

УДК 621.926.32

Л. Л. Сотник¹; С. И. Русан¹, кандидат технических наук, доцент;**Л. А. Сиваченко²**, доктор технических наук, профессор¹Учреждение образования «Барановичский государственный университет, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com²Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», ул. Грушевская, 32, 212003 Могилев, Республика Беларусь, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВИБРОВАЛКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДВИЖЕНИЯ ВАЛКА

В статье представлены результаты аналитических исследований пропускной способности вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения эксцентрикового валка. Пропускная способность вибровалкового агрегата сравнивается с валковым агрегатом. Отличительной особенностью вибровалкового измельчителя является эксцентрично установленный валок. Проведен анализ влияния на производительность геометрических (величина эксцентриситета e) и технологических (коэффициент соотношения скоростей валков k_v и частота вращения эксцентрикового вала $n_{эв}$) параметров. Дана оценка влияния геометрических и технологических параметров на производительность вибровалкового агрегата с гармоническим законом движения валка.

Ключевые слова: вибровалковый измельчитель; производительность; измельчение материалов; эксцентриситет; зазор; валки.

Рис. 8. Библиогр.: 16 назв.

L. L. Sotnik¹; S. I. Rusan¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;**L. A. Sivachenko²**, Doctor of Technical Sciences, Professor¹ Educational institution "Baranovichi State University", 21 Voykova Str., 225406 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com² Inter-State Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", 32 Grushevskaya Str., 212003 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

ANALYSIS OF THE THROUGHPUT OF A VIBRATING GRINDER WITH VARIABLE PARAMETERS OF THE ROLL MOVEMENT

The article presents the results of analytical studies of the throughput of a vibratory roll grinder with movement variable parameters of an eccentric roll. The throughput capacity of the vibrating roller unit is compared with the roller unit. A distinctive feature of the vibratory roll grinder is the eccentrically mounted roll. The analysis of the impact on the performance of geometric (the value of eccentricity e) and technological (roll speeds ratio k_v and the rotation frequency of the eccentric shaft $n_{эв}$) parameters has been carried out. An assessment of the influence of geometric and technological parameters on the performance of a vibratory roll unit with a harmonic law of roll motion is given.

Key words: vibratory roll grinder; productivity; material crushing; eccentricity; gap; rolls.

Fig. 8. Ref.: 16 titles.

Введение. Современная отечественная и мировая промышленность не стоит на месте, она ежегодно стремится перейти на более высокие уровни технологичности и производительности. Все это возможно лишь при совместном движении с развивающейся наукой и техникой.

На сегодня среди всего многообразия известных способов дезинтеграторной переработки материалов в дисперсное состояние в промышленности строительных материалов, химической и фармацевтической промышленности, наиболее распространенным и простым остается механическое измельчение.

Исходный материал разрушают и измельчают воздействием внешних сил, отличающихся локализацией, направлением и скоростью их приложения, что оказывает влияние на производительность этих агрегатов [1—4].

Оценка величины производительности вибровалкового измельчителя при внедрении в производственные линии имеет существенное значение. Величина производительности оказывает влияние на энергозатраты процесса измельчения различных материалов.

В валковых мельницах согласно [5—8] производительность зависит от физико-механических характеристик материала и геометрических параметров валков.

Материалы и методы исследования. На основе проведенного анализа классификаций, развития и совершенствования валковых мельниц разработана новая конструкция валковой мельницы с дополнительным вибрационным воздействием на измельчаемый материал. Сфера ее возможного применения определяется теми возможностями вибраций, которые известны сегодня [7; 9; 10].

Вибровалковый измельчитель относится к группе кинематических вибрационных машин, т. е. таких машин, у которых ведущее звено имеет вполне определенное абсолютное или относительное движение, зависящее только от геометрических размеров ведущего механизма.

