

ния редких металлов из отходов обогащения мариуполитов / К.Л. Шпилевой, В.С. Белецкий, Р.Л. Попов, Л.А. Маклакова // *Благородные и редкие металлы. БРМ-2003: IV Междунар. конф., 22-26 сент. 2003 г.: тезисы докл.* – Донецк, 2003. – С. 257 – 259.

*Поступила в редколлегию 13.06.13.*

УДК 621.926

**Совершенствование рудоподготовки при обогащении нефелиновых сиенитов для повышения извлечения пирохлора / Ю.С. МОСТЫКА, К.Л. ШПИЛЕВОЙ, Л.В. ШПИЛЕВОЙ // *Вісник НТУ «ХПІ».* – 2013. – № 57 (1030). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 85 – 89. – Бібліогр.: 7 назв.**

Виконано дослідження щодо удосконалення технології збагачення нефелінових сієнітів Мазуровського родовища на основі селективного подрібнення мінералів перед гравітаційним розділенням у відцентровому полі

**Ключові слова:** Рудопідготовка, збагачення, нефелінові сієніти, пирохлор, подрібнення, концентрація, відцентрове поле

These researches have been done with the purpose of ore-dressing technology perfection for nefelin-syenit ores of the Mazurovsky deposit on the basis of selective crushing of minerals before their gravitational separation in centrifugal field

**Keywords:** Ore preparation, perfection, nefelin-syenit, pyrochlore, milling, concentration, centrifugal field

УДК 622.517.519

**В.П. НАДУТЫЙ**, д-р техн. наук, ИГТМ НАН Украины, Днепропетровск,  
**А.И. ЕГУРНОВ**, канд. техн. наук, КНУ, Кривой Рог,  
**И.В. ЯГНЮКОВА**, асп., ИГТМ НАН Украины, Днепропетровск

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ ВИБРАЦИОННОГО ВАЛКОВОГО КЛАССИФИКАТОРА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИБРОУДАРНОГО РЕЖИМА**

Предложена модернизированная схема рабочего органа валкового виброклассификатора. Определены условия виброударного режима его работы и представлены основные расчетные зависимости.

**Ключевые слова:** валковый классификатор, виброударный режим, вибровозбудитель, дебалансная масса, математическая модель.

© В.П. Надутый, А.И. Егурнов, И.В. Ягнюкова, 2013

Принципиальным отличием валкового вибрационного классификатора является отсутствие просеивающей поверхности в виде сетки, что характерно для всех вибрационных грохотов. Подробно конструкция валкового классификатора описана в ряде работ [1, 2]. Разделение сыпучей горной массы осуществляется между вращающимися в одну сторону параллельно установленными валками. Крупность разделения при классификации определяется размером щели между вращающимися валками.

Второй особенностью конструкции является отсутствие жесткой кинематической связи между вибровозбудителем и валками, которые представляют собой дебалансную массу, свободно вращающуюся вокруг оси между бортами классификатора за счет инерционной силы вибровозбудителя, установленного в начале или в конце рамы машины, либо двух вибровозбудителей – с обоих концов рамы.

Общий вид валкового вибрационного классификатора показан на рис. 1, где на жесткой раме в горизонтальной плоскости между бортами параллельно расположены оси круглого поперечного сечения. На эти оси свободно надеты отрезки труб, которые играют роль валков. При этом внутренний диаметр труб превышает диаметр осей валков. При работе вибровозбудителя рама приходит в колебательное движение, а вместе с ней – оси валков и сами валки. Поскольку оси валков жестко связаны с рамой, то они совершают те же движения, что и рама.

