

Уральский В. И., канд. техн. наук, доц.,
Севостьянов В. С., д-р техн. наук, проф.,
Уральский А. В., канд. техн. наук,
Синица Е. В., канд. техн. наук

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПОМОЛЬНОГО АГРЕГАТА

v.s_bogdanov@mail.ru

В статье представлены теоретические исследования энергозатрат на измельчение материалов в центробежном агрегате с параллельными помольными блоками. Рассмотрены вопросы определения кинетической энергии, необходимой для разрушения материала до требуемой удельной поверхности, обеспечения движения мелющих тел, а также движения помольных блоков агрегата.

Ключевые слова: помольный агрегат, селективное воздействие, параллельные помольные блоки, мелющие тела, энергия разрушения, кинетическая энергия.

В разработанном помольном агрегате [1] осуществляется рациональная организация процесса измельчения за счет обеспечения различных траекторий движения помольных камер для соответствующих режимов их работы. При грубом помоле необходима интенсивная ударная нагрузка и частичное истирание, что обеспечивается в верхних камерах, совершающих возвратно-поступательное движение. При тонком помоле необходима ударная нагрузка с увеличением степени истирания, что осуществляется в средних камерах, движущихся по эллиптической траектории. При сверхтонком помоле необходимо интенсивное истирание, что происходит в

$$\varepsilon = 6 \cdot 10^5 \left(\ln \frac{S}{S_0} + \ln \frac{S_m - S_0}{S_m - S} \right) + 7 \cdot 10^9 l \rho S_m \ln \frac{S_m - S_0}{S_m - S} + 6 \cdot 10^8 l^2 \rho^2 S_m^2 \left(\frac{S - S_0}{S_m} - \ln \frac{S_m - S_0}{S_m - S} \right), \quad (1)$$

где ε – энергия, сообщаемая единице объема разрушаемого тела, Дж/м³; ρ – истинная плотность разрушаемого тела, кг/м³; S – удельная поверхность готового продукта, м²/кг; S_0 – удельная поверхность твердого тела до его измельчения, м²/кг; S_m – удельная поверхность предельно измельченного материала, м²/кг; l – толщина деформируемого слоя, не зависящая от размеров частиц, м.

При постоянном режиме измельчения

$$\varepsilon = \frac{Pt}{V} = \frac{\Delta A}{V} = \frac{\Delta T}{V}, \quad (2)$$

где P – мощность, необходимая для измельчения, Вт; t – продолжительность процесса измельчения, с; V – объем обрабатываемого материала, м³; ΔA – работа, затрачиваемая на измельчение, Дж; ΔT – кинетическая энергия, обеспечивающая выполнение работы ΔA , Дж.

Кинетическая энергия T (Дж), которую необходимо сообщить мелющим телам, чтобы обеспечить их движение и разрушение материала, равна

нижних камерах за счет их движения по круговой траектории.

В связи с различным динамическим воздействием мелющих тел на материал необходимо определить затраты энергии, требуемой для измельчения, в соответствующих камерах агрегата.

Применительно к созданному центробежному помольному агрегату, работающему в режимах тонкого и сверхтонкого помола, наиболее целесообразно использование зависимости между затратами энергии ε и результатами измельчения в широком диапазоне дисперсности [2, 3].

$$T = \Delta T + T', \quad (3)$$

где ΔT – кинетическая энергия, которая передается измельчаемому материалу объема V для его разрушения, Дж; T' – кинетическая энергия движения мелющих тел, Дж;

Величина ΔT определяется в соответствии с выражением (2) $\Delta T = \varepsilon \cdot V$.

Таким образом, при известной величине ΔT для определения полной работы, требуемой для осуществления процесса измельчения в созданном помольном агрегате, необходимо установить затраты кинетической энергии, обеспечивающие движение рабочих камер агрегата и мелющих тел в каждой камере.

