

УДК 621.926

В. А. Дударев¹, А. Д. Михальков², В. С. Михальков², Л. А. Сиваченко²

¹Общество с ограниченной ответственностью «Домостроение», ул. Дубровенка Левая, д. 32, к. 33,
212030 Могилев, Республика Беларусь

²Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет», Министерство образования Республики Беларусь,
пр-т Мира, 43, 212030 Могилев, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена область применения предлагаемой мельницы. Предложена конструкция вертикальной вибрационной мельницы для доизмельчения строительных материалов. Выполнен кинематический анализ приводного механизма. Построена математическая модель работы приводного механизма. Даны рекомендации конструктивного исполнения отдельных структурных элементов приводного механизма мельницы.

Ключевые слова: приводной механизм; эксцентриковый вал; помольная камера; кинематический анализ; математическая модель.

Рис. 3. Библиогр.: 4 назв.

V. A. Dudarev¹, A. D. Mikhalkov², V. S. Mikhalkov², L. A. Sivachenko²

¹Limited liability company “Domostroenie”, 32 Dubrovenka Levaya Str., k. 33,
212030 Mogilev, the Republic of Belarus

²Interstate Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University”, Ministry of Education
of Republic of Belarus, 43 Mira Ave., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus

INVESTIGATION OF THE OPERATION OF A VERTICAL VIBRATION MILL FOR GRINDING BUILDING MATERIALS

The scope of application of the proposed mill is considered. The design of a vertical vibrating mill for grinding building materials is proposed. The kinematic analysis of the drive mechanism is performed. A mathematical model of the drive mechanism operation is constructed. Recommendations for the design of individual structural elements of the drive mechanism of the mill are given.

Key words: drive mechanism; eccentric shaft; grinding chamber; kinematic analysis; mathematical model.

Fig. 3. Ref.: 4 titles.

Введение. Измельчение является важнейшим технологическим процессом подготовки строительных материалов, который позволяет сделать материал химически активным и подготовить к химическому взаимодействию при возможной дальнейшей обработке, а также получить тонкодисперсный однородный по составу материал или гомогенную смесь разнородных материалов. В результате воздействия на материал существенно изменяются свойства получаемого продукта.

Материалы и методы исследования. На рисунке 1, а, представлена схема вертикальной вибрационной мельницы для доизмельчения строительных материалов. Вертикальная вибрационная мельница состоит из рамы 1 с установленным на ней электроприводом 3 с эксцентриковым валом 2, на концах которого подвешены две помольные камеры 4 посредством тяг 7. Помольные камеры соединены между собой коромыслом 6 с помощью шарнира 5.

Крутящий момент от электропривода передается на вал, через эксцентрики связанный с двумя помольными камерами 4, подвешенными на тягах 7. При работе мельницы камеры 4 с измельчаемым материалом и стальными шарами совершают колебательные движения вверх-вниз, металлические шары, находящиеся в камерах совместно с измельчаемым материалом, совершают хаотические движения. Прямолинейное движение помольных камер задано уравнением $y = a \sin(kt + \beta)$, описывающим гармоническое колебательное движение. Эксцентрики установлены так, что камеры находятся в противофазах: если левая камера вверху, то правая внизу.

На рисунке 2 представлена лабораторная установка вертикальной вибрационной мельницы.

Рассмотрим левую часть приводной системы вертикальной вибрационной балансирной мельницы, эксцентрик представим в виде кривошипа, а помольную камеру — ползуном.

