

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-103-112

^{1,*}Ханзаров А.С., ¹Ханин С.И., ¹Воронов В.П., ²Мордовская О.С., ¹Чалов В.А.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: hanzarov@bk.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАГРУЗКИ МАТЕРИАЛА В КАМЕРЕ ПОМОЛА ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Аннотация. Показано преимущественное применение шаровых барабанных мельниц на промышленных предприятиях для реализации процесса измельчения различных материалов, являющегося одним из наиболее энергозатратных основных технологических процессов. В качестве одного из параметров, позволяющих повысить эффективность процесса измельчения, отмечено рациональное количественное соотношение мелющих тел и размалываемого материала. Для расчета коэффициента загрузки материала в камере помола показана целесообразность разработки математического описания, позволяющего определить изменение площади промежутков между мелющими телами в сечении, перпендикулярном продольной оси корпуса, при изменении частоты его вращения. Получено математическое описание, позволяющие определить площадь шароматериальной загрузки в сечении камеры помола при статическом состоянии корпуса и при различной частоте его вращения. С использованием полученного математического описания выполнены исследования изменения площади, занимаемой шароматериальной загрузкой в поперечном сечении камеры помола, при переходе корпуса из статического состояния в рабочее. Определены закономерности ее изменения для мельницы промышленного типоразмера. При различных значениях коэффициента заполнения мелющих тел установлено, что переход состояния корпуса из статического к рабочему приводит к увеличению площади поперечного сечения шароматериальной загрузки на величину, близкую к 17 %. Предложено выражение для определения коэффициента загрузки материала в камере помола, соответствующего его рабочей относительной частоте вращения.

Ключевые слова: камера помола, поперечное сечение корпуса мельницы, материал, мелющие тела, коэффициент загрузки.

Введение. Измельчение является одним из основных технологических процессов при производстве многих материалов и изделий [1–4]. Оно относится к наиболее энергоёмким основным технологическим процессам. Доля затрачиваемой на реализацию этого процесса электроэнергии может достигать до 60 % от всей затрачиваемой в производственном процессе электроэнергии [2]. Для грубого и тонкого помола материалов используются шаровые барабанные, вертикальные валковые, молотковые мельницы, пресс-валковые измельчители. При выборе типа измельчителя учитывают характеристики исходного материала, требования к качественным характеристикам продукта измельчения, удельные показатели энергопотребления и ряд других. Наиболее широкое распространение получили шаровые барабанные мельницы (ШБМ) [5–8]. Это объясняется их большой производительностью, универсальностью, надёжностью, простой конструкции, возможностью автоматизации, высокой степенью адаптации к исходной крупности материала. К основному недостатку относится повышенный удельный расход электроэнергии [9–12].

Эффективность процесса измельчения характеризуется величиной удельного расхода электроэнергии, который зависит от многих параметров: относительной частоты вращения корпуса мельницы; физико-механических свойств измельчаемого материала, его крупности в исходном и измельченном состояниях; характеристик мелющих тел (МТ); конструкций бронифутеровки, внутримельничных устройств; аспирационного режима; количества помольных камер и соотношения их диаметра и длин; коэффициента загрузки МТ и их соотношения с количеством размалываемого материала, а также ряда других [13–15]. Известно, что производительность приближается к максимальному значению при достижении некоторого рационального количественного соотношения измельчаемого материала и мелющих тел в корпусе мельницы [7, 8]. Уменьшенное, по отношению к рациональному, количество загружаемого в камеру помола материала приведет к увеличению удельных расходов электроэнергии, материала бронифутеровки, внутримельничных устройств и МТ. Нерационально увеличенное количество загружаемого материала вызовет «загрубление» продукта помола и снизит его качество, а возможно, приведет

к перезаполнению камеры помола материалом, необходимости прекращения его подачи и продолжительному введению процесса помола в устойчивое состояние. Поэтому в производственных условиях мельницы работают на пониженной производительности, что является одной из причин, приводящей к низкой энергоэффективности процесса измельчения в шаровых мельницах.

Существуют различные подходы к определению количества подаваемого в камеру помола материала, которые можно разделить на прямые и косвенные. Прямые методы являются периодическими и реализуются только при неработающей мельнице. Поэтому на ряде крупных отечественных промышленных предприятий, эксплуатирующих ШБМ больших типоразмеров, применяются устройства, основанные на косвенных методах измерения загруженности камеры мельницы материалом (анализаторы амплитуды и частоты шумовых и вибрационных колебаний). В качестве их недостатков отмечают нестабильность работы в условиях изменения характеристик подаваемого на измельчение материала и состояния внутримельничной среды [16].