Для определения кинетической энергии помольного агрегата следует рассмотреть рычажный механизм агрегата как механизм с переменными массами звеньев, в структуру которого входят звенья с переменными инерционными характеристиками [4].

В общем случае кинетическая энергия некоторого звена j с переменной массой определяется выражением

$$T_j = T_{S_j} + \frac{m_j v_{S_{jпер}}^2}{2} - \frac{m_j v_{S_{jотн}}^2}{2}, \quad (4)$$

где T_j – кинетическая энергия звена j относительно неподвижной системы координат, Дж; T_{S_j} – кинетическая энергия звена j относительно центра масс S_j , Дж; m_j – масса звена j , кг; $v_{S_{jпер}}$ – переносная скорость, м/с; $v_{S_{jотн}}$ – относительная скорость (скорость перемещения центра масс относительно звена, которая зависит только от изменения массы звена), м/с.

В исследуемом помольном агрегате звеньями с переменными инерционными характеристиками являются помольные блоки, в камерах которых движется мелющая загрузка. Причем, массу мелющей загрузки в каждой камере считаем постоянной, тогда $v_{S_{jотн}} = 0$.

Таким образом, необходимо рассмотреть движение помольных блоков относительно неподвижной системы координат XAY и движение мелющей загрузки в каждой камере относительно подвижных систем координат, связанных с помольными камерами (рис. 1).

В общем виде суммарная кинетическая энергия помольных блоков будет определяться выражением

$$T_{пб}(\varphi) = T_I(\varphi) + T_{II}(\varphi) + \sum_{i=1}^3 T_i(\varphi) + \sum_{j=1}^3 T_j(\varphi), \quad (5)$$

где $T_I(\varphi)$ и $T_{II}(\varphi)$ – кинетическая энергия помольных блоков I и II без мелющей загрузки, Дж; $\sum_{i=1}^3 T_i(\varphi)$ и $\sum_{j=1}^3 T_j(\varphi)$ – суммарная кинетическая энергия мелющей загрузки в камерах помольных блоков I и II относительно подвижных систем координат, Дж;

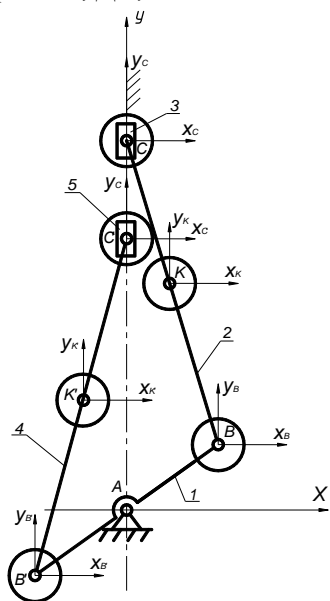


Рис. 1. Схема расположения систем координат на звеньях рычажного механизма

В верхних камерах агрегата, совершающих возвратно-поступательное движение, кинетическая энергия T_1 (Дж) согласно (3) будет определяться выражением

$$T_1 = \Delta T_1 + T_1', \quad (6)$$

где T_1' – кинетическая энергия поступательного движения мелющих тел, Дж (рис. 2).

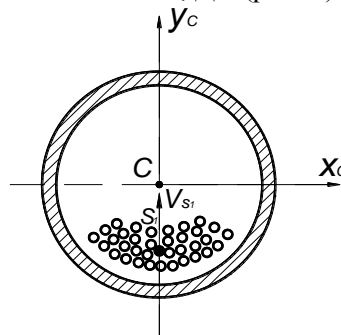


Рис. 2. Схема движения мелющих тел в верхних камерах агрегата

Величина T_1' может быть определена по формуле

$$T_1' = \frac{M_1 v_{S1}^2}{2}, \quad (7)$$

где M_1 – суммарная масса мелющих тел в камере, кг; v_{S1} – скорость центра масс мелющей загрузки в системе координат, связанной с камерой (начало в центре камеры), м/с.

