УДК 621.926.9
DOI: 10.17277/vestnik.2018.04.pp.652-662

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МЕХАНОАКТИВАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЪЕМНО-СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ЧАСТИЦ

М. В. Севостьянов[1], В. А. Полуэктова[2], В. С. Севостьянов[1], А. В. Шаталов[1], В. В. Сирота[3]

Кафедры: «Технологические комплексы, машины и механизмы» (1); «Теоретическая и прикладная химия» (2); Центр высоких технологий (3), ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия; tkmm_bstu@mail.ru

Ключевые слова: вибро-центробежные помольные агрегаты; механоактивация; объемно-сдвиговое деформирование частиц; пресс-валковые измельчители; энергообменные устройства шаровых мельниц.

Аннотация: Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса энергосбережения и конструктивно-технологического совершенствования оборудования при реализации механоактивации кремнеземистых материалов. Разработаны патентозащищенные конструкции помольных агрегатов, реализующих постадийное измельчение материалов с объемно-сдвиговым деформированием частиц. Представлены результаты опытно-промышленного освоения научно-технических разработок в реальных производственных условиях.

На современном этапе развития индустрии важное значение имеют инновационные технологии, использующие высокодисперсные материалы с повышенной адгезионной способностью. Известно большое разнообразие технологий и технических средств для получения высокодисперсных продуктов. Однако, не смотря на высокий уровень развития современной техники, помольное оборудование имеет неиспользуемые резервы и нереализованный потенциал [1 – 5].

Особое место при этом занимает процесс тонкого измельчения кремнеземистых материалов (кварцевого песка, кварцитопесчанника, кварцита, стеклобоя, боя электротехнического фарфора и спека кордиерита и др.), широко используемых в химической, строительной, огнеупорной, электротехнической и других отраслях промышленности.

Применяемые при этом различные помольные агрегаты: барабанные шаровые мельницы (**БШМ**); среднеходные (валковые), вибрационные, струйные мельницы характеризуются высокой металлоемкостью, низким КПД и повышенным расходом энергии (удельный расход 40…100 кВт·ч/т и более).

Проведенный анализ современного уровня развития помольных систем и оборудования, а также многолетний опыт научно-технической деятельности в данной сфере свидетельствуют о целесообразности комплексного подхода при их совершенствовании и снижении энергозатрат, в первую очередь:

– рациональной организации технологического процесса;

– реализации постадийного измельчения материалов и селективного динамического воздействия на каждой стадии;

– учета кинетических закономерностей процесса помола – максимальной скорости измельчения на первой стадии и «затухающей» скорости измельчения на последующих стадиях с соответствующим при этом многократным ростом энергозатрат;

– реализации раздавливающе-сдвигового (**РСД**) или объемно-сдвигового (**ОСД**) деформирования крупнозернистых частиц с обеспечением их микродефектной структуры и интенсивного внутреннего рецикла шаро-материальной загрузки (для БШМ) как при открытом, так и замкнутом циклах помола;

– разработки высокоэффективных конструкций энергосберегающего помольного оборудования для вышеуказанных процессов, реализующих объемно-сдвиговое деформирование частиц материала в слое с соответствующим обеспечением «самофутеровки» рабочей поверхности агрегатов и снижении ее интенсивного износа, а также обеспечивающих повышенный энергообмен между мелющей загрузкой с измельчаемым материалом за счет использования внутримельничных энергообменных устройств и др.

Указанные технологические процессы и научно-технические разработки целесообразно реализовать также при подготовке исходных материалов для получения наноструктурированных композиционных смесей; при механоактивации кремнеземистых материалов и вяжущих, используемых при благоустройстве среды обитания и создании малых архитектурных форм в сфере научно-технического предпринимательства и бизнеса, а также для быстроразвивающихся 3D-технологий в строительстве [6 – 9].

Целесообразность тонкого измельчения широко распространенных кремнеземистых материалов, характеризующихся высокими прочностными характеристиками (например, для песка предел прочности при сжатии σ = 120 МПа, модуль упругости – $E = 7 \cdot 10^3$ МПа), предопределяет направление научных исследований по установлению наиболее эффективных помольных систем и возможных путей совершенствования энергосберегающих помольных агрегатов. Особое значение это имеет для быстроразвивающихся малотоннажных инновационных технологий в сфере научно-технического предпринимательства при выпуске конкурентоспособной продукции.

