

Ханин С. И., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ
В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОРПУСЕ ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

dh@intbel.ru

Исследован процесс движения мелющих тел в цилиндрическом корпусе ШБМ, установлены закономерности изменения их кинематических и динамических характеристик.

Ключевые слова: шаровая барабанная мельница, цилиндрический корпус, мелющее тело, процесс движения, скорость, кинетическая энергия.

Процесс движения мелющих тел (м.т.) в корпусе шаровой барабанной мельницы (ШБМ) преимущественно формирует процессы измельчения и движения находящегося в нём материала. Изучение поведения отдельных м.т., их совокупности; взаимодействия друг с другом, с барабаном, днищами помогает понять процессы, происходящие в корпусе, определить рациональные области значений конструктивно-технологических параметров, влияющих на состояние мелющей среды.

Рассмотрим процесс движения м.т. как последовательность соударений друг с другом,

$$x_i^2 + y_i^2 = (R - r_{si})^2; |\vec{r}_i - \vec{r}_j| = \sqrt{r_{si}^2 + r_{sj}^2}; z_i = r_{si}; z_j = L - r_{sj}, \tag{1}$$

где \vec{r}_i, \vec{r}_j - радиус-векторы центров масс i-го и j-го шаров, x_i, y_i, z_i - проекции вектора \vec{r}_i на оси неподвижной системы координат, r_{si}, r_{sj} - радиусы i-го и j-го шара соответственно, R - радиус барабана мельницы, L - длина камеры мельницы.

Получены выражения, позволяющие рассчитывать импульс взаимодействия при ударе шара в любой точке корпуса мельницы, с любым направлением вектора нормали локальной си-

футеровкой барабана, днищ мельницы [1,2]. В промежутках времени между соударениями их движение будет осуществляться по параболическим траекториям только под действием силы тяжести. Соударения представляются как мгновенные изменения скоростей мелющих тел. Тогда уравнение для нахождения времени, через которое произойдет ближайший удар i-го шара о j-ый шар, либо о футеровку барабана или одного из торцевых днищ мельницы имеет следующий вид:

стемы координат. В зависимости от местоположения удара и скорости шара в момент удара, изменяются лишь координаты точки удара (x_s и y_s) и проекции единичных векторов локальной системы координат ($n_x, n_y, n_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z, b_x, b_y, b_z$).

$$S_n = \frac{-(1+k)(V_{i0n} - \Omega_0(x_s \cdot n_y - y_s \cdot n_x))}{\frac{1}{m_i} - \frac{(x_s n_y - y_s n_x)^2}{I_z} - \eta \frac{(x_s \tau_y - y_s \tau_x)}{I_z} (x_s \cdot n_y - y_s \cdot n_x)} \tag{2}$$

$$S_\tau = \eta \cdot S_n \tag{3}$$

$$\eta = \min \left\{ f, \frac{V_\tau \left[\frac{1}{m_i} - \frac{(x_s n_y - y_s n_x)^2}{I_z} \right] + V_n \left[\frac{(x_s n_y - y_s n_x)}{I_z} (x_s \cdot \tau_y - y_s \cdot \tau_x) \right]}{V_n \left[\frac{7}{2} \cdot \frac{1}{m_i} - \frac{(x_s \tau_y - y_s \tau_x)^2}{I_z} \right] + V_\tau \left[\frac{(x_s \tau_y - y_s \tau_x)}{I_z} (x_s \cdot n_y - y_s \cdot n_x) \right]} \right\} \tag{4}$$

где

$$V_\tau = V_{i0\tau} + r_{si} \omega_{i0b} - \Omega_0(\tau_y \cdot x_s - \tau_x \cdot y_s);$$

$$V_n = (1+k)(V_{i0n} - \Omega_0(x_s \cdot n_y - y_s \cdot n_x)); S_n, S_\tau -$$

импульсы ударного взаимодействия в нормальном и касательном направлении соответственно;