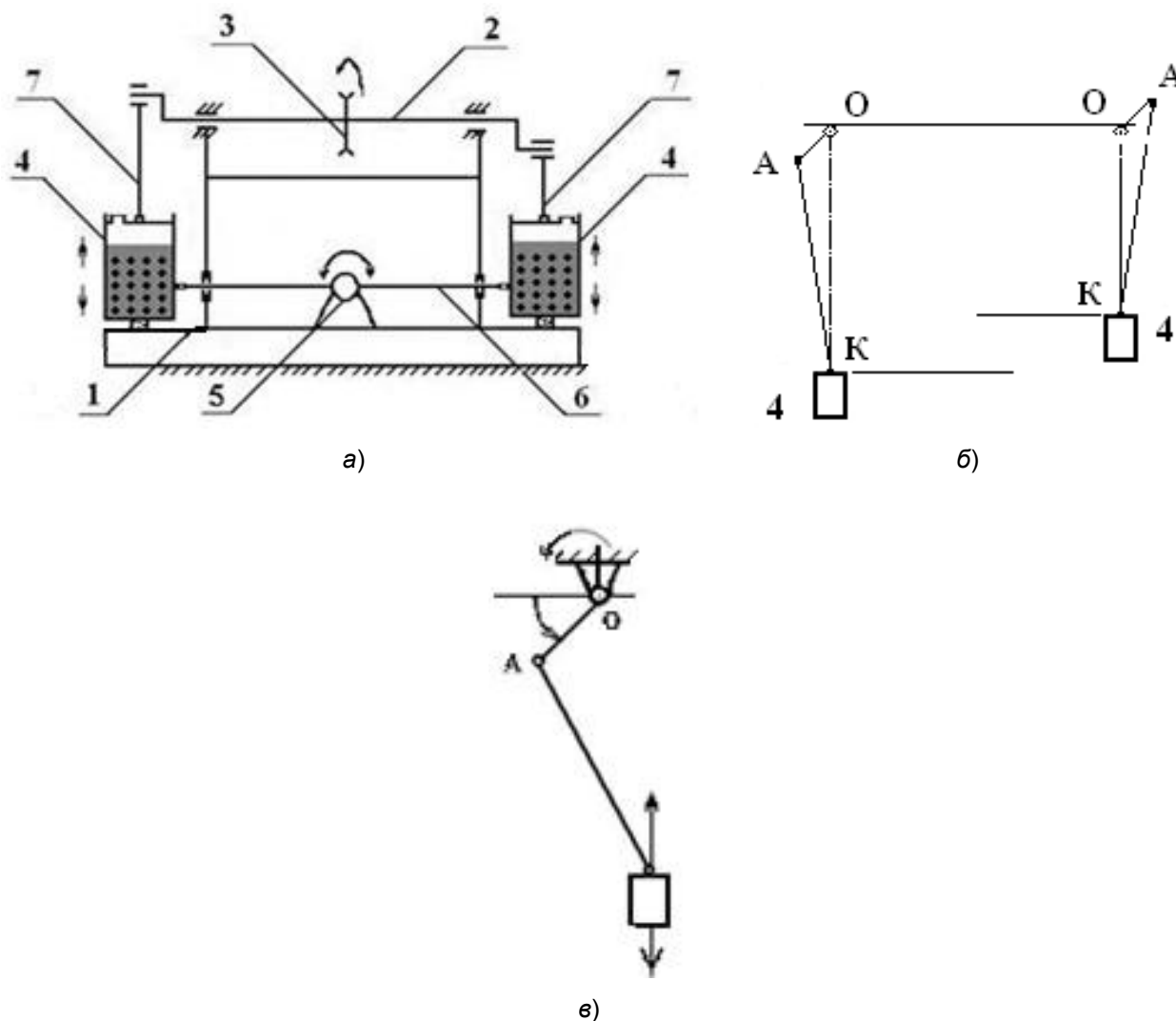


Рисунок 1. — Схема вертикальной вибрационной мельницы: принципиальная схема мельницы (а); кинематическая схема приводного механизма (б); один из двух одинаковых приводных механизмов (вид сбоку) (в)



Рисунок 2. — Лабораторная установка вертикальной вибрационной мельницы

Рассматриваемый приводной механизм — один из наиболее распространенных простых, надежных и жестких типов исполнительных механизмов, которые достаточно полно рассмотрены в многочисленных работах, например, в работах основоположников теории механизмов [1; 2]. В них рассмотрены задачи и методы анализа и синтеза этого механизма. Но в связи со спецификой использования в реальных конкретных конструкциях возникает необходимость проведения дополнительных исследований кинематических свойств подобных механизмов.

