

Ханин С.И., канд. техн. наук, проф.,
 Старченко Д.Н., канд. техн. наук, доц.,
 Богданов В.С., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ МОЩНОСТИ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

dh@intbel.ru

Приведены аналитические выражения для расчёта энергий взаимодействия мелющих тел с различными конструкциями внутримельничных устройств и бронефутеровок, позволяющие определять мощность и её составляющие, затрачиваемые на преодоление сил сопротивления при взаимодействии мелющих тел с каждым из внутримельничных устройств и бронефутерованными частями корпуса. Установлены закономерности изменения количественных значений полной мощности и её составляющих, затрачиваемых на преодоление сил сопротивления при взаимодействии мелющих тел с бронефутеровками барабана, днищ; различными конструкциями лопастных энергообменных устройств.

Ключевые слова: шаровая мельница, кинетическая энергия, затрачиваемая мощность, энергообменные устройства.

Введение. Мощность, потребляемая электродвигателем привода шаровой мельницы, является одним из основных характеризующих её параметров. Согласно [1] её значение определяется выражением:

$$P_{эл} = P_б / \eta_m \eta_p, \quad (1)$$

здесь $P_б$ – полная мощность, затрачиваемая на обеспечение вращения корпуса, η_p и η_m – к.п.д. соответственно электродвигателя и механической передачи.

Мощность $P_б$ рассматривается состоящей из затрачиваемых на преодоление сил трения в подшипниковых опорах мощности $P_{п}$ и сил сопротивления при взаимодействии бронефутеровки корпуса и внутримельничных устройств с мелющей загрузкой – мощности P_T :

$$P_б = P_{п} + P_T. \quad (2)$$

Существует достаточно большое количество теорий, позволяющих определить значения мощности, затрачиваемой на преодоление сил сопротивления при взаимодействии бронефутеровки корпуса с мелющими телами (МТ), отличающихся способом получения [1-7]. Выполненный анализ теорий расчёта мощности, потребляемой электродвигателем привода ШМ и дополнительно затрачиваемой на преодоление сил сопротивления при взаимодействии МТ с внутримельничными устройствами показал, что они имеют ограниченное применение для мельниц, оснащённых различными конструкциями внутримельничных энергообменных устройств (ВЭУ), обусловленное ограниченностью рассматриваемых в них конструкций и принимаемыми допущениями.

Основная часть. Воспользуемся для расчёта мощности P_T методикой, основанной на энергетическом принципе [8]. Исходя из её особенностей, к вращающемуся корпусу необходи-

мо подводить энергию, величина которой равна сумме изменений кинетической энергии корпуса в процессе взаимодействия МТ с его бронефутеровкой или внутримельничным устройством:

$$P_T = \sum_{j=1}^n (\Delta E_{it}^б) / t, \quad (3)$$

здесь $\Delta E_{it}^б$ – изменение кинетической энергии корпуса за j -тый удар i -того МТ; t – время определения мощности; n – количество взаимодействий МТ с бронефутеровкой корпуса и внутримельничными устройствами за время t .

$$\Delta E_{it}^б = E_{i2t}^б - E_{i0t}^б;$$

$$\Delta E_{it}^б = I_z \Omega_{2z}^2 / 2 - I_z \Omega_{0z}^2 / 2, \quad (4)$$

здесь Ω_{0z}, Ω_{2z} и $E_{i2t}^б, E_{i0t}^б$ – угловые скорости вращения и кинетические энергии корпуса соответственно до и после взаимодействия МТ либо с бронефутеровкой, либо с внутримельничными устройствами; I_z – момент инерции корпуса относительно его продольной оси Z .

Угловые скорости вращения Ω_{0z}, Ω_{2z} определяются из выражения:

$$\Omega_2 = \frac{S_n (x_s n_y - y_s n_x) + S_\tau (x_s \tau_y - y_s \tau_x)}{I_z} + \Omega_0, \quad (5)$$

здесь x_s, y_s, z_s – координаты общей точки взаимодействия МТ либо с бронефутеровкой, либо с внутримельничными устройствами, в момент его начала, в системе координат корпуса; n_x, n_y, τ_x, τ_y – проекции единичных векторов локальной системы координат; S_n, S_τ – проекции импульса силы взаимодействия на соответствующие оси (рис. 1).