Вибровалковый измельчитель (рисунок 1) состоит из рамы 1, на которой в соответствующих опорах посредством цапф вала 2 смонтирован ведущий валок 3 и эксцентриковый вал 4 эксцентрикового валка 5. Привод ведущего валка 3 осуществляется от электродвигателя через ременную передачу 6, а ведомого валка — от электродвигателя через ременную передачу 7. Вибрационное воздействие подается на эксцентриковый вал 4 при помощи электродвигателя через ременную передачу 8. На эксцентриковом валу 4 установлены противовесы 9 и 10 для уравнивания системы. Для загрузки и выгрузки материала предусмотрены устройства, выполненные в виде люков. Эксцентриковый вал 4 имеет эксцентриситет e относительно центральной оси эксцентрикового валка 5 [8; 11; 12].

Рабочий процесс вибровалкового измельчителя осуществляется следующим образом. Одновременно включаются электродвигатели и приводят во вращение соответствующие элементы конструкции, причем ведущий валок 3 и эксцентриковый валок 5 вращаются навстречу друг другу.

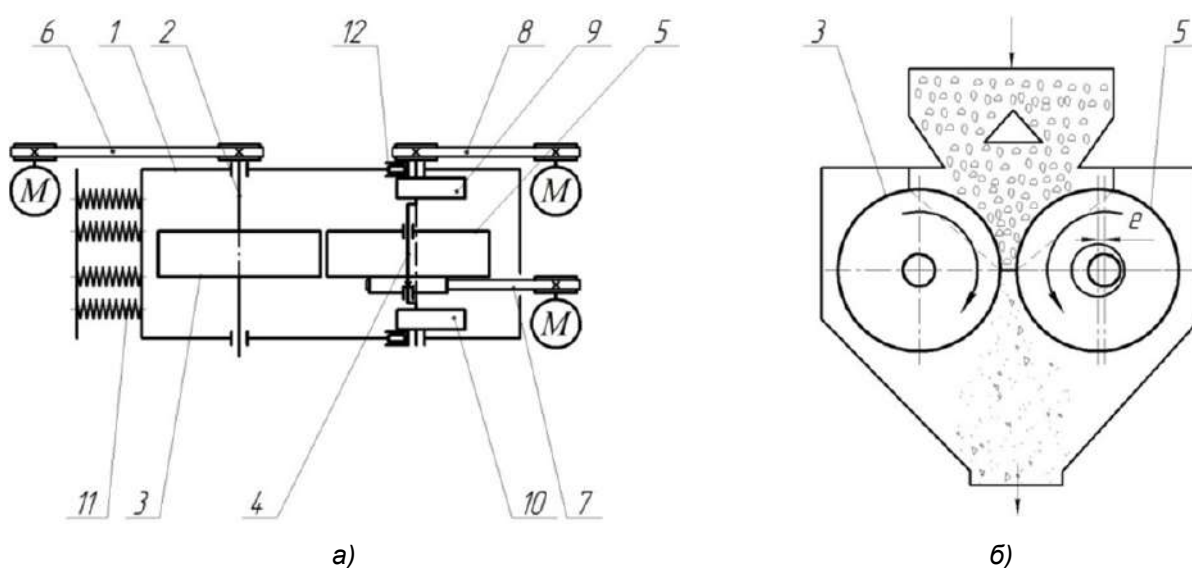


Рисунок 1. — Схема вибровалкового измельчителя: а — вид сверху; б — вид сбоку

При этом эксцентриковый вал 4 через опоры сообщает подвижному валку 5 круговые колебания с амплитудой $2e$. Через загрузочный люк в межвалковое пространство непрерывным потоком подается подлежащий обработке исходный материал и подвергается интенсивному разрушению путём воздействия на него сжимающего, сдвигового и вибрационного (ударного) усилий.

В процессе работы измельчителя ведущий валок 3 за счёт сил трения, возникающих в зоне контакта частиц материала с валком и их захвата внешней поверхностью ведущего валка 3 и реактивного момента, создаваемого силами трения эксцентрикового вала 4, приводит к вращению эксцентрикового валка 5 в направлении, противоположном вращению валка 3, что способствует захвату материала и его принудительному перемещению через межвалковое пространство. При помощи электродвигателя и ременной передачи 7 можно регулировать частоту вращения эксцентрикового валка 5, меняя тем самым интенсивность сдвигового воздействия на материал. При попадании недробимого материала в межвалковое пространство, ведущий валок 3 имеет возможность горизонтального смещения при помощи предохранительного устройства в виде системы пружин 11, упирающихся в раму 1. Обработанный таким образом материал удаляется из рабочей зоны агрегата через выгрузной люк.