Ω_0 - угловая скорость вращения барабана до

удара; $V_{i0n}, V_{i0\tau}$ - нормальная и касательная

проекции скорости шара до удара ω_{i0b} - угловая скорость вращения шара вокруг бинормаль-

ной оси до удара; r_{si} - радиус шара; m_i - масса шара; I_z - момент инерции барабана относительно оси Z; f - коэффициент трения скольжения; η - эффективный коэффициент трения скольжения, учитывающий возможность обращения силы трения в нуль в процессе удара; k - коэффициент восстановления при ударе. Кинетическая энергия м.т. в продольном и поперечном направлениях соответственно определяется выражениями:

$$E_{кпр} = \frac{I_{ш}\omega_x^2}{2} + \frac{I_{ш}\omega_y^2}{2} + \frac{m_{ш}V_z^2}{2}, \quad (5)$$

$$E_{кноп} = \frac{I_{ш}\omega_z^2}{2} + \frac{m_{ш}V_x^2}{2} + \frac{m_{ш}V_y^2}{2}, \quad (6)$$

где $I_{ш}$ – момент инерции шара, $m_{ш}$ – масса шара; ω_x , ω_y , ω_z – проекции угловой скорости вращения шара на оси x , y и z соответственно; V_x , V_y , V_z – проекция линейной скорости шара на оси x , y и z соответственно.

С использованием разработанного математического описания процесса пространственного движения м.т., в соответствии с программой численных экспериментальных исследований, на ПЭВМ были проведены комплексные экспериментальные исследования процесса движения м.т. в цилиндрическом корпусе ШБМ $D \times L = 0,45 \times 0,5$ м. Численный эксперимент проводился с корпусом ШБМ при коэффициенте загрузки м.т. $\phi = 0,3$ (437 штук м.т.), относительной частоте вращения корпуса $\psi = 0,76\psi_{кр}$ и $\psi = 1,14\psi_{кр}$. Эксперимент проводился соответственно в течение 14 секунд и 18,8 секунд реального времени при установившемся режиме движения м.т.. Рассматривалось распределение в продольном и в поперечных сечениях цилиндрического барабана средних значений скоростей центров масс м.т. выделенных объемов (ВО) и их составляющих у загрузочного днища, в центральной части и у разгрузочного днища с координатами в направлении продольной оси при $\psi = 0,76\psi_{кр}$, соответственно $z = 0,066$ м; $z = 0,24$ м и $z = 0,415$ м; при $\psi = 1,14\psi_{кр}$ – $z = 0,24$ м; $z = 0,264$; $z = 0,46$ м и в продольном сечении, проведенном параллельно оси Z через мелющую загрузку под углом 45° к осям X и Y . Принято направление продольных составляющих средних значений скоростей совпадающее с направлением оси Z . Распределение при $\psi = 0,76\psi_{кр}$ в поперечных и продольном сечениях барабана средних значений продольных скоростей центров масс м.т. ВО в графическом виде представлено соответственно на рис. 1 и рис. 2.

Анализ полученных данных и построенных по ним графических зависимостей позволяет сделать вывод о движении м.т. в корпусе с барабаном цилиндрической формы не только в поперечном направлении, но и в продольном. О продольном перемещении м.т. свидетельствует наличие продольных составляющих (вдоль оси Z) средних значений скоростей м.т. Продольные составляющие скоростей отдельно взятых м.т. возникают в результате их взаимодействия друг с другом, торцевыми днищами и барабаном. Взаимодействуя друг с другом и барабаном, м.т. приобретают скорости в равной мере, как в положительном, так и отрицательном направлениях оси Z и средние значения скоростей центров

