

Ю. В. Наumenко, д-р техн. наук, доц.

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ»

Ровно, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ВНУТРИКАМЕРНОЙ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Разработана модель трехфазного движения загрузки рабочей камеры мельницы. Приняты безразмерные критерии для оценки производительности и энергетической эффективности рабочего процесса. Установлены рациональные технологические и конструктивные параметры барабанных мельниц при реализации многостадийного измельчения.

Традиционная теория рабочих процессов барабанных мельниц основывается на двухфазном «водопадном» режиме движения загрузки. Считается, что измельчение осуществляется лишь ударным действием при переходе элементов с параболических на круговые траектории [1-4]. Однако исследования выявили существенное расхождение гипотезы с экспериментальными данными. Были предприняты отдельные попытки создания теории трехфазного режима движения загрузки [5-8], не увенчавшиеся успехом.

Картину установившегося движения загрузки при стационарном вращении барабана (рис. 1) можно условно разделить на три зоны.

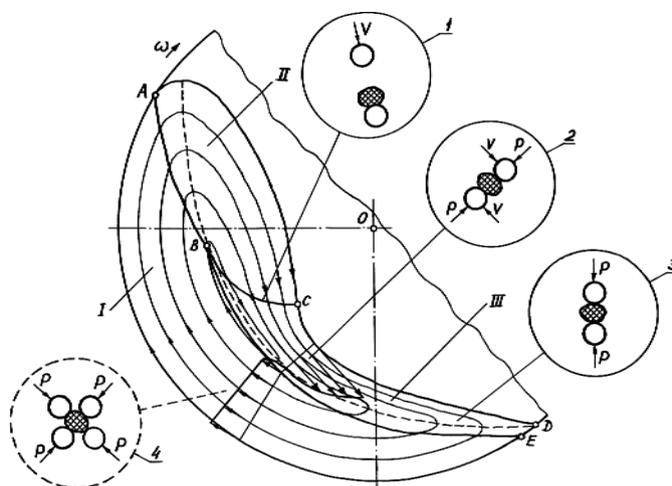


Рис. 1. Реализация измельчения в барабанных мельницах: I – твердотельная зона загрузки; II – зона несвободного падения; III – сдвиговый слой: 1 – измельчение ударным действием; 2 – истиранием; 3 – разнонаправленным раздавливанием; 4 – частичным вертикальным раздавливанием

Первая твердотельная зона возникает вблизи поверхности камеры, вторая зона несвободного падения элементов – в верхней части камеры, третья зона сдвигового потока – вблизи свободной поверхности в нижней части загрузки. С ростом скорости массовые доли второй и третьей зон возрастают за счет первой зоны. С приближением скорости к критическому значению, вторая зона стремится к максимуму, а третья – к нулю.

Процесс измельчения преимущественно ударным действием осуществляется на границе ВС перехода между второй и третьей зонами. Основной процесс измельчения преимущественно истиранием осуществляется в верхней части третьей зоны при быстром течении со значительным градиентом. Процесс измельчения преимущественно разнонаправленным раздавливанием возникает в нижней части третьей зоны при замедлении потока. Кроме того, в нижней части первой зоны могут иметь место локальные очаги измельчения частичным вертикальным раздавливанием.

Для анализа влияния режима движения загрузки на процесс измельчения были использованы выбранные безразмерные параметры движения, принятые в качестве критериев эффективности измельчения [9]. Они характеризуют массовое распределение зон загрузки $K_{ба}$, $K_{за}$ и $K_{п}$, ее обрабатываемость $K_о$, скорости и удельные энергии $E_б$, T и $E_з$ характерных зон загрузки, относительный момент и мощность $\psi_{N0.5}$ сопротивления приводу загруженного барабана.