В работе [17] рекомендуется поддерживать величину отношения массы МТ к массе измельчаемого клинкера не меньшей 15. В основу рекомендаций положен практический опыт, который может быть применен только в условиях, идентичных рассматриваемым или близких к ним. Другие авторы рассматривают объемное соотношение МТ и материала в условиях их статического состояния при не вращающемся корпусе и рекомендуют высоту расположения слоя материала над поверхностью МТ составляющей $(5-10) \cdot 10^{-3}$ м [18]. Эти рекомендации основываются на практическом опыте эксплуатации мельниц и в работе не подтверждаются статистическими данными и их анализом. Авторы не учитывают увеличение промежутков между МТ при увеличении частоты вращения корпуса. Увеличение рассматриваемых промежутков, причем достаточно значительное, хорошо заметно на фотографиях экспериментальной мельницы с прозрачным днищем в работе [19]. Эксплуатация мельницы с указанным в работе [18] соотношением МТ и материала приведет к значительному увеличению промежутков между МТ, их неполному заполнению материалом и снижению производительности мельницы и, как следствие, увеличению удельного расхода электроэнергии.

В работе [20] авторы рассматривают математическое описание распределения шароматериальной загрузки в сечении, перпендикулярном продольной оси вращающегося корпуса. При

этом делается допущение о ее движении по круговым траекториям в виде плотного слоя. Принятое допущение не позволяет использовать это математическое описание для определения площади пустот, соответствующей рассматриваемой частоте вращения корпуса мельницы, и установления объемного количества материала для их заполнения.

В этой связи для расчета коэффициента загрузки материала в камеру помола появляется целесообразность разработки математического описания, позволяющего определить изменение площади промежутков между МТ в сечении, перпендикулярном продольной оси корпуса, при изменении частоты его вращения.

Материалы и методы. Рассмотрим различные состояния корпуса мельницы (рис. 1–3). Для математического описания состояния загрузки в камере мельницы введем следующие допущения:

1. Материал и МТ в форме шаров равномерно распределены по всей длине камеры помола.

2. При установившейся частоте вращения корпуса ($\Omega = const$) движение МТ происходит по слоям (n), которые имеют различную частоту вращения (ω_n).

3. В отсутствии вращения ($\Omega = 0$) контур загрузки в сечении, перпендикулярном продольной оси корпуса, представляет собой эллипс с полуосями a_0 и b_0 . При вращении корпуса с частотой вращения меньшей критической ($0 < \Omega < \Omega_{кр}$) шаровая загрузка каждого n -го слоя осуществляет движение относительно системы координат $x_1 O y_1$ по эллиптическим траекториям с полуосями a_n и b_n .

4. В камере помола не рассматривается процесс взаимодействия МТ и материала с днищем корпуса мельницы и межкамерной перегородкой.

5. Материал заполняет все пустоты между МТ, за исключением внутреннего промежутка между поднимающимися по эллиптическим траекториям МТ и падающими.

Рассмотрим состояние, при котором вращение корпуса мельницы отсутствует ($\Omega = 0$). На рисунке 1 приведена схема поперечного сечения корпуса мельницы в статическом состоянии. Коэффициент загрузки φ камеры помола можно выразить отношением площади $S_{сез}$, занимаемой МТ и материалом в поперечном сечении камеры помола при статическом состоянии корпуса, к площади ее поперечного сечения:

$$\varphi = \frac{S_{сез}}{\pi \cdot R^2}, \quad (1)$$

где R – внутренний радиус камеры помола.

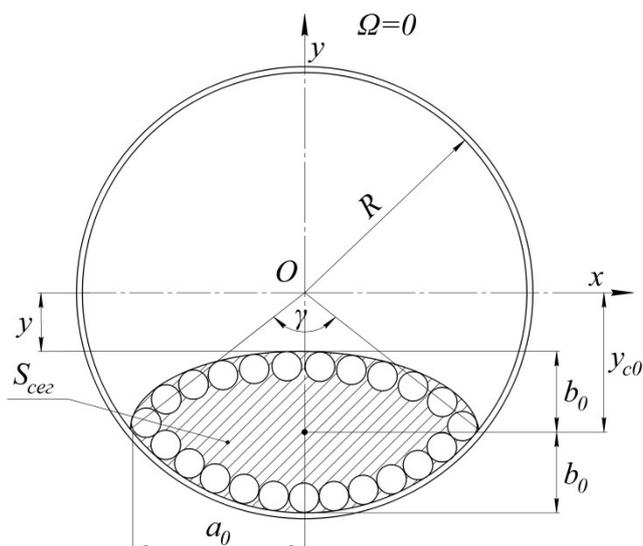


Рис. 1. Расчетная схема расположения шароматериальной загрузки в камере помола при не вращающемся корпусе ($\Omega = 0$)

Введем безразмерную величину $y_0 = y_{c0} / R$, где y_{c0} – расстояние от оси вращения корпуса до центра масс шароматериальной загрузки при различных скоростях его вращения. Тогда площадь

$$S_{cesg} = R^2 (\arccos(2y_0 - 1) - 2 \cdot (2y_0 - 1) \sqrt{y_0 - y_0^2}). \quad (2)$$

На основании (1) можно записать:

$$\pi\varphi = \arccos(2y_0 - 1) - 2 \cdot (2y_0 - 1) \sqrt{y_0 - y_0^2}. \quad (3)$$

