т. и перемещению мелких на внутренние. Крупные м.т. свободнее, чем мелкие скатываются по поверхности откоса мелющей загрузки и концентрируются в зоне «пяты». Мелкие м.т. задерживаются в верхней части откоса, затем накрываются более крупными и перемещаются в «приближенные» слои мелющей загрузки. Конусообразная форма барабана способствует перемещению находящихся в зоне «пяты» круп-

ных м.т. в направлении к большему торцевому днищу (линия EB рис.1).

Перемещение крупных м.т. в корпусе с конусообразным барабаном от меньшего торцевого днища к большему в нижней области мелющей загрузки и обратное перемещение мелких м.т. в ее верхней области обеспечивают распределение м.т. от крупных у большего торцевого днища к мелким у меньшего. Сегрегация м.т. по их крупности подтверждена в результате физического эксперимента на мельнице с конусообразным корпусом $D=0,45$ м и в работе [2].

Для оценки степени объединения м.т. по их размерам предлагается использовать коэффициент сегрегации ζ , значение которого примем равным тангенсу угла наклона к оси абсцисс прямой, аппроксимирующей методом наименьших квадратов набор точек, отображающих положения центров масс и размеры м.т.:

$$\zeta = \frac{N \sum_{i=1}^N r_{si} X_i - \sum_{i=1}^N r_{si} \sum_{i=1}^N X_i}{N \sum_{i=1}^N r_{si}^2 - \left(\sum_{i=1}^N r_{si} \right)^2}, \quad (5)$$

где N – количество м.т., r_{si} – радиус i -го шара, X_i – величина, характеризующая положение м.т. (координата зц.м. м.т.).

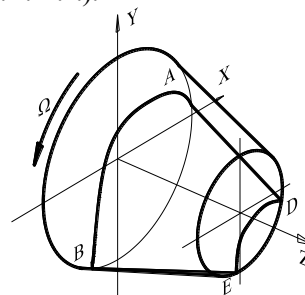


Рис. 1. Схема перемещения м.т. в корпусе ШБМ с конусообразным барабаном

Для исследования зависимости $\xi_{пр}$ от конструктивно-технологических параметров конусообразного барабана с $D = 0,45$ м на ПЭВМ был проведен численный эксперимент по плану ПФЭ ЦКОП2⁴ с использованием разработанного математического описания процесса движения м.т. В качестве параметров, влияющих на $\xi_{пр}$ были приняты угол наклона образующей барабана $\theta(X_1)$, коэффициент загрузки м.т. $\varphi(X_2)$, относительная частота вращения барабана $\psi(X_3)$, длина камеры конусообразного барабана $L(X_4)$. Значения $\xi_{пр}$ рассчитывались для каждого из опытов по полученным распределениям м.т. в барабане. Полученное по результатам эксперимента уравнение в кодированной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} \xi_{пр} = & -0,3845 - 0,0289X_1 + 0,1104X_1^2 + 0,0138X_2 + 0,0160X_2^2 - \\ & 0,0016X_3 - 0,0093X_3^2 - 0,0695X_4 + 0,0699X_4^2 - \\ & 0,0269X_1X_2 + 0,0346X_1X_3 + 0,0096X_1X_4 - 0,0101X_2X_3 - 0,0083X_2X_4 - 0,0329X_3X_4. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение в натуральном виде:

$$\begin{aligned} \xi_{\text{сп}} = & 0,5421 - 0,0791\theta + 0,0022\theta^2 + 0,0533\varphi + 3,1990\varphi^2 + 0,8433\psi - \\ & 0,2975\psi^2 - 3,2991L + 6,2114L^2 + 0,01280L - \\ & 0,05380\theta\varphi + 0,02760\theta\psi + 0,01280L - 0,8078\theta\varphi\psi - 1,1063\varphi L - 1,7541\psi L. \end{aligned} \quad (7)$$