масс м.т. ВО от взаимодействия м.т. друг с другом и барабаном обнуляются. М.т., находящиеся в непосредственной близости у торцевых днищ, также взаимодействуют и с ними и за счёт этого взаимодействия поднимаются на большую высоту относительно м.т., находящихся в центральной части барабана, образуя некоторой уклон. Находящиеся в верхней части контура мелющей загрузки м.т. преимущественно приобретают продольные составляющие скоростей, направленные от торцевых днищ к центральной части барабана. В свою очередь м.т., находящиеся преимущественно в нижней части контура мелющей загрузки, вытесняются расположенными над ними мелющими телами в освобождающуюся область и приобретают продольные составляющие скоростей, направленные от центральной части барабана к торцевым днищам. Таким образом, происходит перемещение м.т. в верхней части контура мелющей загрузки в направлении от торцевых днищ к центральной части барабана, а в нижней его части – в обратных направлениях. В центральной части барабана происходит перемешивание м.т. с продольно направленными движениями и в его поперечном сечении ВО с положительными и отрицательными средними значениями продольных составляющих скоростей центров масс м.т. распределены относительно равномерно.

Средние значения продольных составляющих скоростей (V_z) центров масс м.т. ВО у торцевых днищ по абсолютной величине преимущественно несколько больше, чем в центральной части цилиндрического барабана. Их абсолютные величины преимущественно меньше (от нескольких раз, до десяти раз и более) соответствующих средних значений поперечных составляющих скоростей (V_{xy}) центров масс м.т. ВО. Так, при $\psi = 0,76\psi_{кр}$ в выделенных у загрузочного днища и в центральной части барабана объемах с координатами x_1, y_1 (0,2045 м; 0,0818 м) средние значения продольных составляющих скоростей составляют соответственно $V_{z1} = 0,057$ м/с и $V_{z2} = -0,039$ м/с; поперечных – $V_{x_1y_1} = 0,264$ м/с и $V_{x_2y_2} = 0,179$ м/с. Для ВО с координатами x_2, y_2 (-0,041 м; -0,0082 м): $V_{z1} = 0,062$ м/с и $V_{z2} = 0,039$ м/с; $V_{x_1y_1} = 0,508$ м/с и $V_{x_2y_2} = 0,47$ м/с). О рассмотренном влиянии торцевых днищ на мелющую загрузку свидетельствуют полученные по результатам численного эксперимента на ПЭВМ данные и построенные по ним соответственно графические зависимости рис. 3 – рис. 4, из которых следует, что в выделенных у торцевых днищ объемах средние значения кинетической энергии м.т. заметно превышают средние значения кинетической энергии м.т. выделенных в мелющей среде объемах в центральной части цилиндрического барабана.

