

Распределение мелющих шаров и размалываемого материала в поперечном сечении вращающегося барабана мельницы

Шувалов С.И., д-р техн. наук, Михеев П.Г., инж.

Рассмотрены закономерности движения мелющих шаров и размалываемого материала в поперечном сечении вращающегося барабана шаровой мельницы. Приведены формулы для расчета площадей сечений плотного слоя шаров и частиц, движущихся по круговым траекториям, разреженного слоя падающих шаров и частиц, внутреннего и внешнего газовых каналов, находящихся между плотным и падающим слоями и падающим слоем и стенкой барабана. Даны расчетные оценки влияния степени загрузки и скорости вращения барабана на величины этих площадей.

Ключевые слова: шаровая барабанная мельница, мелющие шары, траектория движения, площади сечения барабана.

Distribution of balls and crushed material in cross-section of mill rotating drum

Shuvalov S.I., doctor of science, Mikheyev P.G., engineer

The movement regularities of balls and crushed material in cross section of ball mill rotating drum are considered herewith. There were represented the formulae for calculation of sectional areas of dense layer of balls and fractions moving in circular paths of rarefied layer of balls and fractions, internal and external gas channels located between dense and falling layers, and falling layer and drum wall. The evaluations of drum charge degree and velocity effect on the values of these areas are provided.

Keywords: ball drum mill, milling balls, path of the motion, area of the section of the drum.

Шаровые барабанные мельницы (ШБМ) широко используются для измельчения различных энергетических углей. Основными достоинствами этих мельниц является их универсальность, возможность совмещения сушки и размола углей в одном агрегате и нечувствительность к попаданию в размольное пространство металлических элементов.

Дисперсный состав пыли, выходящей из мельницы, зависит от размеров и прочности поступающих в мельницу кусков угля, интенсивности ударов мелющих тел и продолжительности нахождения измельчаемого материала в размольном пространстве мельницы. Перемещение измельчаемого материала вдоль барабана происходит за счет вытеснения размалываемых частиц поступающей через входной патрубок мельницы массой частиц исходного угля и возврата из сепаратора, а также за счет воздействия на частицы проходящего через барабан газового потока. В свою очередь, влияние вентиляции барабана на скорость движения частиц вдоль барабана зависит от распределения частиц и мелющих тел в поперечном сечении барабана. Несмотря на длительный опыт эксплуатации ШБМ и многочисленные исследования процесса размола в этих мельницах, условия перемещения частиц в размольном пространстве мельницы изучены недостаточно. В представленной работе рассмотрены условия формирования областей движения размалываемых частиц и мелющих шаров во вращающемся барабане под воздействием центробежной силы и силы тяжести и влияние режимных факторов на распределение шароматериальной массы в поперечном сечении барабана.

При работе ШБМ в барабане одновременно находятся мелющие шары и размалываемый материал. Массовое содержание шаров G_w обычно оценивают по степени шаровой загрузки ψ_w , равной от-

ношению насыпного объема шаров в неподвижном барабане к объему всего барабана V_6 :

$$\psi_w = \frac{G_w}{\rho_w^{нас} V_6} = \frac{4}{\pi} \frac{G_w}{\rho_w^{нас} D_6^2 L_6}, \quad (1)$$

где $\rho_w^{нас} = 4900 \text{ кг/м}^3$ – насыпная плотность шаров; V_6 , D_6 , L_6 – объем, диаметр и длина барабана соответственно.

Если учесть, что измельчаемые частицы много мельче мелющих шаров, то можно принять, что частицы заполняют межшаровое пространство. В этом случае объем находящейся в барабане шароматериальной массы $V_{шм}$ составит

$$V_{шм} = V_6 \psi_v, \quad (2)$$

где ψ_v – степень заполнения барабана шарами и материалом:

$$\psi_v = \begin{cases} \psi_w & \text{при } u \leq 1, \\ \psi_w \left[\frac{\rho_w^{нас}}{\rho_w^{уст}} + u \left(1 - \frac{\rho_w^{нас}}{\rho_w^{уст}} \right) \right] & \text{при } u > 1. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь u – степень заполнения межшарового пространства размалываемым материалом.