Известно, что кинетический закон изменения тонкости помола измельчаемого материала описывается уравнением

$$\frac{dR}{d\tau} = -kR, \tag{1}$$

где R – доля остатка на контрольном сите; k – константа скорости измельчения; τ – время протекания процесса.

Согласно экспериментально установленным закономерностям [10], зависимость содержания крупных фракций R_t от продолжительности измельчения t описывается уравнениями:

$$R_t = R_0 \exp^{Kt^m} \tag{2}$$

или

$$R_t = R_0 \exp^{-(t/t_0)^m}, \tag{3}$$

где R_0 – содержание крупной фракции в измельченном продукте за соответствующий период измельчения t; m, K, t_0 – эмпирические параметры уравнения, характеризующие характер зависимости.

Экспоненциальный характер кинетики процесса помола материалов [11], описанный данными уравнениями, свидетельствует о переменных значениях скорости измельчения (отношения средневзвешенного диаметра частиц материала

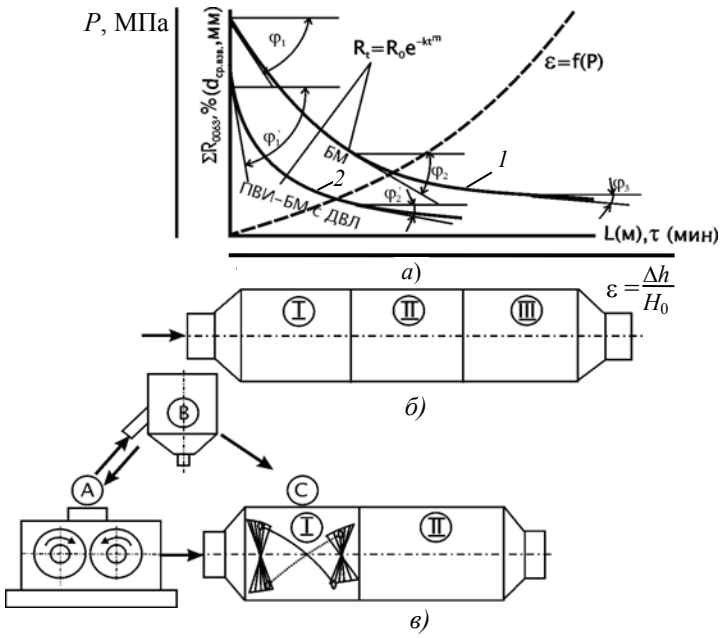


Рис. 1. Кинетика процессов измельчения:
а – графики зависимости параметров измельчения для различных способов помола;
б – стадии измельчения в барабанной шаровой мельнице;
в – энергосберегающий технологический комплекс «ПВИ – БШМ»

к данному времени его помола – константы скорости измельчения $K\varphi_i$, то есть тангенса угла наклона φ_i касательной к кривой кинетики измельчения) на каждой стадии (рис. 1, *а*).

Анализ кривых измельчения различных материалов в БШМ (см. рис. 1, *а*, кривая *1*) показывает, что на первой стадии помола (I камера мельницы) константа скорости $K\varphi_1$ имеет максимальное значение. При этом разрушение крупных частиц происходит по местам дислокации дефектности структуры (трещинам, микродефектам, порам и др.), число которых падает с уменьшением размера частиц.

На второй стадии (рис. 1, *б*, камера II) сопротивление размолу повышается, соответственно, угол наклона φ_2 уменьшается и $K\varphi_2 < K\varphi_1$, что определяется микроструктурой частиц и сопровождается повышением энергозатрат.

На третьей стадии (см. рис. 1, *а*, *б*) кривая измельчения асимптотически приближается к горизонтали, что приводит к значительному снижению константы скорости измельчения – $K\varphi_3 << K\varphi_2 < K\varphi_1$ и существенному повышению энергозатрат. Последнее обусловлено рядом причин: самопроизвольным агрегированием тонкоизмельченных частиц из-за возрастания их аутогезионного взаимодействия, адгезионным взаимодействием с футеровкой и мелющими телами; диссипацией энергии из-за предшествующего фактора, проявления электростатического воздействия; отсутствием эффективной сегрегации полидисперсной смеси, соответственно, вывода из последней камеры высокодисперсных частиц и др.