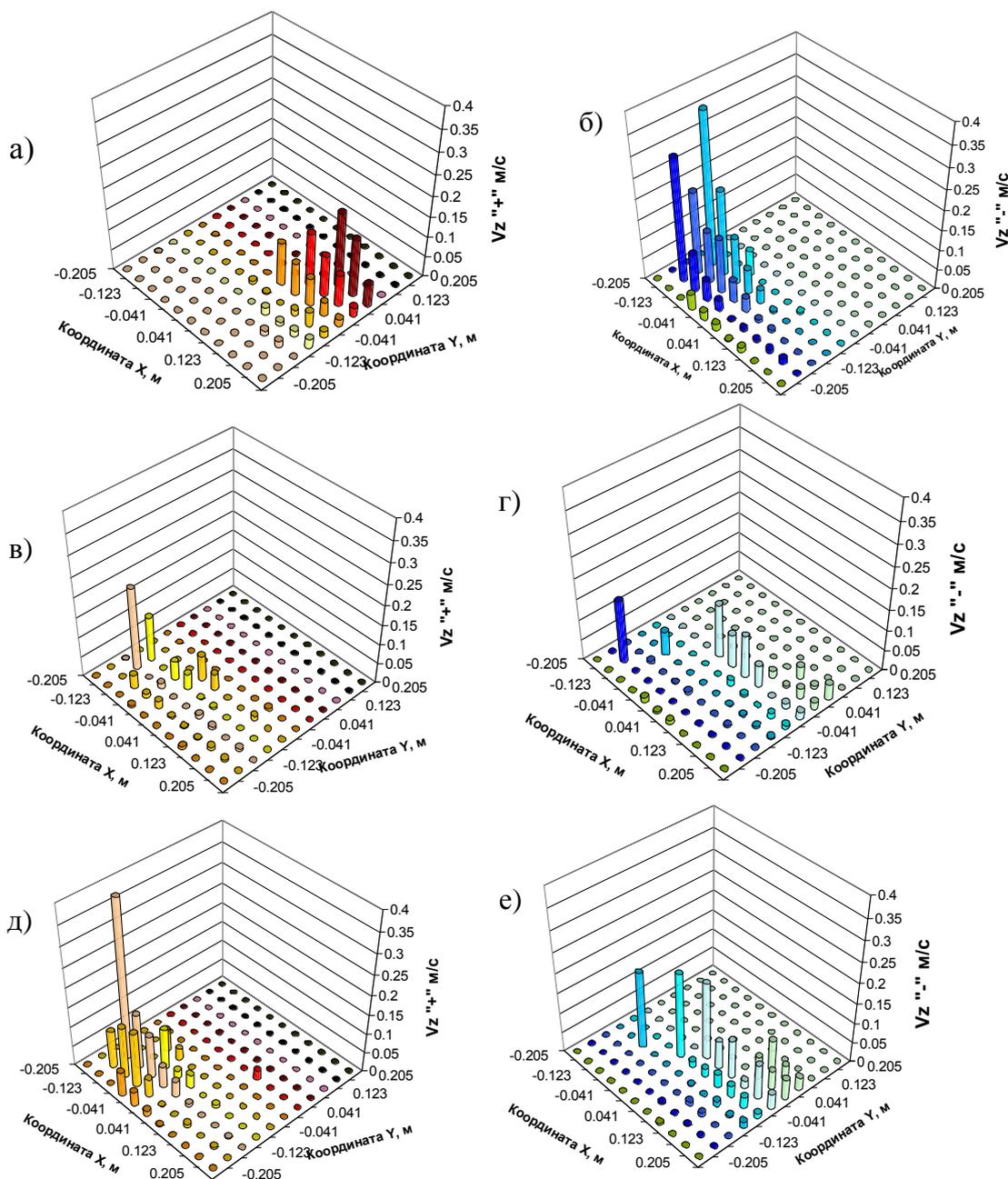


Рис. 1. Распределение в поперечных сечениях цилиндрического барабана $D \times L = 0,45 \times 0,5$ м средних значений продольных составляющих скоростей центров масс м.т. выделенных объемов при $\varphi = 0,3$; $\psi = 0,76 \psi_{кр}$: а), б) – у загрузочного днища ($z = 0,066$ м); в), г) – в центральной части ($z = 0,24$ м); д), е) – у разгрузочного днища ($z = 0,415$ м); а), в), д) – положительные средние значения скоростей; б), г), е) – отрицательные средние значения скоростей