Одним из факторов, определяющих траектории движения материала и шаров в поперечном сечении барабана, является скорость вращения барабана. Обычно скорость вращения n определяют как количество оборотов барабана за минуту. Эта величина связана с частотой вращения выражением

$$\omega = \frac{n\pi}{30}. \quad (4)$$

Находящиеся в барабане шары и размалываемый материал под действием центробежной силы прижимаются к стенке барабана и вместе с ней поднимаются вверх. Сила тяжести стремится переместить мельничную загрузку вниз. Характер-

ной для кинематики движения загрузки является критическая скорость вращения $\omega_{кр}$, при которой на верхней точке круговой орбиты сила тяжести уравновешивается центробежной силой. Эта скорость находится из условия

$$\omega_{кр}^2 r = g, \quad (5)$$

откуда

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g}{r}}. \quad (6)$$

Здесь r – радиус круговой орбиты, по которой движется тело; g – ускорение свободного падения. Обычно критическая скорость определяется из условия равновесия на стенке барабана, а в качестве характерного размера выбирается внутренний диаметр барабана $D_б$. Из (4) и (5) имеем

$$n_{кр} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{D_б}} = \frac{42,3}{\sqrt{D_б}}. \quad (7)$$

Иногда в качестве скорости вращения принимается число оборотов барабана в секунду N , а в качестве характерного размера выбирается радиус барабана $R_б$. Тогда

$$N_{кр} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R_б}}. \quad (8)$$

В качестве безразмерной скорости вращения используется относительная скорость

$$\varphi = \frac{\omega}{\omega_{кр}} = \frac{n}{n_{кр}} = \frac{N}{N_{кр}}. \quad (9)$$

Шаровые барабанные мельницы работают при частоте вращения ниже критической. За счет вращения барабана прижатые к стенке размалываемые частицы и шары поднимаются вверх, затем отрываются от стенки и по инерции сначала поднимаются вверх, а затем падают вниз, перемещаясь в горизонтальном направлении. Траектории движения частиц показаны на рис. 1.

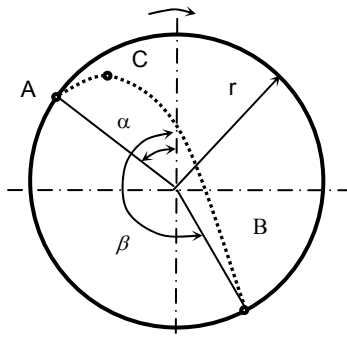


Рис. 1. Траектории движения частиц в шаровой барабанной мельнице

Расчет траекторий подъема и падения тел во вращающемся барабане выполнен Х. Лангеманном [1]. Поместим начало координат в центр сечения барабана и будем отсчитывать углы точки отрыва α и точки падения β от вертикали напротив вращения барабана. Угол отрыва тела с круговой траектории радиусом r определяется из соотношения

$$\omega^2 r = g \cos \alpha, \quad (10)$$

где

$$\alpha = \arccos \frac{\omega^2 r}{g}$$

или с учетом (9)

$$\alpha = \arccos \frac{\omega^2}{\omega_{кр}^2} = \arccos \varphi^2 = \arctg \frac{\sqrt{1-\varphi^4}}{\varphi^2}. \quad (11)$$

Координаты точки отрыва определяются выражениями

$$x_a = -r \sin \alpha = -r \sqrt{1-\varphi^4}, \quad (12)$$

$$y_a = r \cos \alpha = r \varphi^2. \quad (13)$$

При движении по круговой орбите линейная скорость частиц и шаров равна

$$V = \omega r = \varphi \omega_{кр} r = \varphi \sqrt{gr}.$$

В точке отрыва А проекции скорости на координатные оси x, y равны, соответственно:

$$V_{x,a} = V \cos \alpha = \varphi^3 \sqrt{gr}; \quad (14)$$

$$V_{y,a} = V \sin \alpha = \varphi \sqrt{1-\varphi^4} \sqrt{gr}. \quad (15)$$

Если предположить, что после отрыва с круговой траектории тело будет находиться в свободном падении, то горизонтальная составляющая скорости останется постоянной и равной

$$V_x = V_{x,a} = \varphi^3 \sqrt{gr}, \quad (16)$$

а вертикальная составляющая скорости будет изменяться в соответствии с уравнением

$$V_y = V_{y,a} - gt = \varphi \sqrt{1-\varphi^4} \sqrt{gr} - gt. \quad (17)$$

Траектории полета описываются уравнениями

$$x_f = x_a + \int_0^t \varphi^3 \sqrt{gr} dt = r \left(\varphi^3 \sqrt{\frac{g}{r}} t - \sqrt{1-\varphi^4} \right), \quad (18)$$

$$y_f = y_a + \int_0^t (\varphi \sqrt{1-\varphi^4} \sqrt{gr} - gt) dt = r \left(\varphi^2 + \varphi \sqrt{\frac{g}{r}} \sqrt{1-\varphi^4} t - \frac{gt^2}{2r} \right). \quad (19)$$

Выражая из (18) время

$$t = \frac{x_f + \sqrt{1-\varphi^4}}{\varphi^3 \sqrt{\frac{g}{r}}} \quad (20)$$

и подставляя в (19), получим

$$y_f = \frac{r^2 (3\varphi^4 - 1) - 2x_f r (1-\varphi^4)^{\frac{3}{2}} - x_f^2}{2r\varphi^6} \quad (21)$$