В этой связи весьма эффективным технологическим приемом реализации используемого потенциала является «вынесение» первой стадии измельчения из БШМ (см. рис. 1, *б*) в пресс-валковый измельчитель (**ПВИ**), реализующий РСД или ОСД частиц, что существенно снижает время измельчения на первой стадии до 30…40 с. Кроме того, в ПВИ обеспечивается микродефектная структура частиц, что снижает энергозатраты на последующих стадиях (рис. 1, *в*); оснащение I камеры БШМ

(при двухкамерном варианте) винтовыми энергообменными устройствами (**ВЭУ**) интенсифицирует процесс измельчения за счет разрушения «застойных зон» мелющей загрузки, активизирует внутренний рецикл измельчаемых частиц с микродефектной структурой, а также позволяет уменьшить на 15 – 20 % массу мелющих тел и соответственно потребляемую мощность провода.

При использовании на первой стадии ПВИ наблюдается резкий спад кривой кинетики измельчения (см. рис. 1, *а*, кривая *2*) – возрастание константы скорости измельчения, что свидетельствует об эффективности использования раздавливающе-сдвигового или объемно-сдвигового способа измельчения вместо энергозатратного ударного разрушения материала в первой камере БШМ. При дальнейшем помоле предизмельченных частиц в БШМ (в двухкамерном варианте, см. рис. 1, *в*) время измельчения существенно сокращается.

При реализации внешнего рециклинга измельченного материала (замкнутый цикл помола) процесс измельчения материала можно разложить на стадии (см. рис. 1, *в*):

– последовательный $A \to B, B \to C$;

– обратный $A \rightleftarrows B$.

Если принять за основу формулу (1), то уравнения скорости процессов запишутся следующим образом:

$$\frac{dR_A}{d\tau} = -k_A R_A;$$

$$\frac{dR_B}{d\tau} = -k_B R_B, \tag{4}$$

где A – исходный материал; B – материал, измельченный до некоторой промежуточной крупности; C – конечный материал.

Для механизма $A \rightleftarrows B$ кинетическое уравнение запишется следующим образом

$$\frac{dR_A}{d\tau} = k_{\text{о}}(1 - R_A) - k_{\text{п}} R_A, \tag{5}$$

где $k_{\text{о}}$ и $k_{\text{п}}$ – константа скорости измельчения, соответственно, для обратного и последовательного процесса.

Преобразуя условие равновесия

$$\frac{1 - R_A}{R_A} = \frac{k_{\text{п}}}{k_{\text{о}}} = k_{\text{р}}, \tag{6}$$

получим константу равновесия $k_{\text{р}}$, равную отношению скорости прямого и обратного процесса.

Интегрируя уравнение в пределах 0 … τ и R_0 … R, имеем

$$R = 1\Big/\left(\frac{k_{\text{п}}}{k_{\text{о}}} + 1\right) + \left(R_0 - 1\Big/\left(\frac{k_{\text{п}}}{k_{\text{о}}} + 1\right)\right)\mathrm{e}^{-(k_{\text{п}} + k_{\text{о}})\tau}. \tag{7}$$

Величины констант скорости измельчения могут быть получены по следующим формулам:

– для процесса $A \rightleftarrows B$

$$k_{\text{о}} = -1\Big/\left(\tau(k_{\text{р}} + 1)\ln\frac{R_B}{R_0}\right); \tag{8}$$

– для процесса $A \to B$, $B \to C$

$$k_A = -1\Big/\left(\tau_A \ln\frac{R_A}{R_0}\right); \tag{9}$$

$$k_B = -1\Big/\left(\tau_B \ln\frac{R_C}{R_B}\right). \tag{10}$$

Численные значения констант могут служить комплексным критерием характера протекания процесса измельчения. Их зависимость от основных параметров ведения процесса позволит определить их оптимальные значения.

Вышеуказанный подход в организации технологического процесса измельчения по отдельным стадиям с реализацией внешнего рецикла позволяет определить наиболее рациональные условия измельчения материалов в широком диапазоне изменения их дисперсности.