Для изменения величины межвалкового пространства предусмотрены регулировочные устройства 12.

Вибрационные воздействия, реализуемые в вибровалковом измельчителе, обладают рядом достоинств по сравнению с постоянными воздействиями, используемыми в пресс-валковых измельчителях. Во-первых, это эффект облегчения преодоления сил трения. Этот эффект понимается как особое свойство вибраций уничтожать, хотя бы частично, силы трения, а также обеспечивает более равномерное распределение материала по длине валка. Во-вторых, это эффект выигрыша в силе, т. е. возможность преодоления сопротивления с меньшими усилиями при разрушении (деформации) исходного продукта и, следовательно, увеличение производительности измельчителя [13; 14].

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ пропускной способности с переменными параметрами движения валка. Для анализа производительности вибровалкового измельчителя рассмотрим ряд моделей движения валка.

В качестве модели для исследования рассматривается межвалковое пространство 1 прямоугольной формы размером $B \times b_{\max}$, находящийся в горизонтальной плоскости (рисунок 2, а).

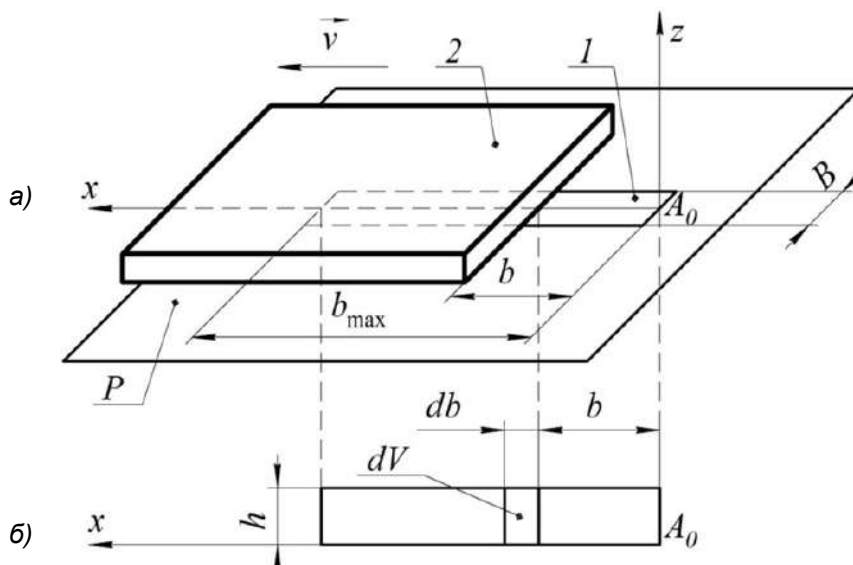


Рисунок 2. — Модель зазора и эпюра изменения объема в эталонном варианте

Пластина 2 (часть вала) может двигаться вдоль оси A_0x и частично или полностью закрывать или открывать зазор 1. Движение пластины происходит одновременно с перемещением материала через открытую часть зазора. Считаем, что материал перемещается с постоянной скоростью v_1 с бункера, находящегося над плоскостью P , вниз. Плоскость P является сечением вала по его оси.

Определим пропускную способность зазора 1 в зависимости от закона движения пластины 2. Рассматриваются три закона движения $b = b(t)$: равномерный, равнопеременный и гармонический. Для сравнительного анализа определяется и объем материала, перемещаемого через весь зазор $B \times b_{\max}$ без пластины за единицу времени (эталонный вариант). Время (продолжительность) перемещения материала на любом элементарном участке Δb зазора обозначим как τ . В общем случае τ — величина переменная: $\tau = \tau(t)$, где t время движения пластины к рассматриваемому участку Δb зазора. На участках, где зазор открывается раньше, продолжительность перемещения τ вещества через зазор больше.