В соответствии с проведенными ранее исследованиями [5, 6] аналоги скоростей центров масс мелющей загрузки в верхних камерах агрегата определяются выражениями:

для камеры помольного блока I, расположенной на подвижной раме 2 (рис. 1),

$$v_{S1}^{(I)}(\varphi) = -eR \left[\sin \varphi_0 - \frac{\sin \varphi_0 \cos \varphi_0}{\sqrt{v^2 - \sin^2 \varphi_0}} \right]; \quad (8)$$

для камеры помольного блока II, расположенной на подвижной раме 4,

$$v_{S1}^{(II)}(\varphi) = -eR \left[\sin(\varphi_0 + \alpha) - \frac{\sin(\varphi_0 + \alpha) \cos(\varphi_0 + \alpha)}{\sqrt{v^2 - \sin^2(\varphi_0 + \alpha)}} \right], \quad (9)$$

где φ_0 – угол поворота эксцентрикового вала I (рис. 1), град.; e – величина эксцентриситета валов, м; R – коэффициент восстановления скорости при ударе (для реальных условий $0 \leq R < 1$); v – коэффициент относительной длины шатуна; α – угол установки эксцентриковых валов, град.

В нижних камерах агрегата, совершающих круговое движение, кинетическая энергия T_3 (Дж) согласно (3) будет определяться выражением

$$T_3 = \Delta T_3 + T_3', \quad (10)$$

где T_3' – кинетическая энергия вращательного движения мелющих тел относительно геометрического центра камеры, Дж (рис. 3).

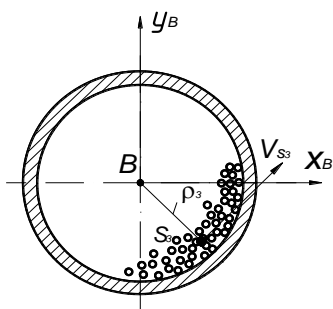


Рис. 3. Схема движения мелющих тел в нижних камерах агрегата

Величина T_3' может быть определена по формуле

$$T_3' = \frac{J_{M3} \omega_3^2}{2} = \frac{M_3 v_{S3}^2}{2}, \quad (11)$$

где J_{M3} – момент инерции совокупности мелющих тел относительно продольной оси камеры, кг·м²; ω_3 – угловая скорость обкатывания мелющих тел по цилиндрической поверхности камеры, с⁻¹; M_3 – суммарная масса мелющих тел в камере, кг; v_{S3} – скорость центра масс мелющей загрузки в системе координат, связанной с камерой (начало в центре камеры), м/с.

Наиболее целесообразно для нахождения кинетической энергии использовать линейную скорость центра масс загрузки, которая определяется по аналогу скорости $v_{S3}(\varphi)$ через нормальную $v_{S3x}(\varphi)$ и тангенциальную $v_{S3y}(\varphi)$ составляющие [5]:

$$v_{S3}(\varphi) = \sqrt{[v_{S3x}(\varphi)]^2 + [v_{S3y}(\varphi)]^2}; \quad (12)$$

$$v_{S3x}(\varphi) = \frac{(M_3 - RM)u_{S3x}(\varphi) + M(1 + R)v_{Bx}(\varphi)}{M_3 + M};$$

$$v_{S3y}(\varphi) = \frac{[M_3 + M(1 - \lambda)]u_{S3y}(\varphi) + v_{By}(\varphi)M\lambda}{M_3 + M}, \quad (13)$$

где M_3 – масса шаровой загрузки в камере, кг; M – масса подвижной рамы, кг; $u_{S3x}(\varphi)$ – нормальная составляющая аналога доударной скорости центра масс шаровой загрузки, м; $u_{S3y}(\varphi)$ – касательная составляющая аналога доударной скорости центра масс шаровой загрузки, м; $v_{Bx}(\varphi)$ – нормальная составляющая аналога скорости корпуса камеры, м; $v_{By}(\varphi)$ – касательная составляющая аналога скорости корпуса камеры, м; λ – коэффициент вязкого трения.