Проведенные экспериментальные исследования процесса раздавливающе-сдвигового деформирования кремнеземистых частиц полифракционного состава в пресс-матрице с горизонтальной ($\alpha = 0°$) и скошенной ($\alpha = 30°$) рабочей поверхностью прессующего пунсона показали, что энергоемкость процесса измельчения зависит от ряда факторов: размера, формы, фракционного состава, прочности, расположения зерен в слое, механизма РСД, величины и кратности силового воздействия и др.

Наиболее эффективно процесс измельчения происходит при давлениях прессования P = 150…260 МПа, кратности приложения силовой нагрузки до 3-4 раз и наличии сдвигового деформирования при значениях угла скоса пуансона $\alpha \le 30°$.

При реализации РСД частиц наблюдается пространственная переориентация частиц в процессе их деформации и повышается эффективность разрушения слоя материала при сдвиговом деформировании (наличие касательных напряжений).

Проведенные аналитические исследования процесса разрушения мелкозернистых частиц в слое (рис. 2) позволили получить уравнение для определения давления измельчения при однократном применении силовой нагрузки

$$P_0 = \sigma_{\text{сж}} \operatorname{tg} \psi_{\text{к}} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \psi_{\text{к}}} + f_i + \frac{\vartheta_{\text{сц}}}{\sigma_{\text{сж}}}\right) \alpha_{\text{к}} \cos^2 \alpha_{\text{п}} \left[\exp \frac{2\,\xi\, f_0\, H_{\text{изм}}\, K_\tau}{D \cos \alpha_{\text{п}}} - 1\right], \tag{11}$$

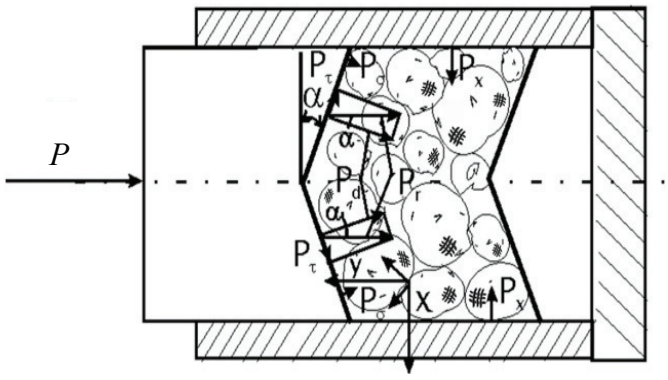


Рис. 2. Схема силового взаимодействия частиц материала при реализации их раздавливающе-сдвигового деформирования

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности частиц на сжатие, МПа; $\psi_к$ – угол нормального контактного взаимодействия частиц, $\text{tg}\,\psi_к = 1{,}1...1{,}2$; f_i – коэффициент внутреннего трения частиц; $\vartheta_{сц}$ – удельное сопротивление частиц при их сдвиговом деформировании, МПа; $\alpha_к$ – относительная величина проекций суммарной контактной поверхности частиц при номинальном давлении; $\alpha_п$ – угол скоса прессующего пуансона, град; ξ – коэффициент бокового распора, отношение бокового усилия q к нормальному P, $\xi = q/P$; f_0 – коэффициент внешнего трения материала; $H_{изм}$ – толщина измельчаемого слоя, м; K_τ – коэффициент деформации частиц; D – диаметр пресс-матрицы, м.

Значения параметров $\vartheta_{сц}$ и K_τ, определяем по формулам:

$$\vartheta_{сц} = v_{пр}\frac{\sigma_{сж}}{\sqrt{3\sigma_{раст}/\sigma_{сж}}}, \tag{12}$$

где $v_{пр}$ – коэффициент пропорциональности, $v_{пр} < 1$ (для хрупких материалов); $\sigma_{раст}$ – предел прочности частиц на растяжение, МПа;

$$K_\tau = \frac{d_{ср.взв_0}}{d_{ср.взв_и}}, \tag{13}$$

где $d_{ср.взв_0}$, $d_{ср.взв_и}$ – средневзвешенный диаметр частиц в исходном и измельченном состоянии, соответственно, м.