За локальную систему координат принята система координат с началом в точке взаимодействия и направлением осей: n – вдоль норма-

ли взаимодействия, τ – вдоль вектора относительной скорости, b – образует правую тройку векторов с осями n и τ .

$$\Delta E_{it}^{\sigma} = I_z \left(\frac{S_n(x_s n_y - y_s n_x) + S_{\tau}(x_s \tau_y - y_s \tau_x)}{I_z} + \Omega_{0z} \right)^2 / 2 - I_z \Omega_{0z}^2 / 2, \quad (6)$$

Приведём выражение (6) к виду:

$$\Delta E_{it}^{\sigma} = \left[S_n(x_s n_y - y_s n_x) + S_{\tau}(x_s \tau_y - y_s \tau_x) \right]^2 / 2I_z + \Omega_{0z} \left[S_n(x_s n_y - y_s n_x) + S_{\tau}(x_s \tau_y - y_s \tau_x) \right]. \quad (7)$$

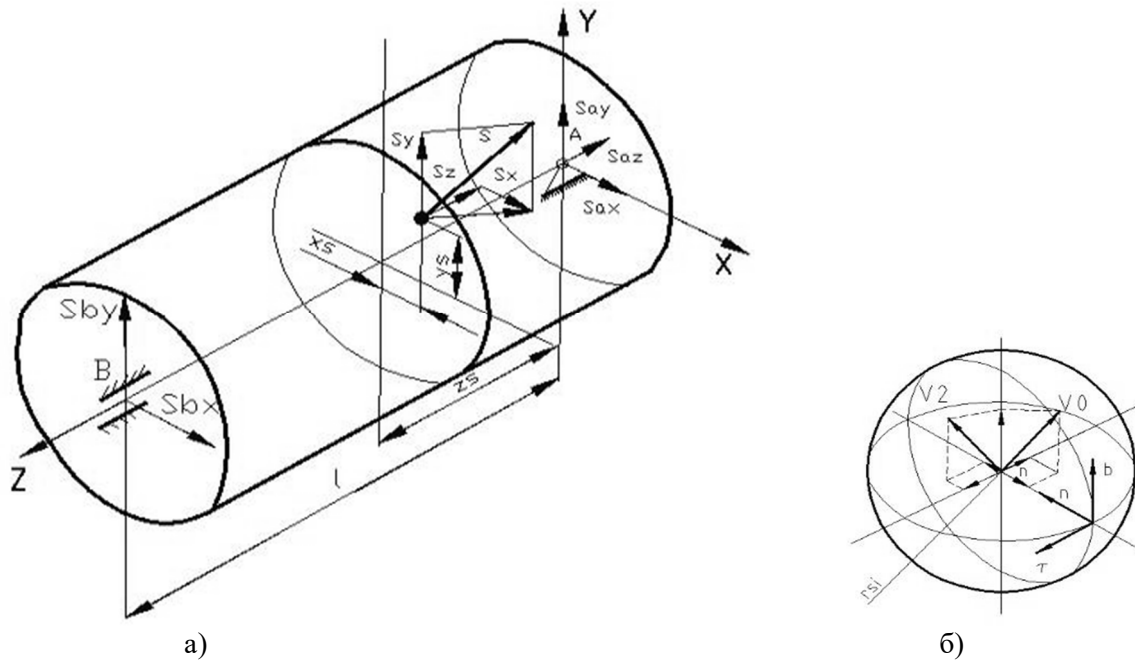


Рис. 1. Схемы к расчёту взаимодействия сферического тела с бронифутеровкой камеры: а – корпус с системами координат; б – сферическое тело в локальной системе координат