с касательной

$$\frac{dy}{dx} = \frac{r(1-\varphi^4)^{\frac{3}{2}} + x_f}{r\varphi^6}. \quad (22)$$

В верхней точке траектории падения вертикальная составляющая скорости становится равной нулю. Из (17) продолжительность подъема мелющего тела равна

$$t_c = \sqrt{\frac{r}{g}} \varphi \sqrt{1-\varphi^4}, \quad (23)$$

а из (18) и (19) определяются координаты высшей точки:

$$x_c = -r(1-\varphi^4)^{\frac{3}{2}}; \quad (24)$$

$$y_c = r \frac{\varphi^2}{2} (3-\varphi^4). \quad (25)$$

Совместным решением уравнения (21) и уравнения окружности

$$x^2 + y^2 = r^2$$

определяются координаты точки удара при падении:

$$x_b = r\sqrt{1-\varphi^4} (4\varphi^4 - 1) = R_6 \frac{\varphi^2}{\varphi_6^2} \sqrt{1-\varphi^4} (4\varphi^4 - 1); \quad (26)$$

$$y_b = r\varphi^2 (4\varphi^4 - 3) = R_6 \frac{\varphi^4}{\varphi_6^2} (4\varphi^4 - 3). \quad (27)$$

Угол падения при этом равен

$$\beta = \begin{cases} \pi - \arctg \frac{x_b}{y_b} = \\ = \pi - \arctg \frac{\sqrt{1-\varphi^4} (4\varphi^2 - 1)}{\varphi^2 (4\varphi^4 - 3)} \text{ при } y_b < 0, \\ \arctg \frac{y_b}{x_b} + \frac{3}{2}\pi = \\ = \arctg \frac{\varphi^2 (4\varphi^4 - 3)}{\sqrt{1-\varphi^4} (4\varphi^2 - 1)} + \frac{3}{2}\pi \text{ при } y_b \geq 0. \end{cases} \quad (28)$$

Подстановкой (26) в (20) определяется продолжительность полета:

$$t_f = 4\sqrt{\frac{r}{g}}\varphi\sqrt{1-\varphi^4}. \quad (29)$$

Продолжительность оборота барабана равна

$$t_0 = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\varphi\omega_{кр}} = \frac{2\pi}{\varphi_6} \sqrt{\frac{R_6}{g}}. \quad (30)$$

Здесь R_6, φ_6 – радиус барабана и относительная скорость вращения на этом радиусе соответственно.

Продолжительность прохода тела по круговой траектории равна

$$t_k = \frac{(\beta - \alpha)}{2\pi} t_0 = \frac{4}{\varphi_6} \sqrt{\frac{R_6}{g}} \arctg \left(\frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} \right) = \\ = \frac{4}{\varphi} \sqrt{\frac{r}{g}} \arctg \left(\frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} \right). \quad (31)$$

Продолжительность обрачиваемости загрузки –

$$t_v = t_f + t_k = \frac{4}{\varphi} \sqrt{\frac{r}{g}} \left[\varphi^2 \sqrt{1-\varphi^4} + \arctg \left(\frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} \right) \right]. \quad (32)$$

В соответствии с принятой моделью движения тела во вращающемся барабане, в поперечном сечении барабана можно выделить четыре области (рис. 2).

Первую область составляют движущиеся плотным слоем по круговым траекториям шары и размалываемый материал. Внешний радиус области равен радиусу барабана R_6 , внутренний радиус $R_{вн}$ зависит от объема шаров и материала в барабане и от относительной частоты вращения барабана φ_6 . Вторая область ограничена траекториями падения тел, оторвавшихся с круговых траекторий с внешнего и внутреннего радиусов первой области. Третья область занимает пространство между первой и второй областями, а ограничена радиусом барабана и траекторией тел, оторвавшихся с радиуса барабана.

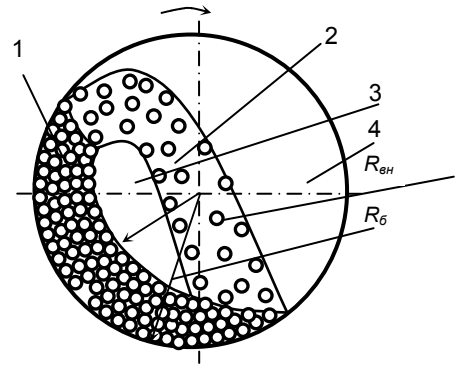


Рис. 2. Схема движения шаров и материала в поперечном сечении барабанной мельницы: 1 – область подъемного движения по круговым траекториям; 2 – разреженный слой падающих шаров и частиц; 3, 4 – «чистые» каналы