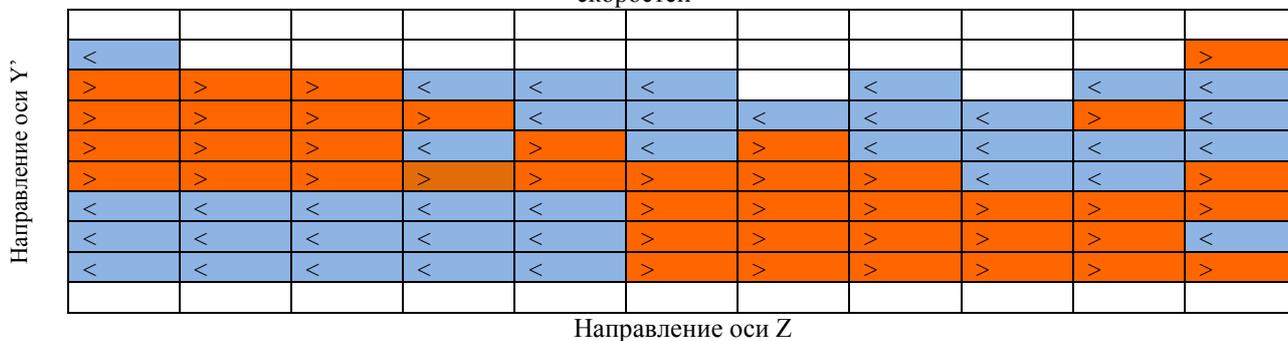


Рис. 2. Схема распределения продольных скоростей центров масс м.т. ВО в продольном сечении цилиндрического барабана мельницы $D \times L = 0,45 \times 0,5$ м при $\varphi = 0,3$; $\Psi = 0,76 \Psi_{кр}$: \square - $V_z > 0$; \blacksquare - $V_z < 0$
 Согласно полученным данным сумма средних значений кинетической энергии м.т. составляет в ВО у торцевого днища $E_{к.ср} = 7,392$ Дж; в центральной части – 4,954 Дж. Превышение со-

ставляет 149,2%. Средние значения $E_{k,ср}$ определялись при $\varphi=0,3$; $\psi = 0,76\psi_{кр}$ во время установившегося движения м.т. (18,8 с) с интервалом 0,05 с.

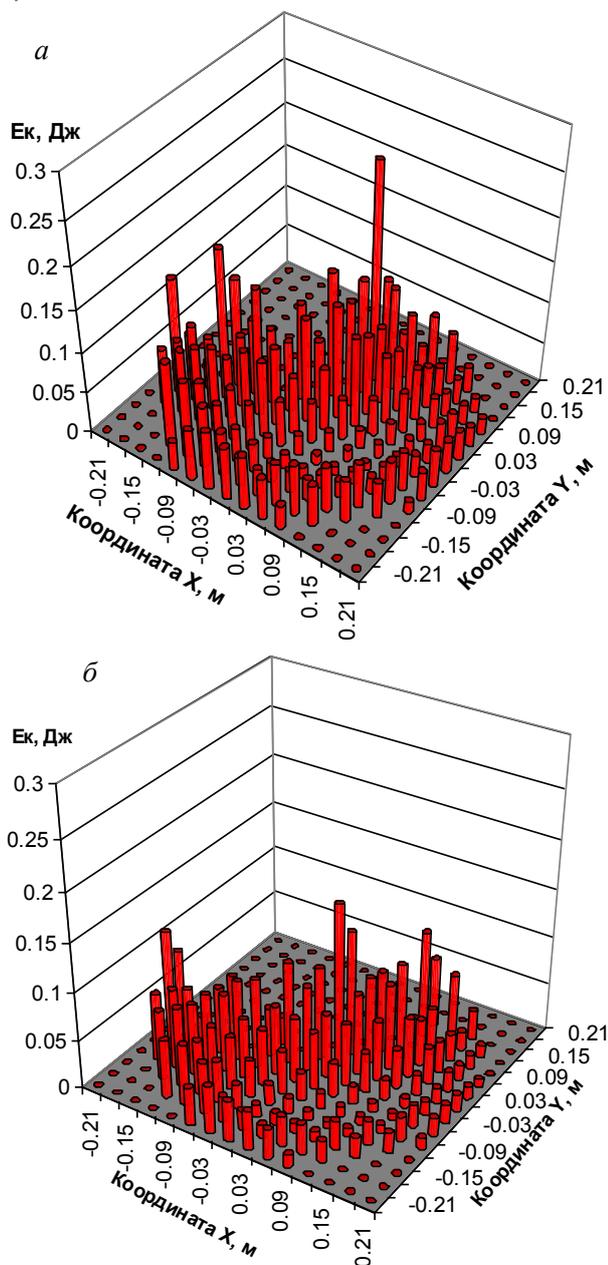


Рис. 3. Распределение $E_{k,ср}$ м.т. в выделенных объемах цилиндрического барабана $D \times L = 0,45 \times 0,5$ м при $\varphi=0,3$; $\psi=0,76\psi_{кр}$: а) у дна, б) в центре камеры

