

УДК 621.926.3

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ  
ЭКСЦЕНТРИКОВОГО ВАЛКА ВИБРОВАЛКОВОГО  
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

*Сиваченко Л.А.<sup>1</sup>, Сотник Л.Л.<sup>2</sup>, Русан С.И.<sup>2</sup>*

*1. Учреждение образования «Белорусско-Российский  
университет», г. Могилев*

*2. Учреждение образования «Барановичский государственный  
университет», г. Барановичи*

*Предложена новая конструкция вибровалкового измельчителя для переработки материалов. Описаны ее основные конструктивные элементы. Выполнен кинематический анализ работы вала эксцентрикочного вала. Описано уравновешивание движения точки вала.*

*Ключевые слова: вибрационные машины, вибровалковый измельчитель, эксцентрикочный вал, эксцентриситет, уравнения движения.*

KINEMATIC ANALYSIS OF SUPPLEMENTARY SHAFT OF  
VIBROROLL GRINDER

*Sivachenko L.A.<sup>1</sup>, Sotnik L.L.<sup>2</sup>, Rusan S.I.<sup>2</sup>*

*1 Educational institution "Belarussian-Russian University", Mogilev*

*2 Educational institution "Baranovich State University", Baranovich*

*A modern design of vibroroll grinder for processing materials is offered. Its basic structural elements are described. Kinematic analysis of work of a roll of supplementary shaft is made. Equilibration of the movement of a point of a roll is described.*

*Keywords: vibration machine, vibroroll grinder, supplementary shaft, eccentricity, equations of motion.*

В современном производстве большое внимание уделяется увеличению производительности и снижению энергозатрат оборудования. В связи с этим возникает вопрос о совершенствовании и модернизации промышленного оборудования, большая часть которого на перерабатывающих предприятиях морально устарела.

Способы измельчения материалов разнообразны, однако основными из них являются механические, такие как раздавливание, удар и истирание [1, 2].

Одним из подходов к решению проблемы является переход

простого процесса измельчения в более сложный механизм управляемого изменения свойств перерабатываемой среды [3]. Это ведет к созданию измельчителей повышенной интенсивности рабочего процесса: вибрационных, планетарных, струйных, электромагнитных и ряда других.

Поиск теоретически и экспериментально обоснованных рациональных параметров, определяющих эффективный режим работы вибровалкового измельчителя, является актуальной научно-технической задачей, решение которой имеет большое практическое значение.

Схема одной из новых конструкций вибровалкового измельчителя представлена в разрезе на рисунке 1.

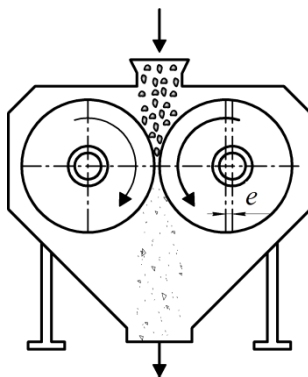


Рисунок 1 — Схема вибровалкового измельчителя.

Основными его звеньями являются два цилиндрических вала, приводимые в движение отдельными электродвигателями. Левый из них совершает абсолютное вращательное движение, правый — составное [4].

Динамическое воздействие на измельчаемую среду в зоне разрушения зависит от кинематических характеристик движения валков. Исследуем движение правого вала. Его пространственная схема показана на рисунке 2.

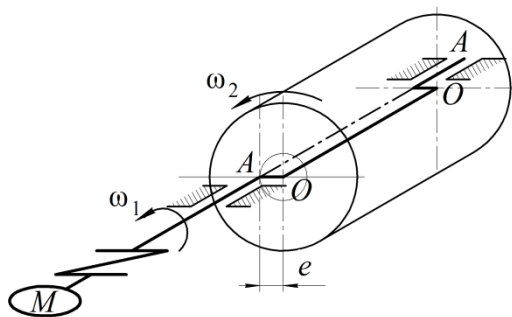


Рисунок 2 — Схема правого вала.

Моделировать соединение вала с осью  $AA$  ротора электродвигателя  $M$  можно посредством коленчатого вала. Функцию кривошипа выполняет цилиндрический эксцентрик, жестко соединенный с осью  $AA$ . Его собственная ось симметрии  $OO$  сдвинута относительно оси ротора  $AA$  на расстояние  $e$ , называемое эксцентриситетом. Поскольку сечение вала, нормальное к оси  $Az$ , не изменяются вдоль этой оси, то пространственный объект будем описывать одним его сечением. Такое сечение вала и эксцентрика показано на рисунке 3.