Рассмотрим основные кинематические характеристики эксцентрикового механизма, которые необходимы для его кинематического анализа. На рисунке 3 показана в рабочем положении схема приводного механизма вертикальной вибрационной мельницы для тонкого измельчения строительных материалов.

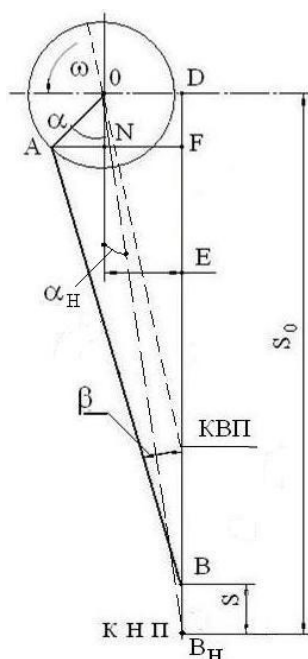


Рисунок 3. — Расчетная схема приводного механизма мельницы в рабочем положении

Приводной механизм содержит три подвижных звена, три вращательные и одну поступательную кинематические пары. Крайние положения механизма при крайнем верхнем и крайнем нижнем положениях помольной камеры показаны штриховой линией.

Цель настоящей работы — определение основных параметрических характеристик приводного механизма, необходимых для его анализа.

Результаты исследования и их обсуждение. Воспользуемся методикой, изложенной в работах [3; 4], и введем следующие обозначения: R — радиус эксцентрика в текущий момент времени ($OA = R$); L — длина тяги, соединяющей помольную камеру с эксцентриком; E — смещение оси перемещения помольной камеры от вертикальной оси (эксцентриситет), или дезаксиал.

Эксцентриситет будем считать положительным, если он направлен в сторону вращения кривошипа в его нижнем положении, и отрицательным, если он направлен против вращения кривошипа.

Отметим еще два параметра, которые представляют собой относительные величины:

$\lambda = \frac{R}{L}$ — коэффициент шатуна и $\varepsilon = \frac{E}{R}$ — степень эксцентриситета.

Пусть условие существования механизма $R + |E| \leq L$ или в относительных единицах $\lambda(1 + |\varepsilon|) \leq 1$. Запишем значения относительных параметров λ и ε в связи с условиями существования механизма:

$$\lambda \leq \frac{1}{1 + |\varepsilon|}; \quad (1)$$

$$|\varepsilon| \leq \frac{1 - \lambda}{\lambda}. \quad (2)$$

Для случая равенства в выражениях (1) и (2) имеют место недопустимые углы давления, но работа приводного механизма практически невозможна. Текущее положение рычагов приводного механизма определяется углом α , углом β и величиной S , вертикальное положение помольной камеры относительно крайнего нижнего положения.

Текущее положение помольной камеры зависит от угла α , т. е. $S = f(\alpha)$. Вертикальное положение помольной камеры определяем по формуле

$$S = S_0 - R \cos \alpha - L \cos \beta, \quad (3)$$

где $S_0 = \sqrt{(R + L)^2 - E^2}$.

Из двух прямоугольных треугольников OAN и ABF определяем зависимость между углами α и β : $\sin \beta = \lambda(\sin \alpha + \varepsilon)$, откуда можно определить угол β : $\beta = \arcsin \lambda(\sin \alpha + \varepsilon)$.

С учетом проведенных преобразований выражение (3) можно переписать в виде

$$S = R \left(\frac{\sqrt{(1 + \lambda)^2 - \varepsilon^2 \lambda^2}}{\lambda} - \cos \alpha - \frac{\cos \beta}{\lambda} \right). \quad (4)$$

Запишем неявную функцию $\Phi(S, \alpha) = 0$ в виде $\Phi(S, \alpha) = S - S_0 + R \cos \alpha + L \cos \beta$.