Учитывая, что на разрушение предварительно измельченных частиц с микродефектной структурой требуется значительно меньше давление $P_{пр.изм}$ по сравнению с давлением для исходных частиц P_0, то при повторном возврате предварительно измельченного материала в исходный материал (реализации повторного силового воздействия) требуется необходимое давление

$$P' = 0{,}67\,P_0 + 0{,}33\,P_{пр.изм.} =$$

$$= \left[0{,}67\sigma_{сж}(1 + f_i\,\text{tg}\,\psi_к) + 0{,}33\sigma'_{сж}\,K_{св}(1 + f_i\,\text{tg}\,\psi_к) + \vartheta_{сц}\,\text{tg}\,\psi_к\right]\times$$

$$\times\,\alpha_к\cos^2\alpha_п\left[\exp\frac{2\xi f_0 H_{изм}K_\tau}{D\cos\alpha_п} - 1\right], \tag{14}$$

где $K_{св}$ – коэффициент силового воздействия, зависящий от кратности измельчения, $K_{св} = 0{,}5...1{,}0$; $\sigma'_{сж} = K_{св}\sigma_{сж}$ – предел прочности частиц на сжатие при повторном силовом воздействии, МПа.

В качестве примера сделаем расчет необходимого давления измельчения для кварцевого песка.

Исходные данные для расчета: $\sigma_{сж}$ = 120 МПа; f_i = 0,7; $tg\psi_к$ = 1,2; $\vartheta_{сц} = 0{,}22\,\sigma_{сж}$; $\alpha_к = 1$; $\cos\alpha_п = 0{,}866$; $\xi = 0{,}24$; $f_0 = 0{,}56$; $D = 10\cdot10^{-3}$, м; $K_\tau = \dfrac{d_{ср.взв_0}}{d_{ср.взв_i}} = \dfrac{0{,}72}{0{,}405} = 1{,}78$; $H_{изм} = h_{пл}\left(K_{упл} - 1\right) = 18\cdot10^{-3}(1{,}87 - 1) = 1{,}566\cdot10^{-3}$, м.

Используя выражение (14), получим

$$P_0 = 120 \cdot 1{,}2 \cdot \left(\frac{1}{1{,}2} + 0{,}7 + \frac{0{,}22 \cdot 120}{120} \right) \times$$

$$\times 1 \cdot 0{,}75 \cdot \left[\exp \frac{2 \cdot 0{,}24 \cdot 0{,}56 \cdot 1{,}566 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}78}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}866} - 1 \right] = 260{,}71 \text{ МПа}.$$

Рассчитаем необходимое давление измельчения кварцевого песка при многократном приложении нагрузки:

$$P' = \left[0{,}33 \cdot 120 (2{,}03 + 0{,}5)(1 + 0{,}7 \cdot 1{,}2) + 0{,}22 \cdot 120 \cdot 1{,}2 \right] \cdot 1 \times$$

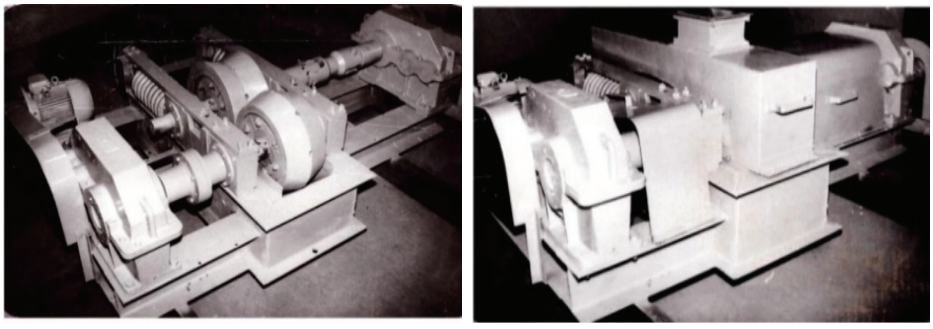
$$\times 0{,}75 \cdot \left[\exp \frac{2 \cdot 0{,}24 \cdot 0{,}56 \cdot 1{,}566 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}78}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}866} - 1 \right] = 222{,}94 \text{ МПа}.$$

Сравнивая значения P_0 и P', видно, что необходимое давление измельчения при многократном измельчении меньше, чем для однократного измельчения (на 14,5 %).