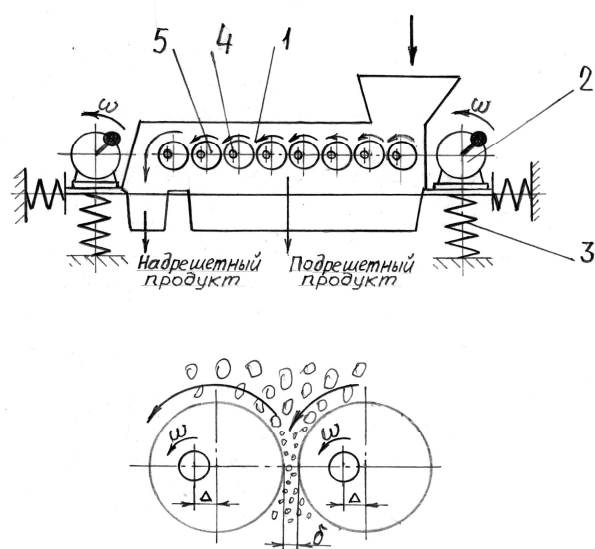


Рис. 1 – Схема валкового вибрационного грохота: 1 – корпус; 2 – инерционный вибровозбудитель; 3 – упругие связи; 4 – эксцентриситет валков; 5 – рабочие валки

Но валки осуществляют более сложное движение по круговой или эл-

липтической траектории относительно индивидуального для каждого валка центра  $\Omega$  (рис. 2)

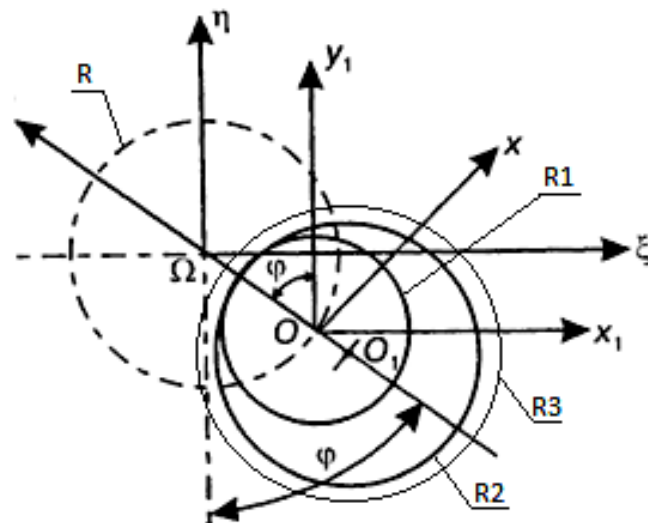


Рис. 2 – Расположение осей координат

В предыдущих работах рассмотрены случаи движения оси и валка, совершающих движение по круговой траектории радиусом  $R$  [3] при положении валка на оси с нулевым запаздыванием в процессе вращения оси по кругу радиусом  $R$  с центром в точке  $\Omega$ .

Решалась задача определения устойчивости вращения валков классификатора [3] при движении кольца валка его внутренней поверхностью по внешней поверхности оси, совершающей колебательное движение [4]. Установлено, что устойчивый режим вращательного движения кольца валка можно создать за счет достаточной центробежной силы, возникающей при обкатывании оси валка радиуса  $R_1$  с массой  $m$  по внутренней поверхности кольца радиуса  $R_2$  и достаточного коэффициента контактного трения поверхностей оси и кольца валка, обеспечивающего режим обкатывания без проскальзывания. В результате рассмотрения всех действующих сил и моментов сил, приложенных к валку, выяснилось, что вращение валка обязательно должно происходить с некоторым запаздыванием сравнительно с вращением его оси.

Для определения этого угла запаздывания  $\alpha$  получено уравнение ротационного движения

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -\frac{2R_2}{(3R_2^2 - R_3^2)} \left[ -(R_2 - R_1 + R \cos \alpha) \frac{d\omega}{dt} + R\omega^2 \sin \alpha - g \sin(\varphi - \alpha) \right], \quad (1)$$

где  $R$  – радиус круговой траектории движения оси валка;  $R_1$  – радиус оси валка;  $R_2$  – внутренний радиус валка;  $R_3$  – внешний радиус валка;  $\omega$  – угловая скорость каждой точки валка относительно неподвижной системы отсчета;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\varphi$  – угол поворота.