Был разработан алгоритм определения параметров движения загрузки на основе аналитико-экспериментального метода. Получены зависимости координат x и y линии скольжения АВ в параметрической форме:

$$y = b \sin(\alpha - \varphi) \frac{\sin 2\Omega}{\sin \alpha \mp \sin \varphi \sin(2\Omega + \alpha)},$$

$$x_{1,2} = \frac{2b \sin \alpha \sin(\alpha - \varphi)}{\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi} \left\{ \frac{[\pm \cos \varphi (\mp \sin \varphi) - \sin \alpha] \cos(2\Omega + \alpha)}{2[\sin \alpha + (\mp \sin \varphi) \sin(2\Omega + \alpha)]} + \right.$$

$$+ \frac{\pm \cos \varphi \sin \alpha - (\mp \sin \varphi)}{\sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi}} \arctg \left[\frac{\sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \left(\Omega + \frac{\alpha}{2} \right) + (\mp \sin \varphi)}{\sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi}} \right] -$$

$$\left. - \frac{[\pm \cos \varphi (\mp \sin \varphi) - \sin \alpha] \cos \alpha}{2[\sin \alpha + (\mp \sin \varphi) \sin \alpha]} - \right.$$

$$\left. - \frac{\pm \cos \varphi \sin \alpha - (\mp \sin \varphi)}{\sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi}} \arctg \left[\frac{\sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) + (\mp \sin \varphi)}{\sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi}} \right] \right\},$$

где $b = \frac{p \sin \varphi \sin(\alpha - \delta)}{\gamma \sin \alpha \sin(\alpha - \varphi)}$; p – приведенное давление; γ – объемный вес загрузки; α – угол наклона свободной поверхности к горизонтали; φ – угол

внутреннего трения загрузки; Ω – угол между направлением максимально-го напряжения σ_{\max} и осью x . Получены также выражения для текущей V_x и средней скорости V_{xc} сдвигового слоя загрузки:

$$V_x = \sqrt{\left| 2W \sin \alpha \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} y - V_0^2 \right|},$$

где $V_x \leq 0$ при $\left(2W \sin \alpha \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} y - V_0^2 \right) \leq 0$

и $V_x \geq 0$ при $\left(2W \sin \alpha \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} y - V_0^2 \right) \geq 0$,

V_0 – установившаяся скорость,

$$V_{xc} = \frac{|V_0^3|(1 - \sin \varphi)}{3hW \sin \alpha \cos \varphi} \left\{ \left[\frac{2hW \sin \alpha \cos \varphi}{V_0^2(1 - \sin \varphi)} - 1 \right]^{1.5} + 1 \right\}, \quad h - \text{толщина слоя.}$$

Выражение для мнимого суммарного вертикального ускорения W :

$$W = \sqrt[3]{-\frac{L}{2} + \sqrt{f}} + \sqrt[3]{-\frac{L}{2} - \sqrt{f}} - \frac{q}{3}, \quad \text{где } f = \left(-\frac{q^2}{9} + \frac{m}{3} \right)^3 + \left(\frac{L}{2} \right)^2,$$

$$L = 2 \left(\frac{q}{3} \right)^3 - \frac{qm}{3} - 2 \frac{V_0^6}{d^3}, \quad q = -\frac{1}{d^3} \left(\frac{V_{xc}^2}{c^2} + 3d^2 V_0^2 \right), \quad m = \frac{1}{d^3} \left(2 \frac{V_{xc}}{c} |V_0^3| + 3dV_0^4 \right).$$

На рис. 2 приведены полученные типичные зависимости массовых долей второй $K_{\text{ба}}$, третьей $K_{\text{за}}$ и первой зоны $K_{\text{п}}$ от относительной скорости вращения барабана ψ_{ω} при отношении среднего размера элемента загрузки к диаметру камеры $d/D=0,01$ для разных степеней загрузки камеры κ . На рис. 3 – зависимости оборачиваемости загрузки K_0 .

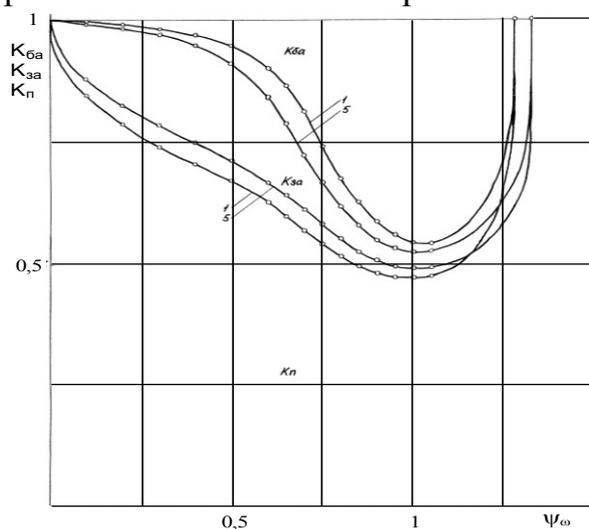


Рис. 2. Зависимости $K_{\text{ба}}$, $K_{\text{за}}$ и $K_{\text{п}}$ от ψ_{ω} при $d/D=0,01$: 1 – $\kappa=0,25$; 5 – $\kappa=0,45$