Экспериментальные исследования показали, что эффективность процесса повторного приложения силовой нагрузки существенно возрастает при дезагломерации спрессованного предварительно измельченного материала – переориентации в пространстве частиц с микродефектной структурой.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований, реализованных в патентозащищенных конструкциях ПВИ с коническими валками, обеспечивающем объемно-сдвиговое деформирование частиц (рис. 3), и БШМ, оснащенной ВЭУ в виде двухзаходных винтовых лопастей, изготовленных из прутковой стали диаметром $D_{пр} = 90 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 4) [11], показали, что:

– производительность мельницы с ВЭУ при тонком измельчении кремнеземистых материалов повышается с Q = 9,8 т/ч до Q' = 12,2 т/ч (на 25,3 %), масса мелющих тел уменьшается с G_Σ = 32 т до G_Σ' = 28 т (на 12,5 %), что обеспечивает снижение потребляемой мощности привода с $N_{потр} = 429 \cdot 10^3$ Вт до $N'_{потр} = 415 \cdot 10^3$ Вт и соответственно удельного расхода электроэнергии с q = 43,8 кВт·ч/т до q' = 34,0 кВт·ч/т (на 22,3 %);



а) *б*)

Рис. 3. Пресс-валковый измельчитель с коническими валками со снятыми защитными элементами и бункером (*а*) и в сборе (*б*).

Технические характеристики ПВИ:

∅ 0,7×0,3 м – геометрические размеры валков; δ – зазор между валками, $\delta = (3 \ldots 8) \cdot 10^{-3}$ м; V – окружная скорость вращения валков, V = 0,2…0,5 м/с; N – установочная мощность привода, $N = (2 \cdot 15) \cdot 10^3$ Вт; Q – производительность, $Q_{min} - Q_{max}$ = 2…6 т/ч; P – максимальное усилие противодавления, $P = 70 \cdot 10^4$ Н

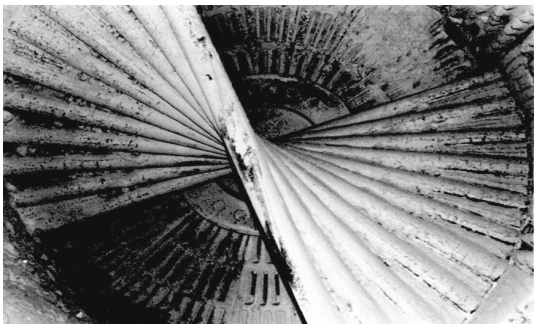


Рис. 4. Барабанная шаровая мельница с внутренними энергообменными устройствами ∅2×10,5 м.

Технические характеристики БШМ:

l – длина прутков секции, $l = 1{,}96 \cdot 10^{-3}$ м; $D_{пр}$ – диаметр прутков, $D_{пр} = 90 \cdot 10^{-3}$ м; α– угол подъема винтовой линии, α = 24,5°; L_1 – расстояние между ВЭУ по оси мельницы, $L_1 = 3{,}5$ м; $l_{ВЭУ}$ – длина каждой из ВЭУ, $l_{ВЭУ} = 0{,}7$м

– использование помольного комплекса: «ПВИ, работающем в замкнутом цикле помола, – БМ с ВЭУ» в технологической линии помола стекольной шихты при производстве пеностекла позволило уменьшить время помола в барабанной мельнице с 4,6 ч до 3,1 ч и снизить удельный расход электроэнергии в барабанной мельнице с $q_{БМ} = 119{,}9$ кВт·ч/т до $q_{ПВИ–БМ–ВЭУ} = 87{,}2$ кВт·ч/т (на 27,2 %);

Использование постадийного процесса диспергирования материалов с реализацией объемно-сдвигового деформирования частиц в пресс-валковом измельчителе позволяет не только рационально организовать технологический процесс измельчения (сократить время помола при замене длительного ударного воздействия мелющей загрузки в первой камере БШМ на высокоскоростное силовое воздействие в течение 30…40 с в ПВИ); снизить металлоемкость помольного оборудования – использовать двухкамерный вариант БШМ вместо трехкамерного; интенсифицировать процесс измельчения в БШМ за счет использования внутримельничных энергообменных устройств, а также снизить энергозатраты при тонком помоле предварительно измельченных частиц с микродефектной структурой.