Нормальная и касательная составляющие аналога скорости корпуса камеры помольного блока I (точки B, рис. 1):

$$v_{Bx}^{(I)}(\varphi) = -e \sin \varphi_0; v_{By}^{(I)}(\varphi) = e \cos \varphi_0. \quad (14)$$

Нормальная и касательная составляющие аналога скорости корпуса камеры помольного блока II (точки B', рис. 1):

$$v_{Bx}^{(II)}(\varphi) = -e \sin(\varphi_0 + \alpha);$$

$$v_{By}^{(II)}(\varphi) = e \cos(\varphi_0 + \alpha). \quad (15)$$

В средних камерах агрегата, совершающих движение по эллиптической траектории кинетическая энергия T_2 (Дж) согласно (3) будет определяться выражением

$$T_2 = \Delta T_2 + T_2', \quad (16)$$

где T_2' – кинетическая энергия движения мелющих тел относительно геометрического центра камеры, Дж (рис. 4).

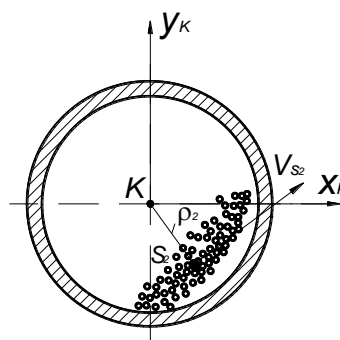


Рис. 4. Схема движения мелющих тел в средних камерах агрегата

Величина T_2' может быть найдена по формуле

$$T_2' = \frac{M_2 v_{S2}^2}{2}, \quad (17)$$

где M_2 – суммарная масса мелющих тел в камере, кг; v_{S2} – скорость центра масс мелющей загрузки в системе координат, связанной с камерой (начало в центре камеры), м/с.

Скорость центра масс загрузки также будет определяться по аналогу скорости $v_{S2}(\varphi)$ через нормальную $v_{S2x}(\varphi)$ и тангенциальную $v_{S2y}(\varphi)$ составляющие:

$$v_{S2}(\varphi) = \sqrt{[v_{S2x}(\varphi)]^2 + [v_{S2y}(\varphi)]^2}; \quad (18)$$

$$v_{S2x}(\varphi) = \frac{(M_2 - RM)u_{S2x}(\varphi) + M(1 + R)v_{Kx}(\varphi)}{M_2 + M};$$

$$v_{S2y}(\varphi) = \frac{[M_2 + M(1 - \lambda)]u_{S2y}(\varphi) + v_{Ky}(\varphi)M\lambda}{M_2 + M}, \quad (19)$$

где M_2 – масса шаровой загрузки в камере, кг; M – масса подвижной рамы, кг; $u_{S2x}(\varphi)$ – нормальная составляющая аналога доударной скорости центра масс шаровой загрузки, м; $u_{S2y}(\varphi)$ – касательная составляющая аналога доударной скорости центра масс шаровой загрузки, м; $v_{Kx}(\varphi)$ – нормальная составляющая аналога скорости корпуса камеры, м; $v_{Ky}(\varphi)$ – касательная составляющая аналога скорости корпуса камеры, м.

Нормальная и касательная составляющие аналога скорости корпуса камеры помольного блока I (точки K , рис. 1):

$$v_{Kx}^{(I)}(\varphi) = -e \left[\sin \varphi_0 + \xi_1 v \sin(\varphi_0 + \varphi_1) \frac{d\varphi_1}{d\varphi_0} \right];$$

$$v_{Kx}^{(II)}(\varphi) = -e \left[\sin(\varphi_0 + \alpha) + \xi_2 v \sin[(\varphi_0 + \alpha) + \varphi_3] \frac{d\varphi_3}{d\varphi_0} \right];$$

$$v_{Ky}^{(II)}(\varphi) = e \left[\cos(\varphi_0 + \alpha) + \xi_2 v \cos[(\varphi_0 + \alpha) + \varphi_3] \frac{d\varphi_3}{d\varphi_0} \right]. \quad (21)$$