В случае взаимодействия МТ с бронифутеровкой конусообразной камеры или с вертикально расположенной перегородкой, в связи с равенством $-(x_s n_y - y_s n_x) = 0$, данное выражение можно упростить:

$$\Delta E_{it}^{\sigma} = \frac{\left[S_{\tau}(x_s \tau_y - y_s \tau_x) \right]^2}{2I_z} + \Omega_{0z} S_{\tau}(x_s \tau_y - y_s \tau_x),$$

$$\Delta E_{it}^{\sigma} = S_{\tau}(x_s \tau_y - y_s \tau_x) \left[\frac{S_{\tau}(x_s \tau_y - y_s \tau_x)}{2I_z} + \Omega_{0z} \right]. \quad (8)$$

Для реализации расчёта мощности, затрачиваемой на преодоление сил сопротивления при взаимодействии МТ с бронифутеровкой камер, днищ и различными конструкциями внутримельничных устройств формируются их начальное положение и положение внутримельничных устройств. После этого производится расчёт процесса движения МТ [9]. При каждом взаимодействии каждого МТ с бронифутеровкой или внутримельничным устройством определяется значение изменения кинетической энергии корпуса в соответствии с (7). Затем, для определения величины мощности, затрачиваемой на преодоление сил сопротивления при взаимодей-

ствии МТ с бронифутеровкой и различными конструкциями внутримельничных устройств, полученные за некоторый промежуток времени t значения суммируются в соответствии с (3).

Результаты проведённых численных экспериментов на компьютере позволяют определить значения энергий всех отдельно взятых МТ, которые передаются им бронифутеровками барабана, днищ, внутримельничными устройствами или другими МТ, либо отводятся от них. Для установления особенностей передачи энергии условно обозначим мощность, затрачиваемую на преодоление сил сопротивления, возникающих при взаимодействии МТ с корпусом мельницы, в случае передачи энергии МТ – «положительной» составляющей мощности; а при передаче энергии от МТ – «отрицательной» составляющей мощности.

Рассмотрим распределение полной мощности, её составляющих, затрачиваемых на преодоление сил сопротивления при взаимодействии МТ с лопастными энергообменными устройствами (ЛЭУ) при установке лопастных эллипсных сегментов (ЛЭС), наклонной межкамерной перегородки (НМП), лопастных эл-

липсных четвертькольцевых устройств (ЛЭЧУ), двухзаходных винтовых лопастей (ДВЛ), наклонных продольных лопастных устройств (НПЛУ) в корпус ШМ и обозначим их условно как: «полная затрачиваемая мощность»; «мощность, затрачиваемая при взаимодействии МТ с барабаном»; «мощность, затрачиваемая при взаимодействии МТ с днищами»; «мощность, затрачиваемая при взаимодействии МТ с ЛЭС»; «мощность, затрачиваемая при взаимодействии МТ с ЛЭУ»; «мощность, затрачиваемая при взаимодействии МТ с НМП»; «мощность, затрачиваемая при

взаимодействии МТ с ЛЭЧУ»; «мощность, затрачиваемая при взаимодействии МТ с НПЛУ»; «мощность, затрачиваемая при взаимодействии МТ с ЛЭУ». Результаты численного компьютерного эксперимента по определению «полной затрачиваемой мощности» и её составляющих, проведённого с использованием разработанной математической модели, описывающей параметры процесса движения МТ, для корпуса ШМ $D \times L = 0,5 \times 0,8$ м при $\varphi = 0,3$; $\psi = 0,76\psi_{кр}$ приведены на рис. 2.