Рассмотрим выражение (3) как уравнение относительно $y_0 = f(\varphi)$. Нахождение корней численным методом показало, что данная зависимость

шароматериальной загрузки в сечении камеры помола при не вращающемся корпусе можно выразить в следующем виде:

$$y_0(\varphi) = 0,92953 - 0,86063 \cdot \varphi. \quad (4)$$

очень близка к линейной и её можно задать следующим аналитическим выражением:

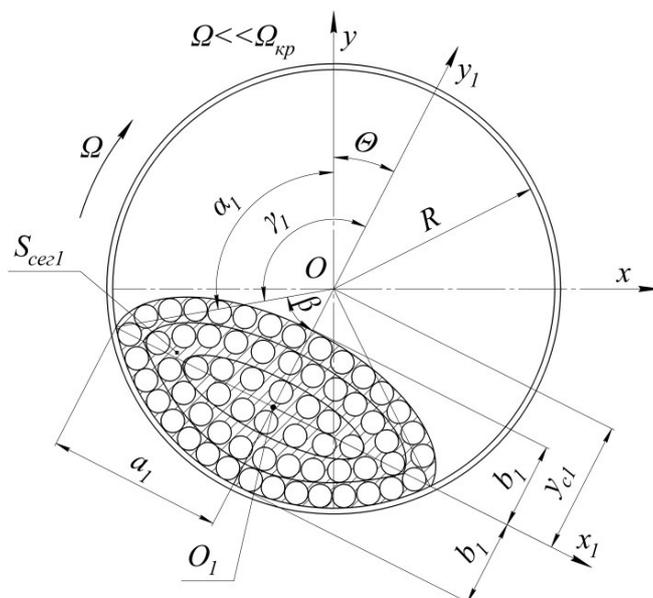


Рис. 2. Расчетная схема расположения загрузки при малой частоте вращения корпуса ($\Omega \ll \Omega_{кр}$)

При вращении корпуса мельницы изменяется положение центра масс загрузки O_1 и расстояние y_{c1} от его оси O до центра масс загрузки. Изменения зависят от коэффициента загрузки φ . При этом линия, соединяющая данный центр

масс O_1 с осью вращения, отклоняется от вертикальной оси y на угол Θ по направлению вращения корпуса мельницы.

Введем следующее обозначение в виде безразмерной величины:

$$y_2 = \frac{y_{e1}}{R}. \tag{5}$$

Согласно расчетной схеме (рис. 2) находим, что величины полуосей эллиптической траектории движения наружного слоя шароматериальной загрузки равны:

$$a_1 = R \cdot \sqrt{1 - y_2^2}. \tag{6}$$

$$b_1 = R \cdot (1 - y_2). \tag{7}$$

На основании (6) и (7) площадь шароматериальной загрузки в сечении камеры помола в виде эллипса с полуосями a_1 и b_1 будет определяться следующим соотношением:

$$S_{ceз1} = \pi \cdot R^2 \cdot (1 - y_2) \cdot \sqrt{1 - y_2^2}. \tag{8}$$

На основании (1) найдем коэффициент шароматериальной загрузки для текущего случая:

$$\varphi = (1 - y_2) \cdot \sqrt{1 - y_2^2}. \tag{9}$$

Решение уравнения (9) относительно $y_2(\varphi)$ получено на основе численного решения и представляет собой следующую линейную зависимость:

$$y_2(\varphi) = 0,919 - 0,953 \cdot \varphi. \tag{10}$$

Таким образом, полученное соотношение (10) определяет изменение положения центра тяжести шароматериальной загрузки при вращении корпуса с фиксированным значением угловой частоты, причём гораздо меньшем, чем критическое ($\Omega \ll \Omega_{кр}$).

В центральной части шароматериальной загрузки находится малоподвижное ядро [9]. При увеличении частоты вращения корпуса площадь малоподвижного ядра в поперечном сечении расширяется. Причём при её увеличении до определенной величины (переход шароматериальной загрузки в водопадный режим движения) образуется промежуток (зона) между поднимающейся по эллиптическим траекториям шароматериальной загрузкой и падающей. Обозначим данную зону как поперечное сечение газового канала площадью S_0 , расширяющегося при увеличении частоты вращения корпуса. Расширение этой зоны приводит к расширению площади поперечного сечения шароматериальной загрузки S_1 , включающего сечение газового канала площадью S_0 , ограниченного контуром внешнего слоя шароматериальной загрузки (рис. 3).