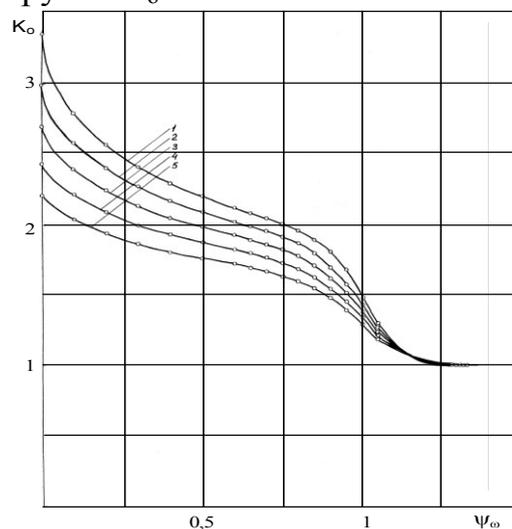


Рис. 3. Зависимости K_0 от ψ_{ω} при $d/D=0,01$: 1 – $\kappa=0,25$; 2 – $\kappa=0,3$; 3 – $\kappa=0,35$; 4 – $\kappa=0,4$; 5 – $\kappa=0,45$

Для оценки эффективности измельчения при ударном, стирающем и раздавливающем действии мелющих тел на частицы измельчаемого мате-

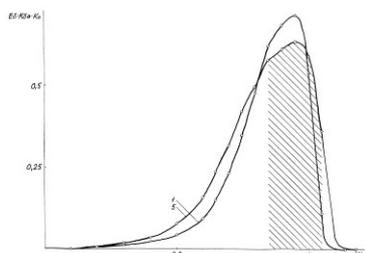
риала были использованы зависимости комплексных параметров от относительной скорости вращения ψ_ω (рис. 4). Рациональные режимы выделены штриховкой.

Ударное действие
($d/D=0,022$,
волнистая камера)

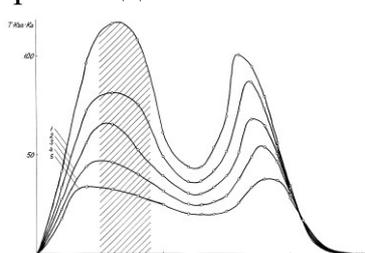
Истирание
($d/D=0,0024$, гладкая камера)

Раздавливание

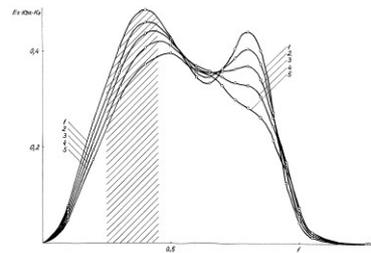
Условная производительность измельчения



Зависимости
 $E_6 \cdot K_{б6a} \cdot K_0$ от ψ_ω

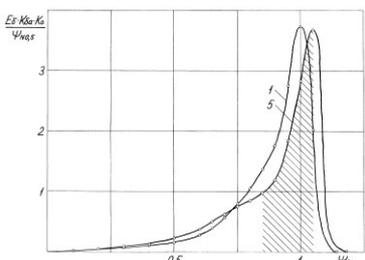


Зависимости
 $T \cdot K_{за} \cdot K_0$ от ψ_ω

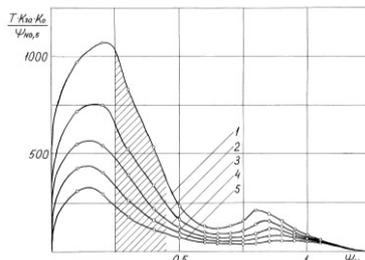


Зависимости
 $E_3 \cdot K_{за} \cdot K_0$ от ψ_ω

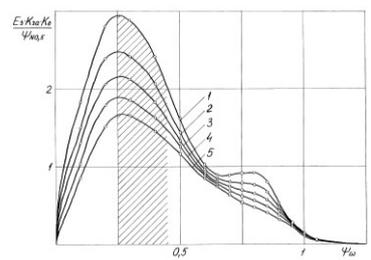
Условная удельная производительность измельчения