Во всех указанных вариантах движения пластины время до полного открытия зазора, т. е. ее перемещение на расстояние b_{\max} , обозначим как t_1 . Такое же время принимаем и для продолжительности перемещения материала через зазор в эталонном варианте. Для него эпюра, характеризующая изменение объема перемещаемого через зазор материала по ее длине b_{\max} , представленное на рисунке 2, б, в виде прямоугольника; его сторона $h = v_1 t_1$ — высоты слоя материала, который переместился под плоскость P . Горизонтальное сечение слоя равно Bdb , его объем $dV = Bdbh$, объем всего просыпанного через зазор материала $V = \int_0^l Bhdb$ или $V = Bb_{\max} v_1 t_1$.

Для сравнения пропускных способностей различных типов зазоров удобнее пользоваться характеристикой производительности Q ($\text{м}^3 / \text{ч}$):

$$Q = \frac{V}{t_1}. \quad (1)$$

Таким образом, производительность агрегата с зазором без пластины равна $Q = Bb_{\max} v_1$, при условии, что скорость измеряется в $\text{м} / \text{ч}$, а размеры B и b — в метрах.

Исследование зазора с подвижными пластинами. На рисунке 3, а, пластина 2 движется со скоростью v влево. В момент времени t она находится на расстоянии b от начала A_0 зазора 1.

На рисунке 3, б, показана эпюра изменения объема материала, пересыпающегося под плоскость P (которая проецируется на рисунке в линию A_0x). Ординаты эпюры пропорциональны длительности τ пересыпания материала через соответствующий участок зазора.

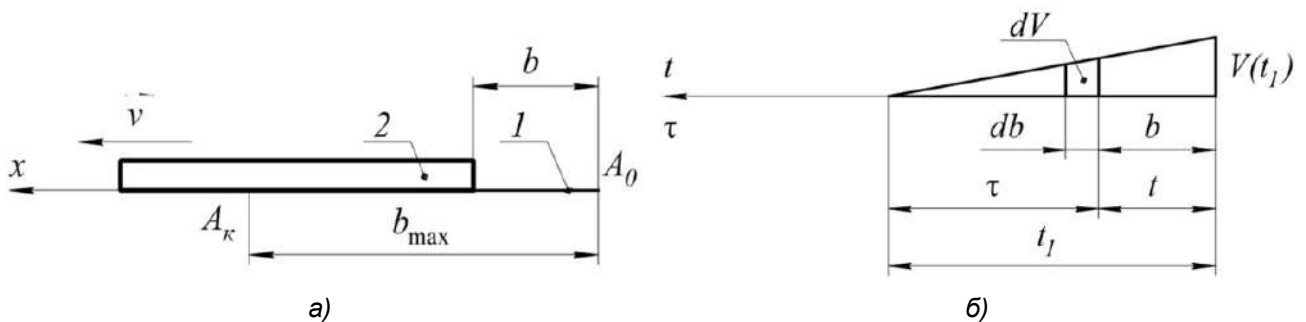


Рисунок 3. — Боковая проекция зазора и эпюр изменения объема в варианте с подвижной пластиной

Наибольший объем вещества $V(t_1)$ успевает переместиться через участок Δb , прилегающий к точке A_0 в момент времени $t = t_1$ (когда открывается весь зазор). Элементарный объем материала, который перемещается через участок зазора db за время τ ,

$$dV = Bdbv_1\tau, \quad (2)$$

где $\tau = t_1 - t$ (см. рисунок 3, б).

Пластина движется равномерно. Скорость ее движения $v = \text{const}$, по закону движения $b = vt$, $db = vdt$.