Полученные данные о распределении кинетических энергий среди м.т. в ВО в цилиндрическом барабане мельницы $D \times L = 0,45 \times 0,5$ м и построенная по ним графическая зависимость рис.4 показывают, что в ВО, по мере удаления от торцевых днищ и приближении к центральной части барабана, уменьшается процентное содержание м.т., обладающих большей величиной кинетической энергии и увеличивается их число с меньшей её величиной. Так, в ВО₁, ограниченном плоскостями, перпендикулярными оси Z с координатами $z_{11} = 0$, $z_{12} = 0,048$ м; в

ВО₃ с $z_{31} = 0,096$ м, $z_{32} = 0,144$ м и в ВО₅ с $z_{51} = 0,192$ м, $z_{52} = 0,214$ м содержания м.т., обладающих кинетической энергией от 0 до 0,007 Дж, составляют соответственно 15%, 19% и 24%; кинетической энергии от 0,029 Дж до 0,037 Дж – 7%, 6% и 5%; кинетической энергией от 0,051 Дж до 0,059 Дж – 4%, 3% и 2% соответственно.

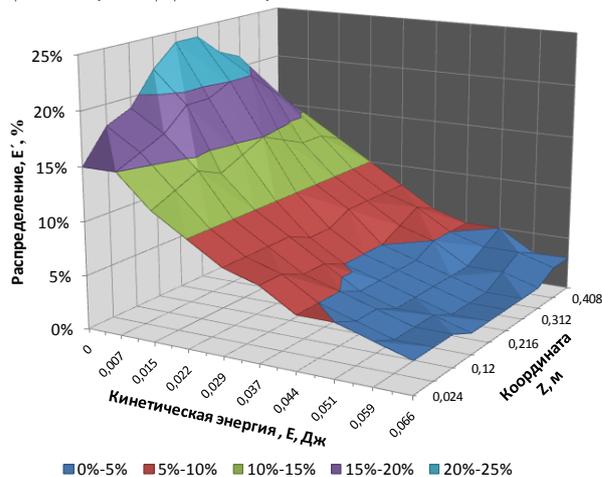


Рис. 4. Распределение кинетических энергий м.т. в выделенных объемах цилиндрического корпуса $D \times L = 0,45 \times 0,5$ м ШБМ при $\varphi=0,3$; $\psi=0,76\psi_{кр}$

В результате проведенных исследований установлено, что днища корпуса мельницы, взаимодействия с м.т., способствуют их движению не только в поперечном, но и в продольных направлениях, что приводит к перемещениям м.т. в верхней части контура мелушей загрузки в направлениях от днищ к центральной части барабана; в нижней части – в обратных направлениях. Абсолютные величины поперечных составляющих скоростей м.т. преимущественно значительно превышают абсолютные величины их продольных составляющих – от нескольких раз, до десяти раз и более. При цилиндрической форме барабана и одинаковом исполнении днищ их влияние на продольное движение м.т. идентично. Днища мельницы обеспечивают м.т., находящимся в выделенных возле них объемах до 1,5 раз большие средние значения кинетической энергии по сравнению со средними значениями кинетической энергии м.т., находящимися в выделенных в центральной части цилиндрического барабана объемах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев, Н.Д. Математическая модель движения мелуших тел в барабанных мельницах. Общие принципы построения. / Н.Д. Воробьев, В.С. Богданов, М.Ю. Ельцов // Изв. Вузов. Горный журнал. - №8. - 1988 - С.116-119.
2. Ханин, С. И. Модель движения мелуших тел в цилиндрическом барабане трубной шаровой мельницы / С. И. Ханин, В. С. Богданов, Д. Н. Старченко // Строит. и дорожные машины. - 2008. - №10. - С. 46-47.