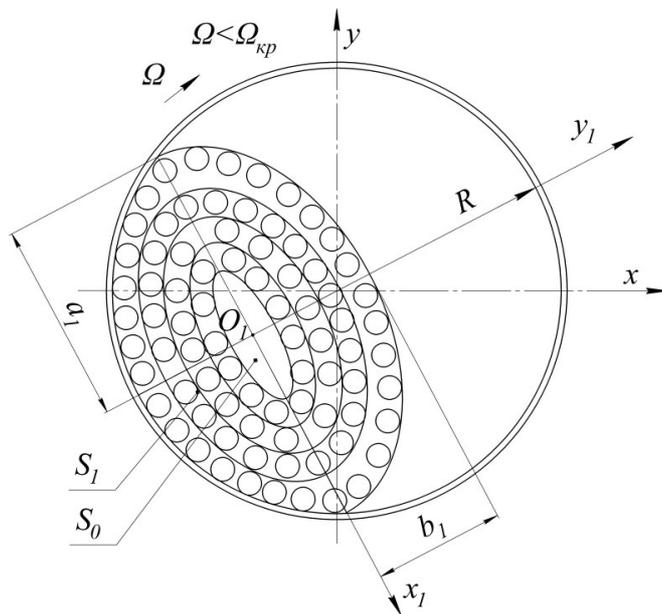


Рис. 3. Расчетная схема расположения шароматериальной загрузки при водопадном режиме движения

С ростом частоты вращения корпуса до $\Omega_{кр}$ в линейном приближении изменяются параметры эллиптических траекторий слоёв согласно соотношениям:

$$a_n = a_1 - d(n - 1); \tag{11}$$

$$b_n = b_1 - d(n - 1), \tag{12}$$

где $n=1...N$ – номер соответствующего слоя, d – средневзвешенный диаметр МТ. На основании (7) число слоёв можно определить как:

$$N = \frac{b_1}{d} = \frac{R}{d} (1 - y_2). \tag{13}$$

Аналитические зависимости размеров полуосей эллипса внешнего слоя от частоты вращения корпуса имеют вид:

$$a_1(\psi) = R \left(\sqrt{1 - y_2^2} \cdot (1 - \psi) + \psi \right); \tag{14}$$

$$b_1(\psi) = R \cdot \left((1 - y_0) \cdot (1 - \psi) + \psi \right). \tag{15}$$

В выражениях (14), (15) ψ – коэффициент относительной частоты вращения корпуса, определяемый выражением:

$$\psi = \Omega / \Omega_k, \tag{16}$$

где Ω_k – критическая частота вращения корпуса, при которой шароматериальная загрузка прижимается к корпусу мельницы (режим центрифугирования).

$$S_1(\psi) = \pi \cdot a_1 \cdot b_1 = \pi \cdot R^2 \cdot \left(\sqrt{1 - y_2^2} \cdot (1 - \psi) + \psi \right) \cdot \left((1 - y_0) \cdot (1 - \psi) + \psi \right). \tag{17}$$

Площадь расширяющейся внутренней зоны (сечения газового канала) при различной частоте

$$S_0(\psi) = \pi \cdot R^2 \cdot \left[\left(\sqrt{1 - y_2^2} + y_0 - 1 + \frac{d}{R} \right) \cdot \left(y_0 - y_2 + \frac{d}{R} \right) \cdot (1 - \psi) + (1 - \varphi) \cdot \psi \right]. \tag{18}$$

Площадь шароматериальной загрузки, за вычетом площади газового канала, в сечении камеры помола загрузкой при различной частоте

$$S(\psi) = S_1(\psi) - S_0(\psi) = \pi \cdot R^2 \cdot \left[\left(\sqrt{1 - y_2^2} \cdot (1 - \psi) + \psi \right) \cdot \left((1 - y_0) \cdot (1 - \psi) + \psi \right) - \left(\left(\sqrt{1 - y_2^2} + y_0 - 1 + \frac{d}{R} \right) \cdot \left(y_0 - y_2 + \frac{d}{R} \right) \cdot (1 - \psi) + (1 - \varphi) \cdot \psi \right) \right]. \tag{19}$$

Основная часть. Графические зависимости, построенные с использованием выражений (17, 19) для камеры грубого помола ШБМ типоразмера $D \times L = 2 \times 10,5$ м при конструктивных ($R = 0,95$

Выражение площади шароматериальной загрузки, включающей площадь газового канала, в сечении, перпендикулярном продольной оси вращающегося корпуса, при изменяющейся ψ имеет вид:

вращения можно описать следующим выражением:

вращения можно описать следующим выражением:

м; $S_{\text{вн.бар}} = 2,84 \text{ м}^2$) и технологических ($\Omega_{\text{кр}} = 3,21 \text{ с}^{-1}$; $\psi = 0-0,8$; $\varphi = 0,2-0,5$; $d = 7 \times 10^{-2} \text{ м}$) параметрах мельницы, приведены на рисунке 4 и рисунке 5.