В неподвижном барабане площадь сечения барабана, занятая шароматериальной массой, равна

$$S_0 = \pi R_6^2 \psi_v, \quad (33)$$

где степень заполнения барабана ψ_v определяется по (3). Во вращающемся барабане плотный слой шаров и частиц занимает площадь S_1 . Размалываемый материал и шары, занимающие в неподвижном барабане площадь $S_0 - S_1$, при вращении барабана располагаются в разреженном слое площадью S_2 . Полная площадь сечения барабана включает также площадь газовых каналов S_3 и S_4 :

$$S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = \pi R_6^2. \quad (34)$$

На радиусе $R_{вн} < r < R_6$ выделим слой толщиной dr . Площадь сектора, который занимает движущаяся по круговой траектории шароматериальная масса, составит

$$dS_1 = 2\pi r \frac{\beta - \alpha}{2\pi} dr = r(\beta - \alpha) dr. \quad (35)$$

В свою очередь,

$$\frac{\beta - \alpha}{2\pi} = \frac{t_k}{t_0}. \quad (36)$$

Так как

$$\frac{d(S_0 - S_1)}{dS_1} = \frac{t_f}{t_k},$$

то

$$dS_0 = \frac{t_f + t_k}{t_k} dS_1 = \frac{t_v}{t_k} dS_1. \quad (37)$$

Подставляя (35) и (36) в (47), получим

$$S_0 = 2\pi \int_{R_{вн}}^{R_6} \frac{t_v}{t_0} r dr. \quad (38)$$

Перейдем от переменной r к переменной φ . Из (11) и (12) для радиуса загрузки r следует, что

$$N_{кр} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r}}, \quad \varphi = \frac{N}{N_{кр}} = 2\pi N \sqrt{\frac{r}{g}}, \quad N = \frac{\varphi}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r}}.$$

Для радиуса $r = R_6$ относительная частота вращения $\varphi = \varphi_6$. Для произвольного радиуса r относительная частота вращения связана с относительной частотой вращения на радиусе барабана выражением

$$\frac{\varphi}{\varphi_6} = \sqrt{\frac{r}{R_6}}$$

или

$$r = R_6 \frac{\varphi^2}{\varphi_6}$$

Из этого следует

$$rdr = 2 \frac{\varphi^3}{\varphi_6^4} R_6^2 d\varphi.$$

Уравнение (38) принимает вид

$$S_0 = 4\pi \frac{R_6^2}{\varphi_6^4} \int_{\varphi_{вн}}^{\varphi_6} \frac{t_v}{t_0} \varphi^3 d\varphi. \quad (39)$$

Подставляя (33) и (35) в (42) и интегрируя, получаем

$$S_0 = \frac{R_6^2}{2\varphi_6^4} \left[(4\varphi^4 - 1) \operatorname{arctg} \left(\frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} \right) + \frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} \right] \Big|_{\varphi_{вн}}^{\varphi_6}. \quad (40)$$

Если ввести функцию

$$F_1(\varphi) = \frac{1}{2} \left[(4\varphi^4 - 1) \operatorname{arctg} \left(\frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} \right) + \frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} \right], \quad (41)$$

то выражение (40) можно представить в виде

$$S_0 = \frac{R_6^2}{\varphi_6^4} [F_1(\varphi_6) - F_1(\varphi_{вн})]. \quad (42)$$

Приравнявая (33) и (42), получим

$$F_1(\varphi_{вн}) = F_1(\varphi_6) - \pi \psi_v \varphi_6^4. \quad (43)$$

Значение относительной скорости вращения на внутреннем радиусе загрузки находится из (43) численными методами.

Внутренний радиус загрузки $R_{вн}$ определим используя формулу

$$\varphi = \frac{N}{N_{кД}} = 2\pi N \sqrt{\frac{r}{g}}.$$

Из этого следует

$$R_{вн} = \frac{\varphi_{вн}^2 g}{4\pi^2 N^2}. \quad (44)$$

Площадь сечения барабана, занятого движущейся по круговой траектории шароматериальной загрузкой, определяется интегрированием уравнения (35):

$$S_1 = \int_{R_{вн}}^{R_6} r(\beta - \alpha) r dr = \frac{R_6^2}{\varphi_6^4} [F_2(\varphi_6) - F_2(\varphi_{вн})], \quad (45)$$

где

$$F_2(\varphi) = (2\varphi^4 - 1) \operatorname{arctg} \left(\frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} \right) + \varphi^2 \sqrt{1-\varphi^4}. \quad (46)$$

Доля сечения барабана, занятая движущейся по круговым траекториям шароматериальной массой, по отношению к полному сечению барабана составляет

$$\psi_k = \frac{S_1}{\pi R_6^2} = \frac{F_2(\varphi_6) - F_2(\varphi_{вн})}{\pi \varphi_6^4}. \quad (47)$$