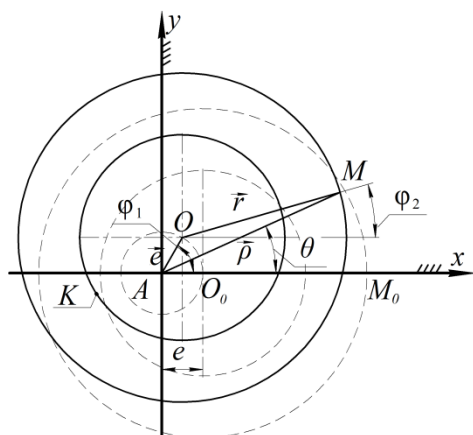


Рисунок 3 — Схема сечения эксцентрикового вала.

Контактирование вала и эксцентрика осуществляется через подшипники  $K$ , которые рассматриваются как внутренняя связь в системе. Внешней связью служат подшипники  $A$ , установленные на

раме (корпусе) измельчителя. Значит механическая система вал-эксцентрик-валок имеет две степени свободы. Для определения ее положения в абсолютной системе координат необходимо задавать две обобщенные координаты. Положение оси вала с эксцентриком будем определять углом  $\varphi_1$ , а вала относительно оси  $OO$  —  $\varphi_2$ . Описанная механическая система теоретически допускает три варианта движения:

1) круговое поступательное ( $\varphi_2=0$ ) движение, определяемое вращением эксцентрика;

2) составное поступательно-вращательное, при котором  $\varphi_2 \neq 0$ ;

3) вращательное движение вокруг оси  $AA$   $\varphi_2 = \varphi_1$ .

Рассмотрим эти варианты более подробно.

Валок совершает круговое поступательное движение. При этом все прямые, параллельные оси  $OO$ , в том числе и образующие цилиндрической поверхности вала, совершают такие же движения, как и его ось  $O$ . А в нормальных сечениях вала (рисунок 3) все точки описывают окружности радиуса  $e$  (как и точка  $O$ ) и движутся по своим траекториям со скоростью  $v_M = \omega_1 e$  (м/с) и ускорениями  $a_M = \omega_1^2 e$  (м/с<sup>2</sup>). Векторы скоростей  $\vec{v}_M$  направлены по касательным к окружностям, а ускорений  $\vec{a}_M$  — по нормальям к ним в сторону центров.

Введем систему осей координат с началом в неподвижной точке  $A$ .

Тогда уравнения окружностей записываются в виде (рисунок 4):

$$x_M = x_C + e \cos \varphi_1, \quad y_M = y_C + e \sin \varphi_1 \quad (1)$$

где  $x_C, y_C$  — координаты центров окружностей.

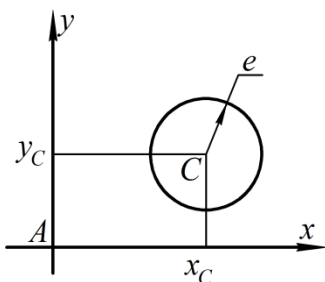


Рисунок 4 — Анализ движения.

Валок совершает сложное движение, при котором эксцентрик

вращается с угловой скоростью  $\omega_1$ , а валок с относительной скоростью  $\omega_2$  вокруг оси симметрии  $OO$  эксцентрика. Правый валок приводится во вращательное движение посредством сил сцепления, возникающих в зоне контакта с измельчаемыми фракциями. Эти силы, как известно, зависят от таких нестабильных факторов как нормальное давление в зоне контакта и коэффициент трения скольжения. Поэтому величина  $\omega_2$  устанавливается приближенно из опытов.

Найдем уравнения движения точки  $M$ , которая в исходном положении (рисунок 3) обозначена буквой  $M_0$ .

В произвольный момент времени ее радиус-вектор равен  $\vec{\rho} = \vec{e} + \vec{r}$ . Проецируя  $\vec{\rho}$  на оси координат, находим:  $x_M = \rho \cos \theta$ ,  $y_M = \rho \sin \theta$  или:

$$x_M = e \cos \varphi_1 + r \cos \varphi_2, \quad y_M = e \sin \varphi_1 + r \sin \varphi_2 \quad (2)$$

где  $\varphi_1 = \omega_1 t$ ,  $\varphi_2 = \omega_2 t$ .

Для определения скоростей произвольной точки  $M$  валка будем рассматривать его составное движение как плоскопараллельное. В качестве полюса примем точку  $O$  (рисунок 5).

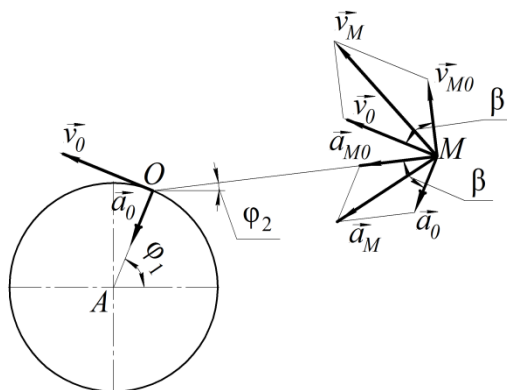


Рисунок 5 — Определение скоростей и ускорений точки  $M$ .