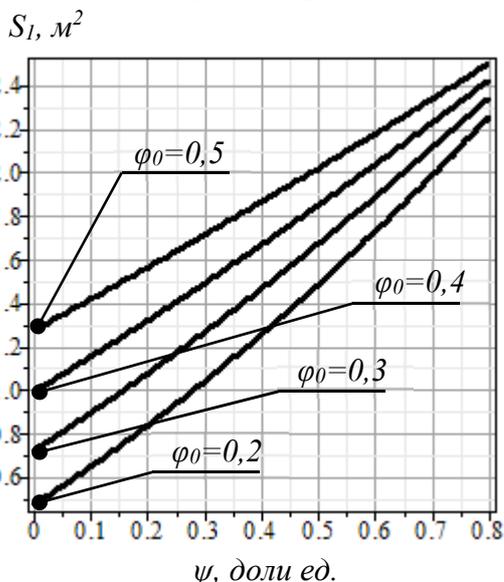


Рис. 4. Графические зависимости изменения S_1 от коэффициента относительной частоты вращения корпуса ψ для различных начальных значений коэффициента загрузки φ_0

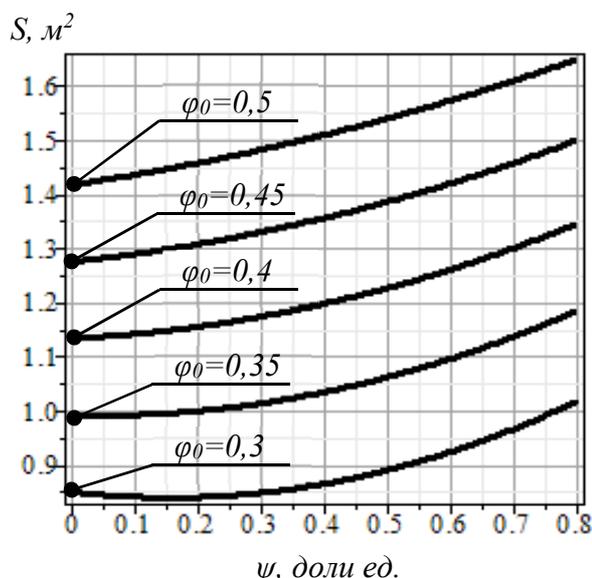


Рис. 5. Графические зависимости изменения S от коэффициента относительной частоты вращения корпуса ψ для различных начальных значений коэффициента загрузки φ_0

Анализ приведенных на рисунке 4 зависимостей показывает, что функция $S_1(\psi)$ на рассматриваемом интервале значений аргумента носит близкий к линейному, возрастающий характер поведения. При статических состояниях корпуса для различных $\varphi_0 = 0,2; 0,3$ и $0,4$ площади S_1 , занимаемые шароматериальной загрузкой и газовым каналом в поперечном сечении корпуса, соответственно составляют $0,568 \text{ м}^2$; $0,851 \text{ м}^2$ и $1,134 \text{ м}^2$. При увеличении коэффициента относительной частоты вращения корпуса до рабочего значения $\psi = \psi_p = 0,76\psi_{кр}$ величины площади S_1 , включающей и площадь сечения газового канала, соответственно увеличиваются до значений $2,145 \text{ м}^2$; $2,25 \text{ м}^2$ и $2,345 \text{ м}^2$.

На рисунке 5 приведены графические зависимости изменения $S(\psi)$, построенные с использованием выражения (19) для ШБМ типоразмера $D \times L = 2 \times 10,5 \text{ м}$ при указанных конструктивных, технологических параметрах и различных начальных значениях коэффициента загрузки φ_0 . Характер поведения функции нелинейный, возрастающий. Площади S , занимаемые только шароматериальной загрузкой, без учета площади сечения газового канала, в поперечном сечении корпуса при его статических состояниях, для значений коэффициента заполнения $\varphi_0 = 0,3; 0,35$ и $0,4$ соответственно составляют $0,85 \text{ м}^2$, $0,99 \text{ м}^2$ и $1,13 \text{ м}^2$. При увеличении коэффициента относительной частоты вращения корпуса до рабочего значения $\psi = \psi_p = 0,76\psi_{кр}$ площади поперечного сечения шароматериальной загрузки S возрастают соответственно до значений $0,99 \text{ м}^2$, $1,16 \text{ м}^2$ и $1,33 \text{ м}^2$. Переход состояния корпуса из статического (при $\psi = 0$ и начальных $\varphi_0 = 0,3; 0,35$ и $0,4$) к рабочему ($\psi = \psi_p = 0,76\psi_{кр}$) приводит к увеличению площади поперечного сечения шароматериальной загрузки из состояния $S_{сез}$ до состояния S - соответственно на 17% ; $17,3 \%$ и $16,94 \%$. Это свидетельствует и о соответственном увеличении значений рабочих коэффициентов загрузки $\varphi = \varphi_p$ при $\psi = \psi_p = 0,76\psi_{кр}$. Указанное увеличение S и φ_p характеризует соответственное увеличение промежутков между рядом расположенными мелющими телами в шароматериальной загрузке. Для организации рационального процесса измельчения они должны быть заполнены материалом. Неполное заполнение измельчаемым материалом этих промежутков приведет к увеличению взаимодействий между МТ, их повышенному удельному износу, снижению эффективности процесса помола материала. Увеличение коэффициента загрузки материала в камере помола, в результате перехода состояния корпуса из статического к рабочему, произойдет в $S/S_{сез}$ раз. Тогда коэффи-

циент загрузки материала в камере помола, соответствующий рабочей относительной частоте вращения $\psi = \psi_p$, можно описать выражением:

$$\varphi_{м.р} = \varphi_0 \cdot (1 - \mu) \cdot S / S_{сез}; \quad (20)$$

где μ – коэффициент разрыхления мелющих тел [2].