В результате выполненных исследований [4] установлено, что математическая модель движения валка состоит из уравнения (1) и двух формул: (2) и (3)

$$\begin{aligned}
 F_{\text{тр}} &= -R_2 \frac{d^2\alpha}{dt^2} + mg \sin(\varphi - \alpha) + m(R_2 - R_1 + R \cos \alpha) \frac{d\omega}{dt} + mR\omega \sin \alpha \frac{d\omega}{dt} = \\
 &= -\frac{2R_2}{(3R_2^2 - R_3^2)} \left[ -(R_2 - R_1 + R \cos \alpha) \frac{d\omega}{dt} + R\omega^2 \sin \alpha - g \sin(\varphi - \alpha) \right] + \\
 &\quad + mg \sin(\varphi - \alpha) + m(R_2 - R_1 + R \cos \alpha) \frac{d\omega}{dt} + mR\omega \sin \alpha \frac{d\omega}{dt};
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$N = mg \cos(\varphi - \alpha) + mR\omega^2 \sin \alpha + m(R_2 - R_1 + R \cos \alpha) \omega^2 - 2m\omega\omega_1 R_2, \quad (3)$$

где  $\omega_1$  – скорость поворота валка относительно мгновенного центра вращения;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения между поверхностями оси валка и валка;  $N$  – сила реакции оси валка на валок.

В дальнейшем при решении уравнения (1) путем интегрирования определяется усилие  $F_{\text{тр}}$  и  $N$  по формулам (2) и (3). Значение усилий  $F_{\text{тр}}$  и  $N$  позволяют контролировать возможность в конкретной конструкции валкового классификатора обкатывания валка по оси без проскальзывания. Если выполняется неравенство

$$F_{\text{тр}} < Nf,$$

где, в данном случае,  $f$  – коэффициент трения между валком и его осью, то проскальзывания не будет.

Кроме того, условие  $N \geq 0$  определяет условие безотрывного контакта. Для практических целей интерес представляют решения уравнения (1) с периодом  $\frac{2\pi}{\omega}$  или кратного ему, так как только такие периодические движения

обеспечивают постоянный зазор между валками классификатора, а значит, и высокое качество классификации по крупности сыпучего материала.

В соответствии с приведенными зависимостями были определены параметры валкового классификатора, изготовлены опытные образцы, успешно проведены промышленные испытания и начата их эксплуатация.

**Актуальность** создания таких машин заключается в решении вопросов снижения энергоемкости процесса классификации сыпучих материалов мелкой и средней крупности, металлоемкости оборудования и повышения эффективности классификации, особенно, горной массы повышенной влажности, склонной к комкованию и залипанию. Испытания созданных конструкций показали возможность решения проблемных вопросов [5]. Однако существуют технологии переработки горной массы, содержащей большое количество связующего в виде глинистых или известковых включений, масел, отходов продуктов нефтепереработки. В этом случае необходимы значительные центробежные ускорения и ударное воздействие на перерабатываемый материал для разрушения агломераций, предотвращения комкования. Поэтому для реализации виброударного режима в механической системе "валок – ось валка" классификатора была рассмотрена другая механическая модель.

**Целью** модернизации является создание виброударного режима работы валков на основании кинематического взаимодействия гладкого валка со специальной конструкцией его оси.

Предлагается модернизируемая конструкция отличается тем, что поперечное сечение оси валка представлено в виде круга радиусом  $R_1$ , который имеет определенное количество выступов ( $n$ ), называемых ударными элементами (рис. 3). Геометрический центр оси валка такого вида так же, как и в предыдущем случае, двигается по окружности под действием внешней силы вибровозбудителя  $F = A \cdot \sin \omega t$ .