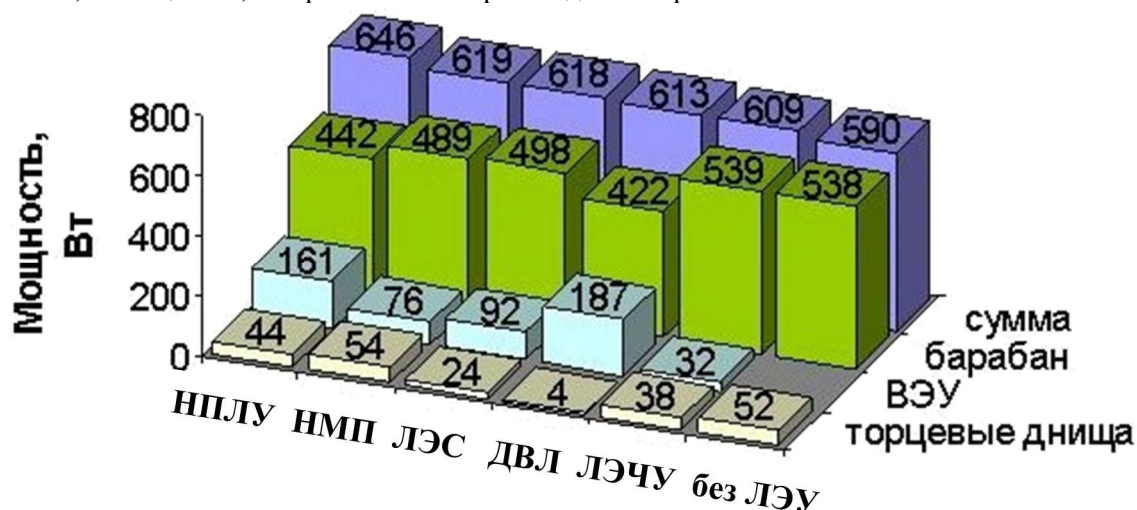


Рис. 2. Распределение «полной затрачиваемой мощности» и её составляющих для ШМ с цилиндрическим корпусом $D \times L = 0,45 \times 0,8$ м, оснащённом различными ЛЭУ, при $\varphi = 0,3$; $\psi = 0,76\psi_{кр}$

Из рисунка следует, что наименьшее значение «полной затрачиваемой мощности» $P = 590$ Вт затрачивается в случае отсутствия в корпусе ЛЭУ. Установка в корпус каких-либо устройств: ЛЭЧУ, ДВЛ, ЛЭС, НМП, НПЛУ приводит к увеличению «полной затрачиваемой мощности» соответственно на 3,2 %; 3,4 %; 4,7 %; 4,9 % и 9,5 %, что указывает на более энергонапряжённые режимы движения МТ. На долю «мощности, затрачиваемой при взаимодействии МТ с днищами» от «полной затрачиваемой мощности» приходится, для рассматриваемых вариантов оснащения корпуса ЛЭУ, от 0,65 % (при установке ДВЛ); до 8,72 % (для варианта с НПЛУ). Расположение ЛЭЧУ, ЛЭС или ДВЛ в корпусе мельницы обеспечивает перемещение части МТ от торцевых днищ, поэтому величины «мощности, затрачиваемой при взаимодействии МТ с днищами» от значений «полной затрачиваемой мощности» составляют меньшие процентные отношения (чем для ШМ без ЛЭУ), соответственно 6,23 %; 3,88 % и 0,65 %. Рассмотренная особенность изменения этой составляющей мощности и меньшие количества МТ в области торцевых днищ указывают на их менее интенсивный износ. При отсутствии ЛЭУ в корпусе ШМ на долю «мощности, затрачиваемой при взаимодействии МТ с днищами» приходит-

ся 52 Вт, что от «полной затрачиваемой мощности» составляет 8,81 % – это указывает на достаточно значимое влияние торцевых днищ на процесс движения МТ.

Наибольшая часть «полной затрачиваемой мощности» для всех рассматриваемых вариантов оснащения корпуса ЛЭУ приходится на долю «мощности, затрачиваемой при взаимодействии МТ с корпусом». Для корпуса без ЛЭУ она является наибольшей – 91,1 %; для корпуса с ПЛУ наименьшей – 68,42 %. При сопоставлении величин «мощности, затрачиваемой при взаимодействии МТ с ЛЭУ» и «мощности, затрачиваемой при взаимодействии МТ с барабаном» с «полной затрачиваемой мощностью» наблюдается закономерность – в случае с уменьшением первой указанной составляющей, вторая составляющая увеличивается. Взаимодействующие с корпусом и внутримельничными энергообменными устройствами МТ перераспределяются между ними при повороте корпуса. Количества взаимодействующих МТ, характеристики их взаимодействия во многом зависят от конструктивных особенностей ЛЭУ и схемы их установки. Это позволяет сделать вывод, что при определении «полной затрачиваемой мощности» для корпуса с ЛЭУ нельзя её рассматривать, с достаточной степенью точности, как

сумму «полной затрачиваемой мощности», рассчитанную для корпуса без ЛЭУ», и «мощности, затрачиваемой при взаимодействии МТ с ЛЭУ», рассчитанную для корпуса с ЛЭУ.