Тогда  $\vec{v}_M = \vec{v}_O + \vec{v}_{M0}$ , где  $\vec{v}_O = \vec{v}_1$  — скорость полюса  $O$ ;  $\vec{v}_{M0} = \vec{v}_2$  — скорость точки  $M$  относительно  $O$ . Геометрическое суммирование векторов  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  показано на рисунке 5.

По теореме косинусов находим:

$$v_M = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2 \cos \beta} . \quad (3)$$

Аналогично, определяем ускорение  $a_M$ , зная, что  $\vec{a}_M = \vec{a}_O + \vec{a}_{MO}$ ,  $\vec{a}_O = \vec{a}_1$ ,  $\vec{a}_{MO} = \vec{a}_2$ :

$$a_M = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \beta} . \quad (4)$$

где нормальные ускорения  $a_1$  и  $a_2$  определяются по формулам:

$$a_1 = \omega_1^2 e \text{ (м/с}^2\text{)}, \quad a_2 = \omega_2^2 r \text{ (м/с}^2\text{)};$$

угол  $\beta = \varphi_1 - \varphi_2$ .

Валок совершает вращательное движение вокруг оси  $AA$ . Такое движение могло бы иметь место при заклинивании подшипников между валком и эксцентриком, что на практике исключено. Рассматривать такой вариант не будем.

Уточним формулу обобщенной координаты  $\varphi_2$ . Предполагалось, что  $\varphi_2 = \omega_2 t$ ,  $\omega_2 = const$ . Также отмечалось, что вращение правого вала вызывается силой сцепления измельчаемых фракций с его поверхностью, которая зависит от давления на валок и свойств его поверхности. Логично предположить, что это давление не постоянно, а изменяется по гармоническому закону, определяемому вращением эксцентрика с частотой  $\frac{n_1}{60}$  Гц. Тогда относительную угловую скорость вала можно определить по формуле:

$$\omega_2(t) = \omega_2^{cp} - \omega_{2a} \cos\left(\frac{\pi n_1}{30} t\right) \quad (5)$$

где  $\omega_2^{cp} = const$  — средняя угловая скорость вала;  $\omega_{2a}$  — амплитуда изменяемой составляющей угловой скорости  $\omega_2(t)$  (рисунок 6). Значения величин  $\omega_2^{cp}$  и  $\omega_{2a}$  определяются из опытов.

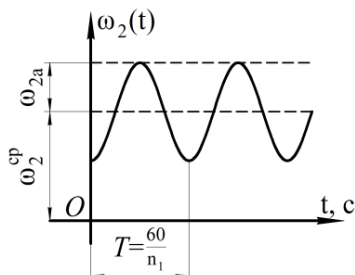


Рисунок 6 — Закон изменения угловой скорости вала.

Находим обобщенную координату. Так как  $\omega_2(t) = \frac{d\varphi_2}{dt}$ , то  $d\varphi_2 = \omega_2(t)dt$ , откуда  $\varphi_2 = \int \omega_2(t)dt$  или

$$\varphi_2 = \omega_2^{cp} t + \frac{\pi n_1}{30} \omega_{2a} \sin\left(\frac{\pi n_1}{30} t\right) \quad (6)$$

При выводе формулы (6) предполагаем, что при  $t_0$   $\varphi_2 = 0$ .

Проведённый теоретический анализ движения вала, установленного на эксцентриковом валу, описывает кинематические параметры рабочего процесса, позволяет установить закономерности функционирования вибровалкового измельчителя, как сложной технической системы.

Выполненные теоретические расчеты положены в основу создания экспериментального исследовательского оборудования.

#### Список литературы

1. Ревнивцев, В.И. Селективное разрушение минералов / В.И. Ревнивцев [и др.]; под ред. В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1988. – 287 с.
2. Богданов, В.С. Современные измельчители: характеристика и оценка для процесса помола клинкера / В.С. Богданов, В.З. Пирозкий // Цемент и его применение. – 2003. – № 4. – С. 10–15.
3. Хайнике Г. Трибохимия / Г. Хайнике – М.: Мир, 1987. – 584 с.
4. Сиваченко, Л.А. Вибровалковый измельчитель и основы его проектирования / Л.А. Сиваченко, И.А. Богданович, Л.Л. Сотник. Сб. науч. тр. Современные технологии и методы расчетов в строительстве — Луцк: Изд-во Вежа-Друк, 2016. Вып. 5. — С. 32—39.