где $\frac{d\varphi_1}{d\varphi_0} = \frac{\cos \varphi_0}{v \cos(\varphi_0 + \varphi_1)}$ – аналог угловой скорости рамы помольного блока I; $\frac{d\varphi_3}{d\varphi_0} = \frac{\cos \varphi_0}{v \cos(\varphi_0 + \alpha + \varphi_3)}$ – аналог угловой скорости рамы помольного блока II.

Суммарная кинетическая энергия T_{Σ} , необходимая для обеспечения движения мелющих тел и разрушения материала в камерах агрегата, будет равна:

$$T_{\Sigma} = \sum_1^3 T_i + \sum_1^3 T_j, \quad (22)$$

где $\sum_1^3 T_i$ – суммарная кинетическая энергия движения мелющих тел в камерах помольного блока I, Дж; $\sum_1^3 T_j$ – суммарная кинетическая энергия движения мелющих тел в камерах помольного блока II, Дж.

$$\sum_1^3 T_i = (T_1^{(I)} + T_2^{(I)} + T_3^{(I)}) + V(\varepsilon_1^{(I)} + \varepsilon_2^{(I)} + \varepsilon_3^{(I)}),$$

$$\sum_1^3 T_j = (T_1^{(II)} + T_2^{(II)} + T_3^{(II)}) + V(\varepsilon_1^{(II)} + \varepsilon_2^{(II)} + \varepsilon_3^{(II)}), \quad (23)$$

где $T_1^{(I)}, T_2^{(I)}, T_3^{(I)}$ и $T_1^{(II)}, T_2^{(II)}, T_3^{(II)}$ – кинетическая энергия собственно движения мелющих тел соответственно в верхней, средней и нижней камерах помольных блоков I и II, определяемая в соответствии с выражениями (7), (17) и (11);

$$J_{IIA} = J_1 + m_2 \left(\frac{v_{S2}}{\omega} \right)^2 + m_3 \left(\frac{v_{S3}}{\omega} \right)^2 + m_4 \left(\frac{v_{S4}}{\omega} \right)^2 + m_5 \left(\frac{v_{S5}}{\omega} \right)^2 + J_{S2} \left(\frac{\omega_2}{\omega} \right)^2 + J_{S4} \left(\frac{\omega_4}{\omega} \right)^2, \quad (25)$$

где J_1 – суммарный момент инерции эксцентриковых валов, промежуточного вала, зубчатых колес и шкива-маховика ($J_1 = \text{const}$), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; J_{S2} и J_{S4} – моменты инерции помольных блоков I и II (без мелющих тел и материала, $J_{S2} = \text{const}$, $J_{S4} = \text{const}$), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; m_2 и m_4 – массы помольных блоков I и II (без мелющих тел и материала), кг ; m_3 и m_5 – массы ползунов, кг ; v_{S2} и v_{S4} – скорости центров масс помольных блоков I и II, м/с ; v_{S3} и v_{S5} – скорости

$$J_{IIA} = J_1 + m_2 [v_{S2}(\varphi)]^2 + m_4 [v_{S4}(\varphi)]^2 + J_{S2} [\omega_2(\varphi)]^2 + J_{S4} [\omega_4(\varphi)]^2, \quad (26)$$

$$v_{Ky}^{(I)}(\varphi) = e \left[\cos \varphi_0 + \xi_1 v \cos(\varphi_0 + \varphi_1) \frac{d\varphi_1}{d\varphi_0} \right] \quad (20)$$

Нормальная и касательная составляющие аналога скорости корпуса камеры помольного блока II (точки K' , рис. 1):

$\varepsilon_1^{(I)}, \varepsilon_2^{(I)}, \varepsilon_3^{(I)}$ и $\varepsilon_1^{(II)}, \varepsilon_2^{(II)}, \varepsilon_3^{(II)}$ – энергия, необходимая для разрушения единицы объема материала, соответственно в верхней, средней и нижней камерах помольных блоков I и II, определяемая выражением (1), Дж/м^3 ; V – объем измельчаемого материала в каждой камере (при условии равенства объемов), м^3 .