Выводы.

1. Показано преимущественное применение ШБМ на промышленных предприятиях для реализации процесса измельчения различных материалов, являющегося одним из наиболее энергозатратных основных технологических процессов. В качестве одного из параметров, позволяющих повысить эффективность процесса измельчения, отмечено рациональное количественное соотношение МТ и размалываемого материала. В результате анализа существующих подходов к определению количества подаваемого в корпус мельницы материала показана целесообразность разработки математического описания, позволяющего определить изменение площади промежутков между МТ в сечении, перпендикулярном продольной оси корпуса при изменении частоты его вращения.

2. Получено математическое описание, позволяющие определить площадь $S_{сез}$ шароматериальной загрузки в сечении камеры помола при не вращающемся корпусе и площадь S шароматериальной загрузки, за вычетом площади газового канала, в сечении камеры помола при различной частоте вращения корпуса.

3. С использованием полученного математического описания выполнены исследования изменения в поперечном сечении камеры помола площади S_1 , занимаемой шароматериальной загрузкой и газовым каналом, а также площади S шароматериальной загрузки, за вычетом площади газового канала, при переходе корпуса из статического состояния в рабочее. Определены закономерности их изменения. Для ШБМ типоразмера $D \times L = 2 \times 10,5 \text{ м}$ при различных значениях коэффициента заполнения мелющих тел φ_0 установлено, что переход состояния корпуса из статического (при $\psi = 0$) к рабочему ($\psi = \psi_p = 0,76\psi_{кр}$) приводит к увеличению площади поперечного сечения шароматериальной загрузки на величину, близкую к 17% . Предложено выражение для определения коэффициента загрузки материала в камере помола, соответствующего его относительной частоте вращения $\psi = \psi_p$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сиваченко Л.А. Пружинные технологические аппараты: монография. Могилев: Белорусско-Российский университет. 2022. 478 с.

2. Богданов В.С. Процессы в производстве строительных материалов. Старый Оскол: ТНТ. 2019. 435 с.
3. Юдин К.А., Романенко В.С. Расчет мощности привода горизонтальной валковой мельницы с внутренним сепаратором // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 389–394. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-390-395.
4. Анциферов С.И., Сычев Е.А., Карачевцева А.А., Обернихин А.А. Усовершенствованная конструкция струйной противоточной мельницы для горнорудной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12-2. С. 17–33. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-122-0-17.
5. Вердиян М.А., Богданов В.С., Тынников И.М. Расчеты критерия конкурентоспособности цементных заводов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №4. С. 119–123.
6. Khanin S.I., Zybin R.V., Ryabukhin V.V Mordovskaja O.S., Khanzarov A.S. Stress State of Internal Classifying Modules in a Pipe Ball Mill Prior to Maintenance // Russ. Engin. Res. 2022. Vol. 42, Pp. 517–519. DOI: 10.3103/S1068798X22050148.
7. Latyshev S.S., Voronov V.V., Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Bazhanova O.I., Maslovskaya A.N. Mathematical modeling of loads movement in lifter of intramill recirculation device inside tubular mill // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Pp. 022046. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022046.
8. Богданов В.С., Анциферов С.И., Сычев Е.А., Богданов Н.Э. Расчет предельного коэффициента загрузки шаровой барабанной мельницы с поперечно-продольным движением мелющих тел // СТИН. 2022. №12. С. 25–28.
9. Богданов В.С. Теоретические основы расчета усовершенствованных конструкций шаровых барабанных мельниц: монография // Старый Оскол: ТНТ. 2023. 360 с.
10. Khanin S.I., Solodovnikov D.N., Lebakh A.V. Determining the loads acting onto a cylindrical classifier of a globe mill // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. No. 1. Pp. 012066. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012066.
11. Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Latyshev S.S., Bogdanov N.E., Vasilenko O.S. Ball mill power calculation with inclined partition // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8. No 3. Pp. 19031–19041.
12. Bogdanov V.S., Dontsova Yu.A., Bogdanov N.E., Fadin Yu.M., Vöth S. Mechanics of crushing medium in ball mills with longitudinal-transverse motion of grinding bodies // ZKG International. 2019. No 6. Pp. 38–44.
13. Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Д.В., Бажанова О.И., Сычев Е.А. Моделирование аспирационных режимов шаровых барабанных мельниц // Цемент и его применение. 2022. №4. С.48–51.
14. Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Д.В., Сычев Е.А. Влияние поперечного профиля футеровки шаровых барабанных мельниц на режим и энергетические параметры работы загрузки // Цемент и его применение. 2022. №2. С. 40–43.
15. Fadin Y.M., Latyshev S.S., Khakhalev P.A., Khakhaleva T.A. Study of the strength characteristics of the support frame of horizontal roller mill IN NX CAE Digital Technologies in Construction Engineering // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 191–199. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8.
16. Дамбра-Очир, И.Д., Кимьяев И.Т., Улитенко К.Я. Принципы построения АСУ ТП измельчения на базе виброакустического анализатора загрузки мельницы ВАЗМ-1 // Цветные металлы. 2003. №10. С. 104–111.
17. Duda W.H. Cement data book. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag. Wiesbaden, 1985. 464 p.
18. Рекомендации по методам технологической наладки, испытанию помольных агрегатов в цементной промышленности. Всесоюзное государственное специализированное бюро по проведению пуско-наладочных и проектно-конструкторских работ в цементной промышленности. Л.: ОРГПРОЕКТЦЕМЕНТ. 1990. 155 с.
19. Науменко Ю.В. Основи теорії режимів роботи барабаних млинів: монографія // Рівне.: СПД Зелент О. І. 2009. 282 с.
20. Шувалов С.И., Михеев П.Г. Распределение мелющих шаров и размалываемого материала в поперечном сечении вращающегося барабана мельницы // Вестник ИГЭУ. 2009. №2. 2009. С. 26–32.