Для оценки площадей падающего слоя и газовых каналов введем новые переменные:

$$x_1 = x + R_6, \quad y_1 = y + R_6.$$

В новых координатах площадь падающего слоя равна

$$S_2 = \int_{x_{1a,6}}^{x_{1b,6}} y_{1f,6} dx_1 - \int_{x_{1a,6}}^{x_{1a,вн}} y_{1a} dx_1 - \int_{x_{1a,вн}}^{x_{1b,вн}} y_{1f,вн} dx_1 - \int_{x_{1b,вн}}^{x_{1b,6}} y_{1b} dx_1. \quad (48)$$

Проводя интегрирование, получим:

$$\int_{x_{1a,6}}^{x_{1b,6}} y_{1f,6} dx_1 = 4R_6^2 \varphi_6^4 \sqrt{1-\varphi_6^4} \left(\frac{2\varphi_6^6 + \varphi_6^2}{3} + 1 \right); \quad (49)$$

$$\int_{x_{1a,6}}^{x_{1a,вн}} y_{1a} dx_1 = \frac{R_6^2}{\varphi_6^2} \Big|_{\varphi_{вн}}^{\varphi_6} \left(\frac{\varphi^2 \sqrt{1-\varphi^4}}{4\varphi_6^2} \operatorname{arctg} \frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} + \frac{1}{4\varphi_6^2} \varphi^2 \sqrt{1-\varphi^4} + \frac{1}{2\varphi_6^2} \varphi^6 \sqrt{1-\varphi^4} \right); \quad (50)$$

$$\int_{x_{1a,вн}}^{x_{1b,вн}} y_{1f,вн} dx_1 = 4 \frac{R_6^2 \varphi_{вн}^6}{\varphi_6^2} \sqrt{1-\varphi_{вн}^4} \left[1 + \frac{\varphi_{вн}^4 (2\varphi_{вн}^4 + 1)}{3\varphi_6^2} \right]; \quad (51)$$

$$\int_{x_{1b,вн}}^{x_{1b,6}} y_{1b} dx_1 = \frac{R_6^2}{\varphi_6^2} \Big|_{\varphi_{вн}}^{\varphi_6} \left(\frac{-\varphi^2 \sqrt{1-\varphi^4}}{4\varphi_6^2} + \frac{3}{4} \operatorname{arctg} \frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} + \frac{3}{2} \varphi^6 \sqrt{1-\varphi^4} - 8\varphi^{10} \sqrt{1-\varphi^4} + 8\varphi^{14} \sqrt{1-\varphi^4} \right). \quad (52)$$

Подставляя (49)–(52) в (48) и вводя функцию

$$F_3(\varphi) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\varphi^2}{\sqrt{1-\varphi^4}} \right) - \varphi^2 \sqrt{1-\varphi^4} \left(1 + 2\varphi^4 - \frac{28}{3} \varphi^8 + \frac{16}{3} \varphi^{12} \right), \quad (53)$$

$$- \varphi^2 \sqrt{1-\varphi^4} \left(1 + 2\varphi^4 - \frac{28}{3} \varphi^8 + \frac{16}{3} \varphi^{12} \right),$$

получим формулу для расчета площади сечения падающего слоя:

$$S_2 = R_6^2 \frac{F_3(\varphi_6) - F_3(\varphi_{вн})}{\varphi_6^4}. \quad (54)$$

Площадь сечения газового канала, находящегося между движущимся по круговой траектории плотным слоем шароматериальной массы и падающим разреженным слоем, равна

$$S_3 = \int_{x_{1a,вн}}^{x_{1b,вн}} y_{1f,вн} dx_1 + \int_{R_6-R_{вн}}^{x_{1a,вн}} y_{1r} dx_1 - \int_{R_6-R_{вн}}^{x_{1b,вн}} y_{1r} dx_1, \quad (55)$$

где y_{1r} – ордината точки на внутренней поверхности плотного слоя.

Переходя к параметрическим переменным

$$y_{1r} = R_б \left(1 + \frac{R_{вн}}{R_б} \cos t \right), \quad x_1 = R_б \left(1 - \frac{R_{вн}}{R_б} \sin t \right),$$

получим

$$S_3 = 2R_б R_{вн} \sin \frac{\beta_{вн} - \alpha_{вн}}{2} \cos \frac{\beta_{вн} + \alpha_{вн}}{2} + \frac{1}{2} R_{вн}^2 \sin(\beta_{вн} - \alpha_{вн}) \cos(\beta_{вн} + \alpha_{вн}) + \frac{R_{вн}^2}{2} (\beta_{вн} - \alpha_{вн}). \quad (56)$$

Площадь сечения газового канала, расположенного между стенкой барабана и разреженным падающим слоем, равна

$$S_4 = \int_{x_{1a,б}}^{2R_б} y_{1r} dx_1 - \int_{x_{1b,б}}^{2R_б} y_{1r} dx_1 - \int_{x_{1a,б}}^{x_{1b,б}} y_{1f,вн} dx_1 = R_б^2 \left[\begin{aligned} & \pi - \frac{\beta_б - \alpha_б}{2} - 2 \sin \frac{\beta_б - \alpha_б}{2} \cos \frac{\beta_б + \alpha_б}{2} - \\ & - \frac{1}{2} \sin(\beta_б - \alpha_б) \cos(\beta_б + \alpha_б) \end{aligned} \right]. \quad (57)$$