Графические зависимости $\xi_{\text{сп}}$ от конструктивно-технологических параметров приведены на рис. 2. Изменение угла наклона образующей θ оказывает значительное влияние на величину $\xi_{\text{сп}}$. Изменение $\xi_{\text{сп}}$ при рассматриваемых диапазонах значений исследуемых факторов наблюдается в достаточно широкой области его значений. Так, при $\theta = 25^\circ$; $\varphi = 0,2$; $\psi = \psi_{\text{кр}}$; $L = 0,18$ м значение $\xi_{\text{сп}} = 0,198$; при $\theta = 15^\circ$; $\varphi = 0,2$; $\psi = 0,5\psi_{\text{кр}}$; $L = 0,48$ м значение $\xi_{\text{сп}} = -0,285$. При увеличении θ от 5° до близких к 15° происходит уменьшение $\xi_{\text{сп}}$, дальнейшее увеличение θ до 25° приводит к росту значений $\xi_{\text{сп}}$. Так, при значениях исследуемых факторов $\varphi = 0,3$; $\psi = 0,75\psi_{\text{кр}}$; $L = 0,33$ м и $\theta_1 = 5^\circ$; $\theta_2 = 15^\circ$; $\theta_3 = 25^\circ$ коэффициент продольной сегрегации соответственно принимает значения $\xi_{\text{сп}1} = -0,123$; $\xi_{\text{сп}2} = -0,384$; $\xi_{\text{сп}3} = -0,205$. Уменьшение $\xi_{\text{сп}}$ при увеличении θ в диапазоне значений от 5° до 15° обусловлено выделением в области большего днища мелких м.т. на внешние траектории их движения (в поперечном направлении) и их перемещением в направлении к меньшему днищу (продольном) в области верхней части контура мелющей загрузки. Большая часть из переместившихся мелких м.т. остается в области меньшего днища, а меньшая часть перемещается в обратном направлении (к большему днищу) в области нижней части контура мелющей загрузки. Процесс перемещения мелких м.т. в продольном направлении (прямом и обратном) происходит непрерывно, что не позволяет достичь $\xi_{\text{сп}}$ значений, близких к -1. Использование модуля визуализации наглядно это подтверждает.

Дальнейший рост $\xi_{\text{сп}}$ при увеличении θ от значений, близких к 15° , до 25° обусловлен тем, что уменьшение острого угла между образующей конусообразного барабана и большим днищем становится настолько значительным, что находящиеся в области днища м.т., при увеличившемся по интенсивности воздействию на них расположенных рядом м.т., взаимодействуют с днищем, получают большие по величине составляющие продольных скоростей и поднимаются на большую высоту. Перемещение в продольном направлении (как прямом, так и обратном) вышедших у днища на внешние траектории движения мелких м.т. интенсифицируется, увеличивается их количество. Перемещение мелких м.т. в направлении от большего днища к меньшему осуществляется в верхнем контуре мелющей загрузки, в обратном направлении – в нижнем. Указанные особенности движения мелких

м.т. приводят к увеличению $\xi_{\text{сп}}$ при повышении θ до значений, превышающих по величине близкие к 15° .

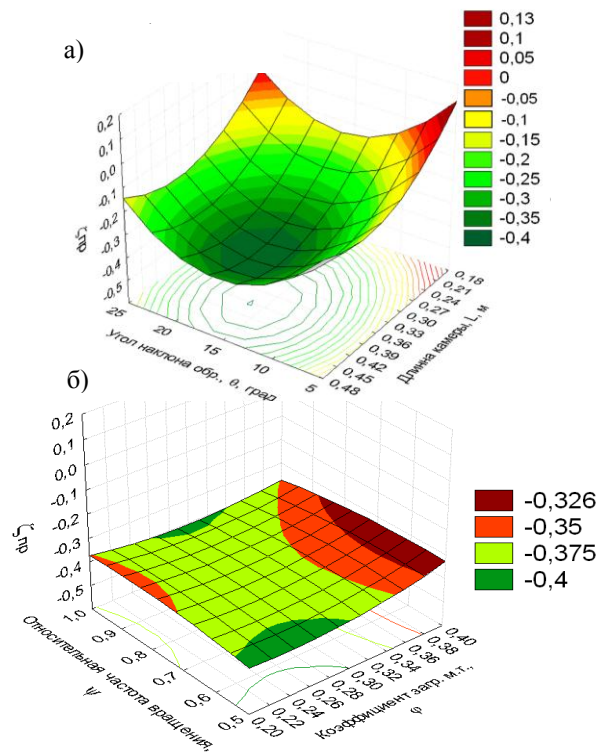


Рис. 2. Зависимости $\xi_{\text{сп}}$ м.т. в конусообразном барабане с $D = 0,45$ м от: а) от θ и L при $\varphi = 0,3$; $\psi = 0,75\psi_{\text{кр}}$; б) от φ и ψ при $\theta = 15^\circ$; $L = 0,33$ м