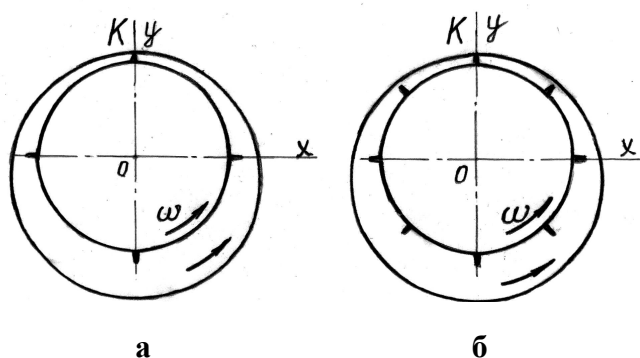


Рис. 3 – Конструкция валков с ударными выступами: а – 4 ударных выступа; б – 8 ударных выступов

На поверхности оси валка находится кольцо определенного радиуса  $R_2$ , которое обкатывается вокруг оси валка. В данном случае рассматривается вращательный режим кольца с параметрическим импульсным возбуждением, обусловленным введением в систему ударных элементов в виде выступов. При движении кольца, когда точка контакта набегаёт на выступы, возникает виброударный импульс, который периодически повторяется в зависимости от периодичности расположения выступов. Все точки оси валка двигаются синхронно и одновременно синфазно. При этом, если раньше при обкатывании геометрический центр валка двигался по гладкой окружности или эллипсу, то в данном случае центр кольца будет двигаться по некоторой ломаной замкнутой кривой, которая будет иметь резкие локальные всплески в местах выступов. Поэтому в данной модернизированной системе смоделирован виброударный процесс, характеризующийся последовательностью коротких, повторяющихся во времени импульсов.

Распределение действующих сил входного воздействия аналогично результату предшествующих исследований за исключением появления новых возбуждающих сил в момент удара валка о выступ. Поэтому итоговое уравнение движения состоит из прежних действующих сил.

Однако в рассматриваемом случае различны выходное воздействие и переменный радиус оси валка, который ранее был константой  $R_1$ , а во втором случае он является переменной величиной.

Вследствие этого для перехода от готовой зависимости (1) к новой учтем, что  $R_1$  изменяется по следующему закону

$$R_1 \approx R_1 \cdot \left[ 1 + 0,08 \cdot \sin^{1000} 2(\omega t) \right]. \quad (4)$$

Формула переменного радиуса оси валка (4) описывает круг с четырьмя закругленными выступами.

Таким образом, движение геометрического центра кольца будет не в виде окружности, а в виде округлого четырехугольника определенного радиуса, в котором точки перегиба подтверждают наличие виброударного режима в нашей динамической схеме. При этом импульсное действие выступов на валок дополнительным радиальным ускорением точки контакта  $K$ , которое вызвано смещением (4) порождает дополнительную инерционную силу

$$F_{\ddot{a}in} = -m \cdot \ddot{R}_1, \quad (5)$$

создающую дополнительный импульсный момент с амплитудой  $G$  и частотой  $\omega_1 = \frac{8\pi}{\omega n_*}$ . Для количества выступов  $n_1 = 4$   $\omega_1 = \frac{2\pi}{\omega}$ , а для  $n_1 = 8$   $\omega_1 = \frac{\pi}{\omega}$ , что является основным расчетным вариантом.

Введение ударных элементов привело к появлению высокочастотных ударных импульсов, что и являлось целью модернизации конструкции.