В [1] принято, что максимально допустимая степень загрузки барабана шарами и размалываемым материалом соответствует величине, при которой полностью исчезает площадь газового канала S_3 , т.е. при $R_{вн} = 0$. Нам эта оценка представляется завышенной. В реальных условиях работа мельницы становится невозможной, когда внутренний радиус загрузки $R_{вн}$ становится равным радиусу выходного патрубка $R_{пат}$. Отечественные мельницы производства ОАО «Тяжмаш» имеют соотношение $R_{пат}/R_б = 0,28 \div 0,4$ [2], при этом выбор конкретного значения диаметра обусловлен не условиями измельчения или сушки угля, а связан с технологией изготовления барабана.

Относительная частота вращения барабана на радиусе выходного патрубка составляет

$$\varphi_{пат} = \varphi_б \sqrt{\frac{R_{пат}}{R_б}}. \quad (58)$$

Из (43) максимальная степень загрузки барабана равна

$$\psi_v^{\max} = \frac{F_1(\varphi_б) - F_1(\varphi_{пат})}{\pi \varphi_б^4}. \quad (59)$$

При одинаковой шаровой загрузке величина ψ_v^{\max} однозначно определяет предельное количество аккумулированного в барабане материала, а при одинаковой производительности подачи материала – продолжительность размола материала за один проход через барабан. На рис. 3 показана зависимость ψ_v^{\max} от относительного радиуса выходного патрубка $\bar{R}_{пат} = R_{пат}/R_б$ и относительной скорости вращения $\varphi_б$. Анализ зависимостей показывает, что главным фактором, влияющим на максимальную степень загрузки барабана, является относительная скорость вращения, а изменение диаметра выходного патрубка в достаточно широком диапазоне практически не сказывается на величине предельной загрузки. Этим можно объяснить отсутствие положительного эффекта при попытках увеличить производительность ШБМ путем уменьшения диаметра выходного патрубка.

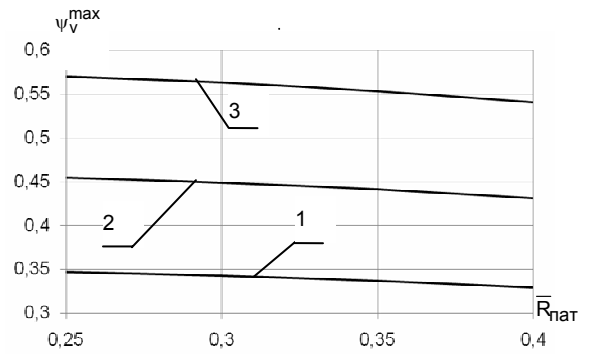


Рис. 3. Зависимость величины предельной степени заполнения барабана от диаметра выходного патрубка и относительной частоты вращения барабана: 1 – $\varphi_б = 0,65$; 2 – $\varphi_б = 0,75$; 3 – $\varphi_б = 0,85$

На рис. 4, 5 представлены зависимости относительной площади сечения барабана $\bar{S}_1 = S_1/S_б$, занятой движущимися по круговой траектории плотным слоем шарами и размалываемыми частицами, и относительного внутреннего радиуса плотного слоя от степени загрузки барабана соответственно. Результаты расчета показывают, что при одинаковой величине ψ_v относительная частота вращения практически не оказывает влияния на площадь сечения плотного слоя. При этом увеличение скорости вращения барабана распределяет плотный слой по большему сектору барабана, уменьшая тем самым толщину плотного слоя и допуская увеличение загрузки барабана размалываемым материалом (рис. 5).

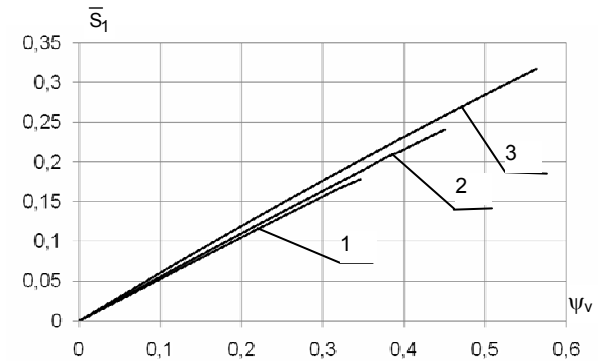


Рис. 4. Зависимость величины относительной площади сечения барабана, занятой плотным слоем, от степени загрузки (см. обозначения на рис. 3)

На рис. 6 приведена зависимость площади сечения падающего слоя от степени загрузки и относительной скорости вращения барабана. Увеличение загрузки барабана приводит к увеличению ширины и до некоторого предела площади сечения падающего слоя. На загрузках, близких к предельным, площадь падающего слоя начинает снижаться вследствие уменьшения высоты слоя.