Информация об авторах

Ханзаров Алексей Станиславович, старший преподаватель кафедры электроэнергетики и автоматики. E-mail: hanzarov@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ханин Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: sergiykhinin@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Воронов Виталий Павлович, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: v.p.voronov2018@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мордовская Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий. E-mail: unique.ox@gmail.com. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85.

Чалов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: chalov-v@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 02.08.2023 г.

© Ханзаров А.С., Ханин С.И., Воронов В.П., Мордовская О.С., Чалов В.А., 2023

^{1,*}*Khanzarov A.S.*, ¹*Khanin S.I.*, ¹*Voronov V.P.*, ²*Mordovskaya O.S.*, ¹*Chalov V.A.*

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

²*National Research University "Belgorod State University"*

**E-mail: hanzarov@bk.ru*

DETERMINATION OF MATERIAL LOADING COEFFICIENT IN THE GRINDING CHAMBER OF A BALL DRUM MILL

Abstract. *The predominant application of ball drum mills in industrial enterprises for the comminution process of various materials, which is one of the most energy-intensive basic technological processes, is demonstrated in this scientific article. As one of the parameters that can enhance the efficiency of the comminution process, the rational quantitative ratio of grinding bodies to the material being ground is noted. To calculate the material loading coefficient in the grinding chamber, the feasibility of developing a mathematical description is shown. This allows to determine the change in the area of gaps between grinding bodies in a cross-sectional plane perpendicular to the longitudinal axis of the mill's body, as the rotational frequency changes. A mathematical description is obtained to determine the area of the ball-material load in the cross-sectional plane of the grinding chamber during the static state of the mill's body and at different rotational frequencies. Using this mathematical description, research on the change in the area occupied by the ball-material load in the transverse section of the grinding chamber during the transition of the mill's body from the static state to the operating state is conducted. Regularities of its changes for an industrial-sized mill are determined. At different values of the filling coefficient of grinding bodies, it is established that the transition of the mill's body from static to operating state leads to an increase in the area of the transverse section of the ball-material load by an amount close to 17 %. An expression is proposed to determine the material loading coefficient in the grinding chamber corresponding to its operating rotational frequency.*

Keywords: *grinding chamber, cross-sectional area of the mill corpus, material, grinding bodies, loading coefficient.*

REFERENCES

1. Sivachenko L.A. Spring technological devices [Pruzhinnye tekhnologicheskie apparaty]: monograph. Mogilev: Belarusian-Russian University. 2022. 478 p.
2. Bogdanov V.S. Processes in the production of building materials [Processy v proizvodstve stroitel'nyh materialov]. Staryj Oskol: TNT. 2019. 435 p. (rus)
3. Yudin K.A., Romanenko V. S. Calculation of the drive power of a horizontal roller mill with an internal separator [Raschet moshchnosti privoda gorizontальной valkovej mel'nicy s vnutrennim separatorom]. News of the Tula State University. Technical science. 2021. No. 12. Pp. 389–394. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-390-395. (rus)
4. Antsiferov S.I., Sychev E.A., Karachevtseva A.A., Obernikhin A.A. Advanced design of the countercurrent jet mill for the mining industry [Usovershenstvovannaya konstrukciya strujnoj protivotochnoj mel'nicy dlya gornorudnoj promyshlennosti]. Mining information and analytical bulletin. 2022. No. 12–2. Pp. 17–33. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-122-0-17. (rus)
5. Verdiyana, M.A., Bogdanov V.S., Tynnikov I.M. Calculations of the criterion of competitiveness of cement plants [Raschety kriteriya konkurentosposobnosti cementnyh zavodov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 4. Pp. 119–123. (rus)
6. Khanin S.I., Zybin R.V., Ryabukhin V.V. Mordovskaja O.S., Khanzarov A.S. Stress State of Internal Classifying Modules in a Pipe Ball Mill Prior to Maintenance. Russ. Engin. Res. 2022.

Vol. 42, Pp. 517–519.