Рассмотренная помольная система «ПВИ – БШМ с ВЭУ» снижает на 30 – 40 % удельный расход энергии и повышает на 20 – 30 % производительность технологического комплекса, что является существенным фактором при механоактивации природных и техногенных материалов с различными физико-механическими характеристиками для развития инновационных технологий.

Список литературы

1. Евтушенко, Е. И. Активационные процессы в технологии строительных материалов : монография / Е. И. Евтушенко. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2003. – 209 с.

2. Промтов, М. А. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата: монография / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 148 с.

3. Ханин, С. И. Закономерности процесса движения мелющих тел в корпусе шаровой барабанной мельнице: монография / С. И. Ханин, Д. Н. Старченко. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2013. – 209 с.

4. Сиваченко, Л. А. Технологические аппараты адаптивного действия : монография / Л. А. Сиваченко [и др.]. – Минск : Белорусский гос. ун-т, 2008. – 375 с.

5. Кузьмина, В. П. Механохимическая активация полупродуктов для сухих строительных смесей / В. П. Кузьмина // Современные технологии строительной химии : сб. докладов. – Киев, 2005. – С. 84 – 88.

6. Техника и технология предизмельчения материалов для производства нанокомпозитов / В. С. Севостьянов [и др.] // Нанотехнологии производству : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – 2007. – № 1. – С. 165 – 171.

7. Наназашвили, И. Х. Улучшение эксплуатационных свойств элементов благоустройства и малых архитектурных форм при применении портладцементов / И. Х. Наназашвили, Д. А. Мемков, В. С. Чижик // Цемент. – 2003. – № 5. – С. 44 – 45.

8. Степанова, Е. Ю. Прорывные технологии нового поколения формообразования пространственно-сложных поверхностей наукоемких изделий / Е. Ю. Степанова, Г. В. Барсуков, Ю. С. Степанов // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 243 – 249.

9. Севостьянов, М. В. Ресурсосберегающее оборудование для комплексной переработки техногенных материалов / М. В. Севостьянов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 4. – С. 140 – 145.

10. Пироцкий, В. З. Цементные мельницы: технологическая оптимизация / В. З. Пироцкий. – СПб. : Изд-во ЦПО «Информатизация образования», 1999. – 145 с.

11. Шаталов, А. В. Технологические комплексы для измельчения кремнеземистых материалов : монография / А. В. Шаталов, С. А. Михайличенко. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2016. – 135 с.

Theory and Practice of Mechanical Activation of Materials with Volume-Shear Deformation of Particles

M. V. Sevostyanov[1], V. A. Poluektova[2], V. S. Sevostyanov[1], A. V. Shatalov[1], V. V. Sirota[3]

Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms (1); Theoretical and Applied Chemistry (2); Center for High Technologies (3), V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia; tkmm_bstu@mail.ru

Keywords: centrifugal grinding aggregates; mechanical activation; volume shear deformation of particles; press roller shredders; energy-exchanging devices for ball mills.

Abstract: The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the process of energy-saving and design and process improvement of equipment during the implementation of the mechanical activation of silica materials. Patent-protected designs of grinding aggregates, which implement stepwise grinding of materials with volume-shear deformation of particles, are developed. The results of the pilot industrial development of scientific and technical solutions in real production conditions are presented.

References

1. Yevtushenko Ye.I. *Aktivatsionnyye protsessy v tekhnologii stroitel'nykh materialov* [Activation Processes in Building Materials Technology], Belgorod: BGTU im. V. G. Shukhova, 2003, 209 p. (In Russ.)

2. Promtov M.A., Stepanov A.Yu., Alyoshin A.V. *Metody rascheta harakteristik rotornogo impul'snogo apparata* [Methods of Calculation of Characteristics of the Rotor Pulse Device], Tambov: TGTU, 2015, 148 p. (In Russ.)

3. Khanin S.I., Starchenko D.N. *Zakonomernosti protsessa dvizheniya melyushchikh tel v korpuse sharovoy barabannoy mel'nitse* [Regularities of the Process of Motion of Grinding Bodies in the Body of a Ball Drum Mill], Belgorod: BGTU im. V. G. Shukhova, 2013, 209 p. (In Russ.)