Для определения амплитуд импульсных моментов в математическую модель задачи прибавим в моменты внешних сил импульсные моменты

$$G_0 = G \cdot \sum_{s=1}^{n_1} \delta(t - t_s).$$

При этом, если невозмущенное движение является равномерным вращением вала с периодом  $T = \frac{8\pi}{\omega}$ , то при мгновенном приложении импульсных моментов  $t_s = \frac{8\pi}{\omega n_*}$ . Поэтому, подставив в формулу (1) вместо константы  $R_1$  ее переменное значение (4) и введя импульсные действия в моменты удара  $t = t_s$ , получим

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -\frac{2R_2}{(3R_2^2 - R_3^2)} \left[ -\left( R_2 - R_1 \cdot \left( 1 + 0,08 \cdot \sin^{1000} 2(\omega t) \right) + R \cos \alpha \right) \frac{d\omega}{dt} + R\omega^2 \sin \alpha - g \sin(\varphi - \alpha) \right] + \sum_{s=1}^{n_1} G\delta(t - t_s), \quad (6)$$

где  $G$  – амплитуда импульсных моментов,  $\delta(t - t_*)$  – единичная импульсная функция (дельта-функция Дирака),

$$t_s = \frac{T}{n_1}, \quad T = \frac{8\pi}{\omega}.$$

Таким образом, в колебательную систему, которая была введена в периодический режим колебаний с периодом  $T$ , вводятся импульсные возмущения с более высокими частотами при кратном соотношении  $n_*$  между ними, что вызывает виброударный процесс, который расширяет частотный спектр входного воздействия и содействует разрушению слипшихся образо-

ваний в класифіцируемой горной массе.

**Выводы.** Наличие выступов на оси валка качественно влияет не только на поведение колебательной механической системы, но и на характер протекания рабочего процесса, при котором увеличивается его эффективность и производительность, на основе генерирования дополнительных механических высокочастотных импульсов, необходимых для разрушения слипшихся образований в класифіцируемом сыпучем материале. На основе введенных и проанализированных изменений в системе составлено дифференциальное уравнение движения для угла запаздывания угловой частоты вращения валка, которое совместимо с разработанной ранее механической моделью валкового виброкласификатора.

**Список литературы:** 1. *Надутый В.П.* Синтез параметров валковых вибрационных класификаторов: монография / *В.П. Надутый, В.А. Остапенко, В.Ф. Ягнюков.* – К.: Наук. думка, 2006. – 198 с. 2. Пат. № 71721А UA, МКИ 7В 07В 1/14 (2004.12). Валковый класифікатор / *В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков;* заявник і патентовласник ІГТМ НАН України; заявл. 29.09.03; опубл. 15.12.04, Бюл. № 12. 3. *Надутый В.П.* Определение ускорений и сил инерции при вращении валков вибрационного класификатора / *В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков* // Геотехническая механика. – 2012. – Вып. 107. – С. 99 – 104. 4. *Надутый В.П.* Определение условий устойчивости вращательного движения рабочих органов валкового класификатора / *В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, И.В. Ягнюкова* // Геотехническая механика. – 2012. – Вып. 105. – С. 267 – 276. 5. *Надутый В.П.* Результаты промышленной апробации валкового вибрационного класификатора / *В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков* // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – Вип. 1 (65). – С. 73 – 76.

*Поступила в редколлегию 23.08.13*

УДК 622.517.519

**Модернизация вибрационного валкового класификатора на основе использования виброударного режима** / *В.П. НАДУТЫЙ, А.И. ЕГУРНОВ, И.В. ЯГНЮКОВА* // Вісник НТУ «ХП». – 2013. – № 57 (1030). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 89 – 96. – Бібліогр.: 5 назв.

Запропоновано модернізовану схему робочого органа валкового віброкласифікатора. Визначено умови віброударного режиму його роботи і представлено основні розрахункові залежності.

**Ключові слова:** валковий класифікатор, віброударний режим, вібробуджувач, дебалансна маса, математична модель.

The modernized chart of executive device of roller vibroclassifier is offered. The conditions of its vibroimpact mode are determined and basic calculation dependencies are represented.

**Keyword:** roller classifier, vibro-impact mode, vibration exciter, unbalanced weight, the mathematical model.