DOI: 10.3103/S1068798X22050148.

7. Latyshev S.S., Voronov V.V., Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Bazhanova O.I., Maslovskaya A.N. Mathematical modeling of loads movement in lifter of intramill recirculation device inside tubular mill. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Pp. 022046. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022046.

8. Bogdanov V.S., Antsiferov S.I., Sychev E.A., Bogdanov N.E. Calculation of the limiting load factor of a ball drum mill with a transverse-longitudinal movement of grinding bodies [Raschet predel'nogo koefitsienta zagruzki sharovoy barabannoy mel'nicy s poperechno-prodol'nym dvizheniem melyushchih tel]. STIN. 2022. No. 12. Pp. 25–28. (rus)

9. Bogdanov V.S. Theoretical foundations for calculating improved designs of ball drum mills [Teoreticheskie osnovy rascheta usovershenstvovannykh konstrukcij sharovykh barabannykh mel'nic]: monograph. Staryj Oskol: TNT. 2023. 360 p. (rus)

10. Khanin S.I., Solodovnikov D.N., Lebakh A.V. Determining the loads acting onto a cylindrical classifier of a globe mill. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. No. 1. 012066. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012066.

11. Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Latyshev S.S., Bogdanov N.E., Vasilenko O.S. Ball mill power calculation with inclined partition. International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8. No 3. Pp. 19031–19041.

12. Bogdanov V.S., Dontsova Yu.A., Bogdanov N.E., Fadin Yu.M., Vöth S. Mechanics of crushing medium in ball mills with longitudinal-transverse motion of grinding bodies. ZKG International. 2019. No 6. Pp. 38–44.

13. Bogdanov V.S., Anciferov S.I., Bogdanov D.V., Bazhanova O.I., Sychev E.A. Simulation of aspiration modes of ball drum mills [Modelirovanie aspiratsionnykh rezhimov sharovykh barabannykh mel'nic]. Cement and its application. No. 4. Pp. 48–51. (rus)

14. Bogdanov V.S., Anciferov S.I., Bogdanov D.V., Sychev E.A. Influence of the cross profile of the lining of ball drum mills on the mode and energy parameters of the load [Vliyanie poperechnogo profilya futerovki sharovykh barabannykh mel'nic na rezhim i energeticheskie parametry raboty zagruzki]. Cement and its application. 2022. No. 2. Pp.40–43. (rus)

15. Fadin Y.M., Latyshev S.S., Khakhalev P.A., Khakhaleva T.A. Study of the strength characteristics of the support frame of horizontal roller mill IN NX CAE Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 191–199. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8.

16. Dambra-Ochir, I.D., Kimyaev I.T., Ulitenko K.Ya. Principles of construction of automatic process control system for grinding based on vibroacoustic analyzer of mill loading VAZM-1 [Principy postroeniya ASU TP izmel'cheniya na baze vibroakkusticheskogo analizatora zagruzki mel'nicy VAZM-1]. Non-ferrous metals. 2003. No. 10. Pp. 104–111. (rus)

17. Duda W.H. Cement data book / Wiesbaden, Berlin: Bauverlag. Wiesbaden, 1985. 464 p.

18. Recommendations on the methods of technological adjustment, testing of grinding units in the cement industry [Rekomendacii po metodam tekhnologicheskoy naladki, ispytaniyu pomol'nykh agregatov v cementnoj promyshlennosti]. All-Union State Specialized Bureau for Commissioning and Design Works in the Cement Industry. L.: ORGPROEKTSEMENT, 1990. 155 p. (rus)

19. Naumenko Yu.V. Fundamentals of the theory of modes in robotic drumming: monograph. Rivne : SPD Zelent O. I., 2009. 282 p.

20. Shuvalov S.I., Mikheyev P.G., Distribution of balls and crushed material in cross-section of mill rotating drum [Raspredelenie melyushchih sharov i razmalyvaemogo materiala v poperechnom sechenii vrashchayushchegosya barabana mel'nicy]. Vestnik IGEU. 2009. No. 2. 2009. Pp. 26–32. (rus)

Information about the authors

Khanzarov, Aleksey S. Senior lecturer. E-mail: hanzarov@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Khanin, Sergei I. DSc, Professor. E-mail: sergiykhanin@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Voronov, Vitaly P. Ph.D., Professor. E-mail: v.p.voronov2018@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Mordovskaya, Olga S. PhD, Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technologies. E-mail: unique.ox@gmail.com. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Victory, 85.

Chalov, Vladimir A. Postgraduate student. E-mail: nikolaykikin@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 02.08.2023

Для цитирования:

Ханзаров А.С., Ханин С.И., Воронов В.П., Мордовская О.С., Чалов В.А. Определение коэффициента загрузки материала в камере помола шаровой барабанной мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 9. С. 103–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-103-112

For citation:

Khanzarov A.S., Khanin S.I., Voronov V.P., Mordovskaya O.S., Chalov V.A. Determination of material loading coefficient in the grinding chamber of a ball drum mill. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 9. Pp. 103–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-103-112