По выражению (2) находим $dV = Bvv_1(t_1 - t)dt$;

$$V = \int_0^{t_1} Bvv_1(t_1 - t)dt = Bvv_1 \int_0^{t_1} (t_1 - t)dt = ct_1 \int_0^{t_1} dt - c \int_0^{t_1} tdt = c \left(t \Big|_0^{t_1} - \frac{1}{2}t^2 \Big|_0^{t_1} \right) = \frac{1}{2}ct_1^2,$$

где $c = Bvv_1$.

$$\text{Величина } t_1 = \frac{b_{\max}}{v}, \text{ тогда } V = \frac{1}{2}c \left(\frac{b_{\max}}{v} \right)^2.$$

$$\text{Окончательно получаем } V = \frac{1}{2}Bvv_1t_1.$$

Следовательно,

$$Q = \frac{1}{2}Bb_{\max}v_1. \quad (3)$$

Пластина движется равноускоренно. Ее ускорение $a = \text{const}$, скорость $v = at$. Поскольку $v = db/dt$, то $db = vdt = atdt$. Подставляем db в формулу (2):

$$dV = Bv_1at(t_1 - t)dt = c_1t(t_1 - t)dt,$$

где $c_1 = Bv_1a$.

Определим объем перемещаемого материала:

$$V = c \int_0^{t_1} t(t_1 - t)dt = c \left(t_1 \int_0^{t_1} tdt - \int_0^{t_1} t^2 dt \right) = c \left(t_1 \frac{1}{2}t^2 \Big|_0^{t_1} - \frac{1}{3}t^3 \Big|_0^{t_1} \right) = \frac{1}{6}ct_1^3 = \frac{1}{6}ct_1^2t_1.$$

$$\text{Зная, что } b_{\max} = \frac{at_1^2}{2}, \text{ определяем } t_1^2 = \frac{2b_{\max}}{a}.$$

Следовательно, объем перемещаемого материала

$$V = \frac{1}{6}c \left(\frac{2b_{\max}}{a} \right) t_1 = \frac{1}{3}Bb_{\max}v_1t_1,$$

откуда

$$Q = \frac{1}{3}Bb_{\max}v_1. \quad (4)$$

Пластина движется по гармоническому закону. Будем считать, что пластина приводится в движение при помощи кривошипно-шатунного механизма O_2MA (рисунок 4).

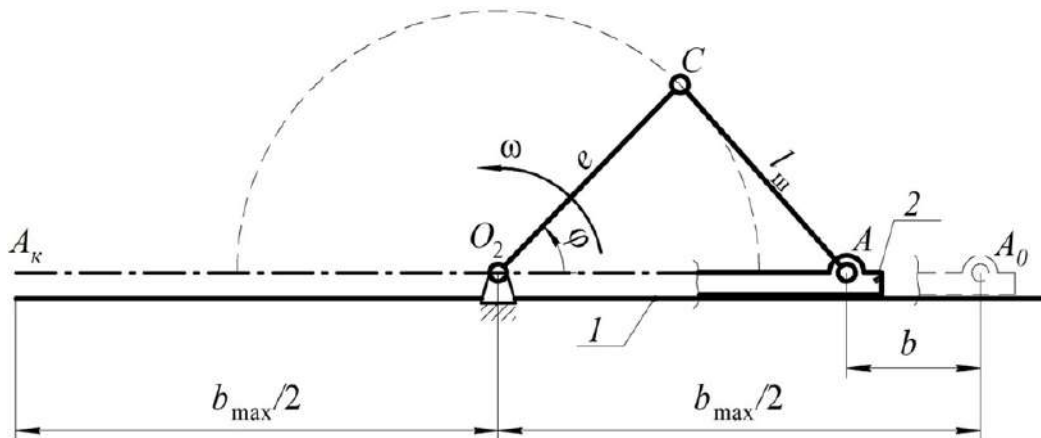


Рисунок 4. — Модель зазора с движением пластины по гармоническому закону

Ось вращения O_2 кривошипа O_2M устанавливаем посередине длины зазора $A_0O_2 = O_2A_K = b_{max} / 2$. Принимаем длины кривошипа (эксцентриситет) и шатуна одинаковыми ($l_{ш} = e$), а угловую скорость ω кривошипа постоянной, тогда его угол поворота $\phi = \omega t$. Из рисунка 4 определяем $b = 2e(1 - \cos \omega t)$.