При одинаковых режимах измельчения материала в помольных блоках будем иметь:

$$\varepsilon_1^{(I)} = \varepsilon_1^{(II)} = \varepsilon_1; \varepsilon_2^{(I)} = \varepsilon_2^{(II)} = \varepsilon_2; \varepsilon_3^{(I)} = \varepsilon_3^{(II)} = \varepsilon_3.$$

Кроме работы, необходимой для обеспечения движения мелющих тел и разрушения материала, требуется работа A_{IIA} для осуществления движения подвижных частей агрегата, равная их суммарной кинетической энергии T_{IIA} .

Кинетическая энергия T_{IIA} может быть определена по формуле

$$T_{IIA} = \frac{J_{IIA} \omega^2}{2}, \quad (24)$$

где J_{IIA} – приведенный момент инерции подвижных частей помольного агрегата, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; ω – угловая скорость звена приведения (эксцентрикового вала I, рис. 1), с^{-1} .

Приведенный момент инерции для механизма помольного агрегата имеет следующий вид [7]

центров масс ползунов, м/с ; ω_2 и ω_4 – угловые скорости помольных блоков I и II в сложном плоскопараллельном движении, с^{-1} .

Принимая $m_3 \approx 0$ и $m_5 \approx 0$, т.к. массы ползунов значительно меньше масс помольных блоков, и выражая скорости центров масс и угловые скорости помольных блоков через соответствующие аналоги, получим следующее выражение для определения приведенного момента инерции J_{IIA} :

где $v_{S2}(\varphi) = v_{S2} / \omega$ – аналог скорости центра масс помольного блока I, м; $v_{S4}(\varphi) = v_{S4} / \omega$ – аналог скорости центра масс помольного блока II, м; $\omega_2(\varphi) = \omega_2 / \omega$ – аналог угловой скорости помольного блока I; $\omega_4(\varphi) = \omega_4 / \omega$ – аналог угловой скорости помольного блока II.

Считая, что центры масс помольных блоков I и II сосредоточены соответственно в точках K и K' (рис. 1), определяем величины $v_{S2}(\varphi)$ и $v_{S4}(\varphi)$ по выражениям (20), (21).

Полная кинетическая энергия, необходимая для работы помольного агрегата равна сумме кинетической энергии T_{Σ} , необходимой для обеспечения движения мелющих тел и разрушения материала в камерах агрегата, и кинетической энергии $T_{ПА}$ для обеспечения движения помольных блоков, т.е.

$$T_{\text{полн}}(\varphi) = T_{\Sigma}(\varphi) + T_{ПА}(\varphi). \quad (27)$$

Для получения аналитического выражения, определяющего $T_{\text{полн}}(\varphi)$, примем некоторые допущения. Так как коэффициент вязкого трения λ и коэффициент восстановления при ударе R изменяются в пределах $0 \leq \lambda < 1$ и $0 \leq R < 1$, допустим, что $\lambda \approx 0,5$ и $R \approx 0,5$. Примем, что величины проекций доударных скоростей мелющей загрузки

$$T(\varphi) = E + \omega^2 \left\{ \frac{M_{\kappa}}{4} \left[v_C^2(\varphi) + \frac{1}{(k_m + 1)^2} (9v_{Kx}^2(\varphi) + v_{Ky}^2(\varphi) + 9v_{Bx}^2(\varphi) + v_{By}^2(\varphi)) \right] + \frac{1}{2} [J_1 + 2Mv_{SP}^2(\varphi) + 2J\omega_P^2(\varphi)] \right\}, \quad (28)$$

где E – энергия разрушения материала в камерах агрегата, Дж; ω – угловая скорость эксцентриковых валов, c^{-1} ; $k_m = \frac{M_{\kappa}}{M}$ – коэффициент (рекомендуемое значение $k_m = 0,2$ при коэффициенте загрузки камер $\psi = 0,3$).