Возьмем первую и вторую выражения (4) по координате α :

$$\Pi' = \frac{\partial S}{\partial \alpha}; \quad \Pi'' = \frac{\partial^2 S}{\partial \alpha^2}.$$

Продифференцируем неявную функцию $\Phi(S, \alpha) = 0$ по следующим формулам [5]:

$$\Pi' = \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha}}{\frac{\partial \Phi}{\partial S}}; \quad \Pi'' = \frac{\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} + 2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha \partial S} \Pi' + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial S^2} \Pi'^2}{\frac{\partial \Phi}{\partial S}}.$$

Запишем частные производные:

$$\frac{\partial \hat{O}}{\partial S} = 1, \quad \frac{\partial^2 \hat{O}}{\partial S^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 \hat{O}}{\partial \alpha \partial S} = 0, \quad \frac{\partial \hat{O}}{\partial \alpha} = -R \sin \alpha - L \sin \beta \frac{d\beta}{d\alpha} = -R \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta},$$

$$\frac{\partial \hat{O}}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{\partial \hat{O}}{\partial \alpha} \right) = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(-R \sin \alpha - L \sin \beta \frac{d\beta}{d\alpha} \right) = -R \cos \alpha - L \cos \beta \left(\frac{d\beta}{d\alpha} \right)^2 - L \sin \beta \frac{d^2 \beta}{d\alpha^2}.$$

Продифференцируем выражение (3) по переменной α и определим производные угла β :

$$\cos \beta \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} = \lambda \cos \alpha. \quad (5)$$

Преобразуем выражение (5):

$$\frac{\partial \beta}{\partial \alpha} = \lambda \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}; \quad \frac{\partial^2 \beta}{\partial \alpha^2} = \lambda \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right) = \frac{-\lambda \sin \alpha}{\cos \beta} + \frac{\lambda^2 \sin \beta \cos^2 \alpha}{\cos^3 \beta}.$$

После преобразований

$$\Pi' = R \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}; \quad \Pi'' = R \left[\frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta} + \frac{\lambda \cos^2 \alpha}{\cos^3 \beta} \right].$$

Перемножим первую передаточную функцию на угловую скорость ω ведущего звена, получим скорость движения помольной камеры в любой момент времени:

$$V = \omega \Pi' = \omega R \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}. \quad (6)$$

Перемножим вторую передаточную функцию на квадрат угловой скорости ω ведущего звена с учетом того, что она постоянна, получим ускорение помольной камеры:

$$J = \omega^2 \Pi'' = \omega^2 R \left[\frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta} + \frac{\lambda \cos^2 \alpha}{\cos^3 \beta} \right]. \quad (7)$$

Выражения (4), (6) и (7) являются точными формулами для определения кинематических характеристик приводного эксцентрикового механизма вертикальной вибрационной мельницы.

Заключение. Полученные формулы однозначно определяют кинематические характеристики дезаксиального кривошипно-ползунного механизма вертикальной вибрационной мельницы.

Список цитируемых источников

1. *Левитский, Н. И.* Теория механизмов и машин / Н. И. Левитский. — М. : Наука, 1979. — 576 с.
2. *Артоболевский, И. И.* Теория машин и механизмов / И. И. Артоболевский. — М. : Наука, 1988. — 640 с.
3. *Семенов, М. В.* Кинематические и динамические расчеты исполнительных механизмов / М. В. Семенов. — Л. : Машиностроение, 1974. — 432 с.
4. Кинематические характеристики дезаксиального кривошипно-ползунного механизма / А. В. Явтушенко [и др.] // Вісн. Кременчуц. держ. політехн. ун-ту ім. М. Остроградського. — Кременчук : КДТУ, 2009. — Вип. 6/2009 (59, ч. 2). — С. 94—99.

Поступила в редакцию 30.04.2021.