Следовательно,

$$\frac{db}{dt} = 2e\omega \sin \omega t .$$

Согласно выражению (2) получаем:

$$dV = B(2e\omega \sin \omega t) v_1 (t_1 - t) dt = c_2 (t_1 \sin \omega t - t \sin \omega t) dt ,$$

где $c_2 = 2Be\omega v_1$.

Для определения V необходимо определить интеграл от члена $t \sin \omega t$, находим V путем интегрирования по частям:

$$\int t \sin \omega t dt = \frac{\sin \omega t}{\omega^2} - \frac{t \cos \omega t}{\omega} .$$

Таким образом,

$$V = c_2 \left[\left(\frac{t_1}{\omega} \right) (-\cos \omega t) \Big|_0^{t_1} - \left(\frac{\sin \omega t}{\omega^2} - \frac{t \cos \omega t}{\omega} \right) \Big|_0^{t_1} \right] .$$

Учитывая, что $\omega t_1 = \pi$ и $2e = b_{max} / 2$, окончательно получаем:

$$V = \frac{1}{2} B v v_1 t_1 ,$$

где $t_1 = \pi / \omega$.

Отсюда определяем производительность:

$$Q = \frac{1}{2} B b_{max} v_1 . \quad (5)$$

Углубленное исследование свойств зазора A_0A_K с гармоническим законом движения пластины позволяет установить его интересную особенность: левая половина O_2A_K обладает чуть ли не вдвое большей пропускной способностью, чем правая.

В момент времени $t = t_1$, когда кривошип повернется на угол π , открыт весь зазор, далее его пропускная способность определяется выражением (1). Но если кривошип без остановки продолжит движение, то зазор начнет закрываться. Продолжительность закрывания t_1 и объем перемещаемого за это время материала V такие же, как и при открытии.

Сравнивая пропускные характеристики выражений (3), (4), (5) с эталонной (1) и между собой, устанавливаем, что они существенно зависят от законов движения пластины. Разработанная здесь общая методика исследования пропускных способностей переменных во времени зазоров позволяет исследовать и другие варианты устройств. Для дальнейшего исследования принимаем движение валков по гармоническому закону.

Анализ производительности вибровалкового измельчителя с учетом характеристик материала. Производительность вибровалкового измельчителя (рисунок 5) зависит от следующих показателей [7; 11]:

$$Q = Bb_{\text{ср}}v_{\text{вв}}k_v\mu k_{\text{упл}}k_{\text{пр}}\rho_0k_{\text{виб}}k_e, \quad (6)$$

где $v_{\text{вв}}$ — окружная скорость вращения ведущего валка, м / с;

k_v — коэффициент соотношения частот вращения ($k_v = 0,85 \dots 1,0$) [11];

$k_{\text{пр}}$ — коэффициент проскальзывания шихты (для гладких валков $k_{\text{пр}} = 0,6 \dots 0,8$) [5];

ρ_0 — насыпная плотность материала, кг / м³;

$k_{\text{виб}}$ — коэффициент скорости вращения эксцентрикового вала ($k_{\text{виб}} = 1,0 \dots 1,25$);

k_e — коэффициент величины эксцентриситета ($k_e = 1,0 \dots 1,15$) [11; 14].

Коэффициенты соотношения частот вращения, скорости вращения эксцентрикового вала, величины эксцентриситета определяются в результате поисковых экспериментов [11; 14], для теоретического расчета их значения принимаем равным единице [7; 11; 14; 15].

Скорость вращения валков

$$v_{\text{вв}} = \pi D n_{\text{вв}}, \quad (7)$$

где $n_{\text{вв}}$ — скорость вращения ведущего валка, об. / мин.