4. Sivachenko L.A., Shulyak V.A., Golushkova O.V., Kirkor M.A., Kutynko Ye.I., Bogatyrev M.G. *Tekhnologicheskiye apparaty adaptivnogo deystviya* [Technological Apparatus of Adaptive Action], Minsk: Belorusskiy gosudarstvennyy universitet, 2008, 375 p. (In Russ.)

5. Kuz'mina V.P. [Mechanochemical Activation of Intermediates for Dry Construction Mixtures], *Sovremennyye tekhnologii stroitel'noy khimii: sbornik dokladov* [Modern technologies of building chemistry: a collection of reports], Kiev, 2005, pp. 84-88. (In Russ.)

6. Sevost'yanov V.S., Strokova V.V., Ural'skii A.V., Perelygin D.N. [Technique and technology of pre-grinding of materials for the production of nanocomposites], *Nanotekhnologii proizvodstvu: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Nanotechnology production: a collection of proceedings of the International Scientific and Practical Conference], 2007, no. 1, pp. 165-171. (In Russ.)

7. Nanazashvili I.Kh., Memkov D.A., Chizhik V.S. [Improving the operational properties of the elements of the blag-gostroystva and small architectural forms in the application of portlad cements], *Tsement* [Cement], 2003, no. 5, pp. 44-45. (In Russ.)

8. Stepanova Ye. Yu., Barsukov G.V., Stepanov Yu.S. [Breakthrough technologies of a new generation of the formation of spatially complex surfaces of science-intensive products], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical science], 2016, no. 8-2, pp. 243-249. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Sevost'yanov M.V. [Resource-saving equipment for complex processing of man-made materials], *Transactions of the Belgorod State Technical University*, 2016, no. 4, pp. 140-145. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Pirotskiy V.Z. *Tsementnyye mel'nitsy: tekhnologicheskaya optimizatsiya* [Cement mills: technological optimization], St. Petersburg: Izdatel'stvo TSPO «Informatizatsiya obrazovaniya», 1999, 145 p. (In Russ.)

11. Shatalov A.V., Mikhaylichenko S.A. *Tekhnologicheskiye kompleksy dlya izmel'cheniya kremnezemistykh materialov* [Technological complexes for grinding silica-fine materials], Belgorod: BGTU im. V. G. Shukhova, 2016, 135 p. (In Russ.)

Theorie und Praxis der mechanischen Aktivierung von Materialien bei Volumenscherdeformation von Partikeln

Zusammenfassung: Die Ergebnisse theoretischer und experimenteller Untersuchungen des Energieeinsparungsprozesses und der konstruktiven und technologischen Verbesserung der Ausrüstung bei der Implementierung der mechanischen Aktivierung von Silizium-Materialien sind vorgestellt. Es sind patentgeschützte Konstruktionen von Schleifaggregaten entwickelt, die ein schrittweises Schleifen von Materialien mit Volumenscherdeformation von Partikeln durchführen. Die Ergebnisse der industriellen Pilotentwicklung wissenschaftlicher und technischer Entwicklungen in realen Produktionsbedingungen sind vorgestellt.

Théorie et pratique de la mécano-activation des matériaux lors de la déformation volumétrique des particules

Résumé: Sont présentés les résultats des études théoriques et expérimentales du processus d'économie d'énergie et duperfectionnement de la conception et de la technologie de l'équipement lors de la mise en œuvre de la mécanique des matériaux de silice. Sont élaboréesles structures brevetées des unités de broyage réalisant le broyage post-étape des matériaux avec la déformation volumétrique des particules. Sont présentés les résultats de laréalisatiion scientifique et technique dans les conditions réelles de la production.

Авторы: ***Севостьянов Максим Владимирович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы»; ***Полуэктова Валентина Анатольевна*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная химия»; ***Севостьянов Владимир Семенович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы»; ***Шаталов Алексей Вячеславович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы»; ***Сирота Вячеслав Викторович*** – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Центра высоких технологий, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.

Рецензент: ***Уваров Валерий Анатольевич*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.