$(E_6 \cdot K_{б6a} \cdot K_0) / \psi_{N0.5}$ от ψ_ω

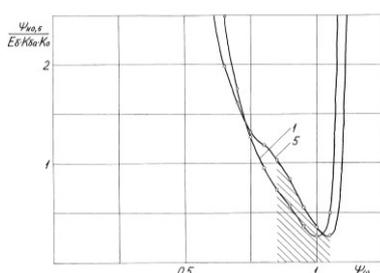


$(T \cdot K_{за} \cdot K_0) / \psi_{N0.5}$ от ψ_ω

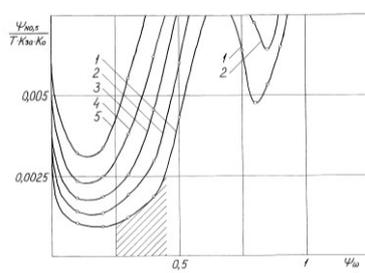


$(E_3 \cdot K_{за} \cdot K_0) / \psi_{N0.5}$ от ψ_ω

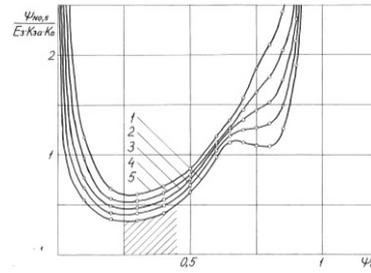
Условная удельная энергоёмкость измельчения



$\psi_{N0.5} / (E_6 \cdot K_{б6a} \cdot K_0)$ от ψ_ω



$\psi_{N0.5} / (T \cdot K_{за} \cdot K_0)$ от ψ_ω



$\psi_{N0.5} / (E_3 \cdot K_{за} \cdot K_0)$ от ψ_ω

Рис. 4. Комплексные характеристики для оценки эффективности помола для 1 – $\kappa=0,25$; 2 – $\kappa=0,3$; 3 – $\kappa=0,35$; 4 – $\kappa=0,4$; 5 – $\kappa=0,45$

На основании полученных результатов были установлены рациональные режимы реализации многостадийного помола [10]: для первого этапа грубого измельчения – $\psi_\omega=0,85-1,05$, $\kappa=0,45$, $d/D=0,015-0,04$ (рис. 5а), для последнего этапа тонкого измельчения – $\psi_\omega=0,25-0,45$, $\kappa=0,25$, $d/D=0,002-0,01$ (рис. 5б).



а



б

Рис. 5. Картины движения загрузки при двухстадийном измельчении: а – предварительный помол, б – тонкий помол

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Олевский, В. А.** Размольное оборудование обогатительных фабрик / В. А. Олевский. – М. : Госгортехиздат, 1963. – 448 с.
2. **Крюков, Д. К.** Усовершенствование размольного оборудования горно-обогатительных предприятий / Д. К. Крюков. – М. : Недра, 1966. – 174 с.
3. **Андреев, С. Е.** Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич. – М. : Недра, 1980. – 415 с.
4. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под ред. О. С. Богданова, В. А. Олевского. – М. : Недра, 1982. – 366 с.
5. **Маляров, П. В.** О движении внешнего слоя шаров при смешанном режиме работы барабанных мельниц / П. В. Маляров, В. Ф. Степурин // Обогащение руд. – 1979. – № 2(142). – С. 29–32.
6. **Юдахин, Н. Н.** Распределение массы загрузки в трубной мельнице при смешанном режиме / Н. Н. Юдахин // Тр. ВНИИЦеммаш. – 1979. – Вып. 22. – С. 61 – 67.
7. **Марюта, А. Н.** К теории движения материала в барабанных мельницах / А. Н. Марюта // Изв. вузов. Горн. журн. – 1981. – № 1. – С. 101–107.
8. **Морозов, Е. Ф.** О механике дробящих тел барабанной мельницы при смешанном скоростном режиме / Е. Ф. Морозов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1981. – № 6. – С. 73–80.
9. **Науменко, Ю. В.** Основи теорії режимів роботи барабаних млинів : Монографія / Ю. В. Науменко. – Рівне : Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 282 с.
10. Рекомендації до розрахунку, проектування та експлуатації барабаних млинів багатостадійного подрібнення / Ю. В. Науменко. – Рівне : Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 88 с.