В уравнении (6) квадратичный коэффициент при X_2 имеет небольшую величину и зависимость $\xi_{\text{сп}}$ от φ имеет характер, близкий линейному. Увеличение φ при небольших значениях угла θ приводит к увеличению $\xi_{\text{сп}}$; при значениях θ близких к 15° и превышающих его, изменение $\xi_{\text{сп}}$ незначительно. Так, при $\theta = 5^\circ$; $\psi = 0,75\psi_{\text{кр}}$; $L = 0,33$ м изменение φ от 0,2 до 0,4 приводит к увеличению $\xi_{\text{сп}}$ соответственно от -0,164 до -0,018. При $\theta = 20^\circ$; $\psi = 0,75\psi_{\text{кр}}$; $L = 0,33$ м изменение φ в диапазоне от 0,2 до 0,4 приводит к изменению $\xi_{\text{сп}}$ соответственно от -0,31 до -0,325. Увеличение ψ при небольших значениях θ приводит к уменьшению $\xi_{\text{сп}}$ в область его отрицательных значений. При θ близких к 0° (угол между образующей конусообразного барабана и большим днищем близок к 90°) и малых (в рассматриваемом диапазоне значений) ψ воздействие на расположенные у днища м.т., со стороны расположенных рядом с ними м.т., недостаточно для обеспечения полного выхода из их среды мелких м.т. на внешние траектории. Изменение ψ при значениях θ близких к 15° не приводит к существенным изменениям $\xi_{\text{сп}}$. Уве-

личение ψ при значениях θ превышающих близкие к 15° способствует получению мелким м.т., расположенным у большего днища и вышедшим на внешние траектории их движения в верхней части контура мелющей загрузки, больших по величине составляющих продольных скоростей. Это увеличивает количество мелких м.т., движущихся в верхней части контура мелющей загрузки в направлении к меньшему днищу и движущихся в обратном направлении в нижней части контура мелющей загрузки, что приводит к ухудшению продольной сегрегации м.т. и повышению $\xi_{\text{пр}}$. Так, при $\theta = 5^\circ$, $\varphi = 0,3$ и $L = 0,33$ м увеличение ψ от $0,5\psi_{\text{кр}}$ до $\psi_{\text{кр}}$ приводит к уменьшению значений $\xi_{\text{пр}}$ от $-0,07$ до $-0,213$. При $\theta = 15^\circ$, указанных значениях φ , L и ψ происходит уменьшение $\xi_{\text{пр}}$ соответственно от $-0,4$ до $-0,405$. Увеличение ψ в пределах диапазона варьирования ее значений при $\theta = 25^\circ$ приводит к увеличению значений $\xi_{\text{пр}}$ от $-0,29$ до $-0,156$.

Увеличение L приводит к уменьшению $\xi_{\text{пр}}$ в область его отрицательных значений, улучшает сегрегацию м.т. от крупных к мелким в направлении от большего торцевого днища к меньшему при изменениях, исследуемых факторов на всех рассматриваемых диапазонах их варьирования. Как указывалось ранее, при описании механизма продольной сегрегации, характер изменения $\xi_{\text{пр}}$ от L обусловлен различием в воздей-

ствии большего и меньшего торцевых днищ на мелющую загрузку.

При варьировании факторов в исследуемых областях диапазон изменения значений $\xi_{\text{пр}}$ достаточно большой – от максимального значения $\xi_{\text{пр}} = 0,265$ при $\theta = 5^\circ$; $\varphi = 0,4$; $\psi = 0,57\psi_{\text{кр}}$; $L = 0,18$ м, до минимального $\xi_{\text{пр}} = -0,46$ при $\theta = 14,22^\circ$; $\varphi = 0,31$; $\psi = \psi_{\text{кр}}$; $L = 0,42$ м. Для значений $\psi = 0,76\psi_{\text{кр}}$, используемых при эксплуатации промышленных ШБМ, максимально возможно распределение м.т. по их крупности характеризуется значением $\xi_{\text{пр}} = -0,405$, получаемым при $\theta = 15,52^\circ$; $\varphi = 0,284$; $L = 0,382$ м.

Проведенные исследования по изменению $\xi_{\text{пр}}$ подтверждают рассмотренное описание механизма продольной сегрегации м.т. по их крупности в корпусе с конусообразным барабаном.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалюх С.И. Углеразмольная трубно-конусная мельница нового поколения/ С.В. Ковалюх// Теплоэнергетика. – 2001. - №1. – с.62-68.
2. Крыхтин Г.С. Работа мелющих тел в мельнице с сортирующей бронифутеровкой/ Г.С. Крыхтин // Труды НИИЦЕМЕНТА – 1960. – вып.13 – с. 94-111.