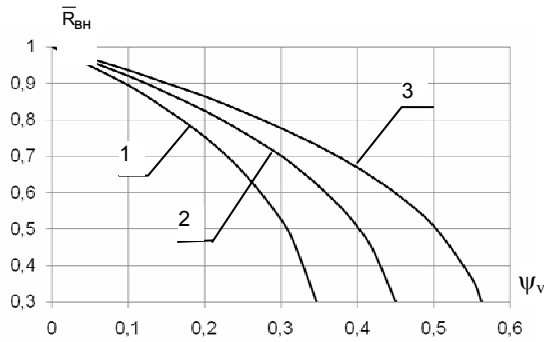


Рис. 5. Зависимость относительного внутреннего радиуса плотного слоя от степени загрузки барабана (см. обозначения на рис.3)

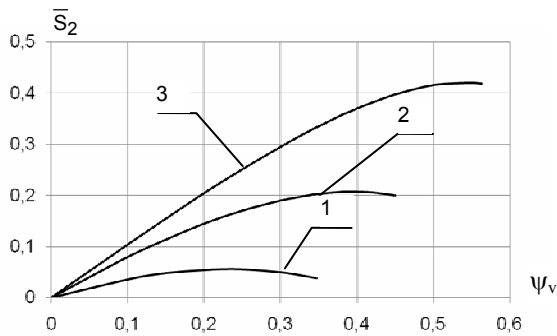


Рис. 6. Зависимость площади сечения падающего слоя от степени загрузки (см. обозначения на рис.3)

При скорости вращения барабана $\varphi_6 = 0,65$ относительная площадь сечения падающего слоя не превышает 6 % от площади сечения барабана. Скорость вращения отечественных ШБМ составляет около $\varphi_6 = 0,75$. В таком режиме площадь сечения падающего слоя увеличивается до 20 %. При $\varphi_6 = 0,85$ падающий слой может занимать более 40 % сечения барабана.

На рис. 7 показано влияние степени загрузки и скорости вращения барабана на площадь сечения внутреннего газового канала, располагающегося между плотным и разреженным падающим слоями.

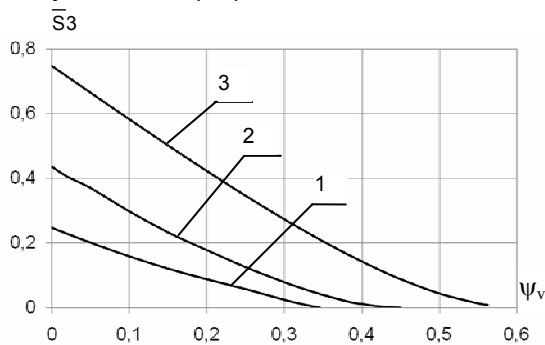


Рис. 7. Зависимость площади сечения внутреннего газового канала от степени загрузки (см. обозначения на рис.3)

При малой загрузке площадь этого канала достаточно велика, но с увеличением загрузки она быстро уменьшается и исчезает при достижении предельной загрузки. Скорость вращения также оказывает значительное влияние на размеры канала. При степени загрузки $\psi_v = 0,3$ и относительной скорости вращения барабана $\varphi_6 = 0,65$ внутренний газовый канал занимает всего лишь 2,5 % сечения барабана. При увеличении скорости вращения до $\varphi_6 = 0,75$

относительная площадь сечения этого канала возрастает до 8 %, а при $\varphi_6 = 0,85$ – до 27 %.

Площадь сечения внешнего газового канала, расположенного между внешней стороной падающего слоя и стенкой барабана, определяется только скоростью вращения барабана (рис. 8).

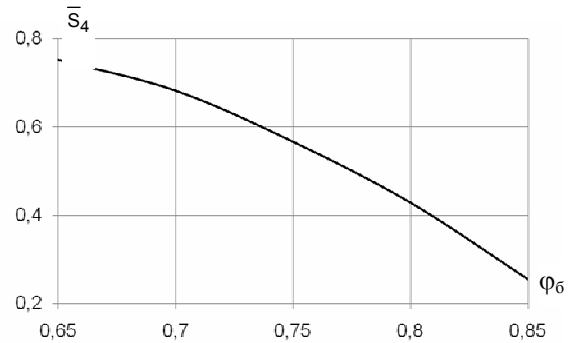


Рис. 8. Зависимость площади сечения внешнего газового канала от скорости вращения барабана

Этот канал занимает наибольшую часть сечения барабана: 75 % при $\varphi_6 = 0,65$, 57 % при $\varphi_6 = 0,75$ и 25 % при $\varphi_6 = 0,85$.