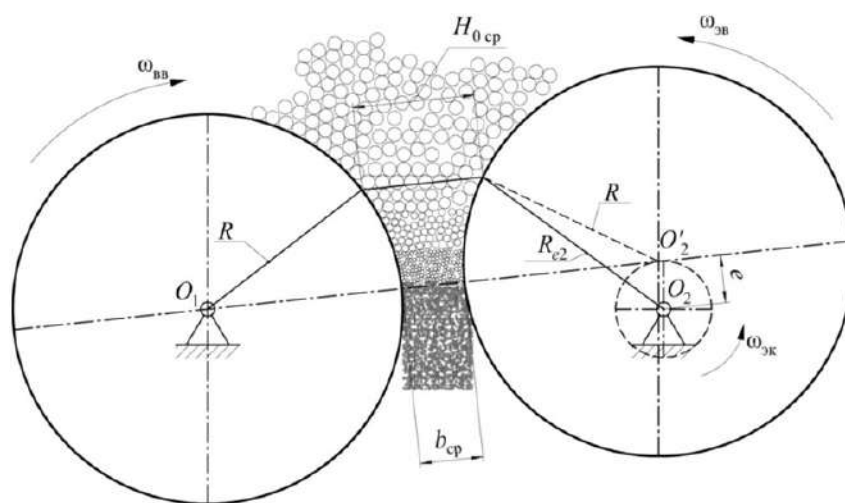


Рисунок 5. — Схема определения производительности вибровалкового измельчителя

Коэффициент уплотнения шихты

$$k_{\text{упл}} = \frac{H_{0 \text{ ср}}}{b_{\text{ср}}} = \frac{2R(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}}) + b_{\text{ср}}}{b_{\text{ср}}} = \frac{D(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}})}{b_{\text{ср}}} + 1. \quad (8)$$

С учетом приведенных выражений (7) и (8) выражение (6) принимает следующий вид:

$$Q = B b_{\text{ср}} \pi D n_{\text{вв}} k_v \mu k_{\text{пр}} \rho_0 k_{\text{виб}} k_e \left[\frac{D(1 - \cos \alpha_{\text{д ср}})}{b_{\text{ср}}} + 1 \right]. \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что производительность процесса измельчения вибровалкового измельчителя с эксцентрично установленным валком зависит от: конструктивных параметров измельчителя (геометрические размеры валков D и B , ширина зазора b и эксцентриситета e); технологических показателей процесса (частоты вращения ведущего валка $n_{\text{вв}}$, частоты вращения эксцентрикового вала $n_{\text{эв}}$); физико-механических характеристик материала (степени разрыхленности материала μ и его насыпной плотности ρ_0).

Качественной оценкой работы измельчителя является приведенная производительность, которая может быть определена по выведенной экспериментально формуле Розина—Раммлера [16]:

$$Q_{50} = Q \lg \left(10^m \sqrt{\frac{E\%}{50}} \right),$$

где m — поправочный коэффициент, зависящий от свойств материала [16].

Определим теоретическую производительность вибровалкового измельчителя на основании следующих параметров: $B = 0,05$ м, $D = 0,24$ м, $b_{\text{мин}} = 0,002$ м, $e = 0,002$ м, $n = 120$ мин⁻¹, $\rho_0 = 1\,400$ кг / м³, $k_{\text{пр}} = 0,7$, $\mu = 0,3$:

$$Q = 0,05 \cdot 0,004 \cdot 3,14 \cdot 0,24 \cdot 120 \cdot 1 \cdot 0,3 \cdot 0,7 \cdot 1\,400 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \left[\frac{0,24(1 - \cos 14)}{0,004} + 1 \right] = 14,9 \text{ кг / мин.}$$

Тогда приведенная производительность вибровалкового измельчителя по формуле Розина—Раммлера

$$Q_{50} = 14,9 \lg \left(10^{0,9} \sqrt{\frac{60}{50}} \right) = 16,21 \text{ кг / мин, или } Q_{50} = 0,97 \text{ т / ч.}$$

Построим график изменения производительности Q в зависимости от величины коэффициента соотношения частот вращения валков k_v для различных материалов (рисунок 6).

Построим график изменения производительности в зависимости от частоты вращения эксцентрикового вала $n_{\text{эв}}$ (рисунок 7).