Величины средних значений «мощности, затрачиваемой при взаимодействии МТ с ЛЭУ» составляют от «полной затрачиваемой мощности» при установки в корпус ШМ: ЛЭЧУ, ДВЛ, ЛЭС, НМП, НПЛУ соответственно – 5,25 %; 30,5 %; 14,88 %; 12,27 %; 24,92 %. Эти величины характеризуют интенсивность взаимодействия устройств с мелющей загрузкой.

Выводы. Получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать для вращающегося корпуса мельницы энергии взаимодействия МТ с различными конструкциями внутримельничных устройств и бронефутеровок. Энергетическая оценка каждого взаимодействия МТ позволяет определять мощность и её составляющие, затрачиваемые на преодоление сил сопротивления при взаимодействии МТ с каждым из внутримельничных устройств и бронефутерованными частями корпуса.

В результате проведённых исследований на примере корпусов ШМ с цилиндрическими барабанами $D \times L = 0,45 \times 0,8$ м, оснащённых различными лопастными энергообменными устройствами (ЛЭС, НМП, ЛЭЧУ, ДВЛ, НПЛУ) и без них при $\varphi = 0,3$; $\psi = 0,76\psi_{кр}$ установлены закономерности изменения количественных значений «полной затрачиваемой мощности» и её составляющих, затрачиваемых на преодоление сил сопротивления при взаимодействии МТ с барабаном, днищами, ЛЭУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Севостьянов В.С. Энергосберегающие помольные агрегаты // Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. 435 с.

2. Романович А.А. К вопросу расчета мощности, потребляемой мельницей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 74–77.

3. Шарапов, Р.Р. Шаровые мельницы замкнутого цикла // Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. 299 с.

4. Олевский В.А. О расходе энергии в шаровых и стержневых барабанных мельницах // Известия ВУЗов. Горный журнал. 1981. №11. С.50–56.

5. Образцов Г.П. Расчёт полезной мощности барабанной мельницы в водопадном режиме // Известия ВУЗов. Горный журнал. 1977. №9. С.144–147.

6. Морозов Е.Ф. Метод определения полезной мощности шаровой мельницы при водопадном режиме // Обогащение руд. 1971. №5. С. 30–34.

7. Морозов Е.Ф. Полезная мощность, расходуемая шаровой мельницей при каскадном режиме // Известия ВУЗов. Горный журнал. 1971. №12. С. 52–56.

8. Воробьёв Н.Д., Ельцов М.Ю., Самойлова С.К. Метод расчёта полезной мощности, потребляемой трубными мельницами // Ускорение научно-технического прогресса в промышленности строительных материалов и строительной индустрии. Белгород, 1987. С. 47-48.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ №2012615855. Система расчёта и визуализации параметров движения мелющих тел в корпусе шаровой барабанной мельницы / Старченко Д.Н., Ханин С.И., Трухачев С.С.; заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова; №2012613407, заявлено 27.04.2012; зарегистрировано 27.06.2012.

Khanin S. I., Starchenko D. N., Bogdanov V. S.

ENERGY CALCULATION OF POWER REQUIRED FOR THE PROPULSION GRINDING MEDIA IN A BALL MILL

Exemplify of analytical expressions for calculation of interaction energies of grinding media with different kind of designs devices inside of mill and linings. This calculation enable determine power and components of power, which expend for overcome the resistance forces in the interaction of grinding media with each of devices inside of mill and with linings of shell. The regularities of changes in the quantitative values of the total power and components of power, which expend for overcome the resistance forces in the interaction of grinding media with linings of shell, with bottom, with different designs of blade of energy-exchange devices.

Key words: Ball Mill, kinetic energy, grinding media, expended power, energy-exchange devices.