Для прохода газового потока вдоль барабана существенной является суммарная площадь сечения газовых каналов. Зависимость этой величины от степени загрузки и скорости вращения барабана показана на рис. 9.

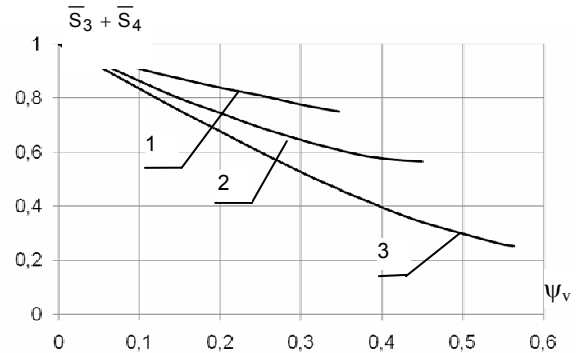


Рис. 9. Зависимость суммарной площади сечения газовых каналов от степени загрузки барабана

При степени загрузки барабана $\psi_v = 0,2$ и скорости вращения $\varphi_6 = 0,65$ относительная площадь сечения газовых каналов составляет 84 %. Увеличение скорости вращения до $\varphi_6 = 0,75$ снижает относительную площадь газовых каналов до 75 %, при $\varphi_6 = 0,85$ эта величина уменьшается до 68 %. При степени загрузки $\psi_v = 0,3$ эти величины соответственно равны 78 %, 65 % и 53 %. При $\varphi_6 = 0,85$ и $\psi_v = 0,5$ газовые каналы занимают только 30 % сечения барабана.

Поток вентилирующего газа вдоль барабана проходит как по газовым каналам, так и через падающий слой шаров и частиц. Перенос частиц газовым потоком вдоль барабана зависит от скорости газа в падающем слое. Распределение потока газа по каналам и падающему слою зависит от соотношения гидравлических сопротивлений и площадей каналов. Поэтому важной характеристикой режима работы мельницы является отношение площади сечения падающего слоя к суммарной площади газовых каналов. Зависимость этой характеристики от сте-

пени загрузки и скорости вращения барабана представлена на рис. 10.

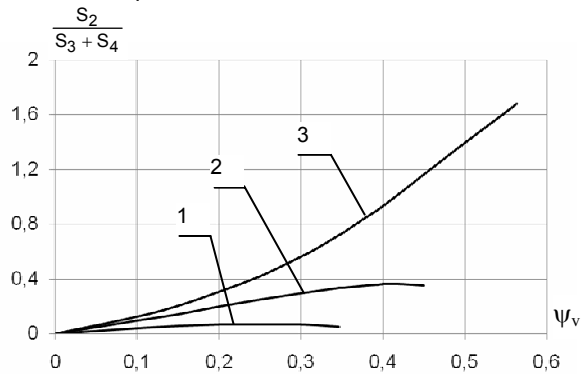


Рис.10. Отношение площади сечения падающего слоя к суммарной площади газовых каналов (см. обозначения на рис. 3)

При относительной частоте вращения $\varphi_6 = 0,65$ площадь сечения падающего слоя не превышает 7 % от суммарной площади газовых каналов. В этом режиме влияние вентиляции барабана на работу мельницы будет достаточно слабым. Увеличение скорости вращения до $\varphi_6 = 0,75$ приводит к повышению доли сечения барабана, занятой падаю-

щим слоем, относительно площади газовых каналов до 35 %. В этом случае более значительная часть газового потока будет проходить через падающий слой и влияние вентиляции на работу мельницы увеличится. При скорости вращения $\varphi_6 = 0,85$ площадь сечения падающего слоя может превосходить суммарную площадь газовых каналов, что усилит влияние вентиляции на скорость перемещения частиц вдоль барабана и, следовательно, на дисперсный состав мельничного продукта и производительность мельницы.

Представленные результаты могут быть использованы для расчета распределения газовых потоков по каналам при конструировании новых мельниц и выборе режима расчета действующего оборудования.

Список литературы

1. **H. Langemann.** Kinetik der Hartzerkleinerung. Teil III: Die Kinematik der Mahlvorgänge in der Fallkugelmühle// Chemie-Ing.-Techn. – Jahr. 1962. – Nr.9. – S. 615–627.
2. **Летин Л.А., Роддатис К.Ф.** Среднеходные и тихоходные мельницы. – М.: Энергоиздат, 1981.

Шувалов Сергей Ильич,
Ивановский государственный энергетический университет,
доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,
телефон 8-910-983-41-81,
e-mail: ShuvalovS@rambler.ru

Михеев Павел Геннадьевич,
Ивановский государственный энергетический университет,
ассистент кафедры тепловых электрических станций,
e-mail: misheevpg@mail.ru