Расчеты мощности, необходимой для измельчения, например, кварцитопесчаника, выполненные с использованием выражения (28), показали, что удельные энергозатраты в разработанном центробежном помольном агрегате в 2-3 раза меньше по сравнению с вибрационными мельницами при одинаковых величинах производительности и характеристиках исходного и конечного продуктов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2381837 Российская Федерация, В 02С 17/08. Помольно-смесительный агрегат / Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Уральский В.И., Уральский А.В., Сеница Е.В.; заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет, ООО «ТК РЕЦИКЛ»; опублик. 20.02.2010, Бюл. №5.
2. Ходаков, Г.С. Физика измельчения / Г.С. Ходаков. – М.: Наука, 1972. – 307 с.
3. Шуляк, В.А. Классификация механических методов измельчения и дробления дисперсных

ки в средней и нижней камерах агрегата существенно меньше величин послеударных скоростей, т.е. в формулах (12) и (18) $u_{S2x} \approx 0$, $u_{S2y} \approx 0$, $u_{S3x} \approx 0$ и $u_{S3y} \approx 0$. Из кинематического анализа рычажного механизма очевидно, что $\bar{v}_C = -\bar{v}_{C'}$; $\bar{v}_{Kx} = -\bar{v}_{K'x}$; $\bar{v}_{Ky} = -\bar{v}_{K'y}$; $\bar{v}_{Bx} = -\bar{v}_{B'x}$; $\bar{v}_{By} = -\bar{v}_{B'y}$. Скорости центров масс подвижных рам помольных блоков I и II $\bar{v}_{SPI} = -\bar{v}_{SPII} = |v_{SP}|$, угловые скорости рам $\bar{\omega}_{PI} = -\bar{\omega}_{PII} = |\omega_P|$. Массы мелющих загрузок во всех помольных камерах примем одинаковыми, т.е. $M_1 = M_2 = M_3 = M_{\kappa}$. Массы подвижных рам помольных блоков I и II с закрепленными на них корпусами камер $M_I = M_{II} = M$. Осевые моменты инерции рам помольных блоков I и II с закрепленными на них корпусами камер $J_I = J_{II} = J$.

В результате получаем выражение для определения кинетической энергии $T(\varphi)$ (Дж), необходимой для измельчения материала объемом $6V$ от начальной удельной поверхности S_0 до конечной удельной поверхности S при работе агрегата в непрерывном режиме.

материалов / В.А. Шуляк, Л.А. Сиваченко // Технологические проблемы измельчения и механоактивации: Материалы научно-технического семинара стран содружества, – Могилев, 1992. – С. 254–259

4. Ануриев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах / В.И. Ануриев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1979.

5. Уральский, А.В. Вопросы динамического исследования центробежного помольно-смесительного агрегата / В.С. Севостьянов, В.И. Уральский, Е.В. Сеница, А.В. Уральский // Вибрационные машины и технологии: Сборник научных трудов / редкол: С.Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.]; Курский гос. техн. ун-т. – Курск, 2008. – С.596–601.

6. Уральский, А.В. Влияние движения мелющей загрузки на динамику центробежного помольно-смесительного агрегата / А.В. Уральский, Е.В. Сеница, А.В. Плетнев // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии: Сборник докладов Международной научно-практической конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2007. – С. 188–192

7. Крейнин, Г.В. Кинематика, динамика и точность механизмов: Справочник / Под ред. Г.В. Крейна. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.