Аналогичным образом построим график зависимости производительности Q от величины эксцентриситета e (рисунок 8).

Расчетные зависимости (см. рисунки 6—8) показывают, что все варьируемые параметры позволяют менять расчетную производительность вибровалкового измельчителя. Изменение коэффициента соотношения скоростей вращения незначительно снижает производительность (до 10 %), а частота колебаний эксцентрикового валка и величина эксцентриситета позволяют увеличить производительность до 20 %.

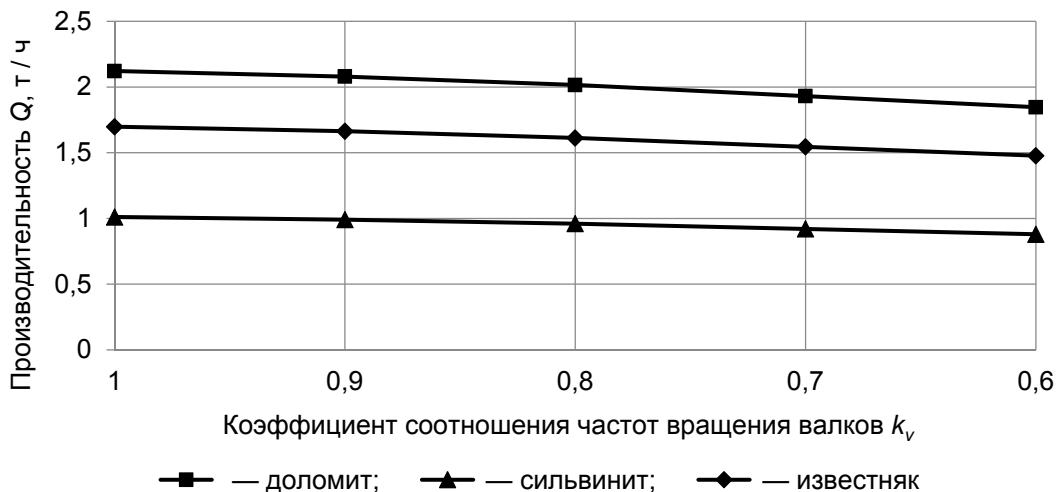


Рисунок 6. — Зависимость влияния величины коэффициента соотношения частот вращения валков k_v на производительность Q

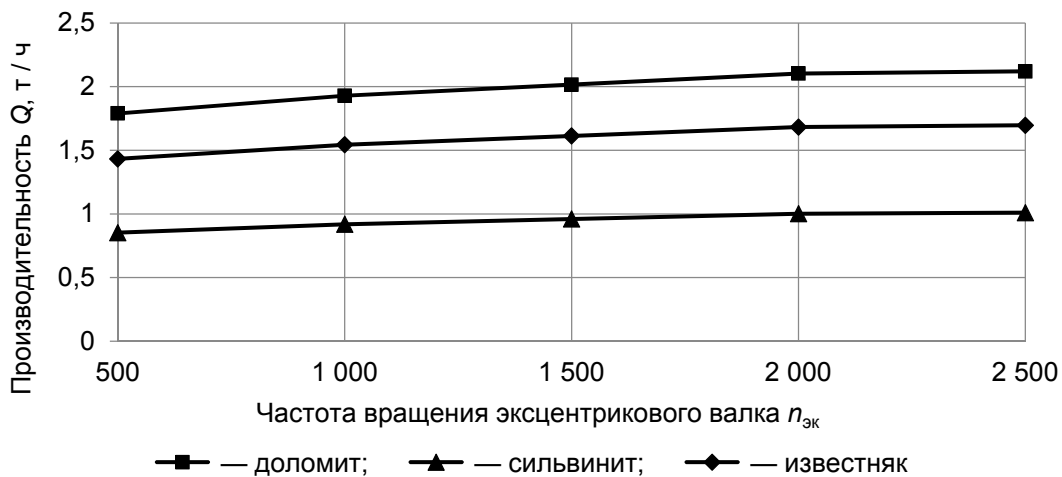


Рисунок 7. — Зависимость влияния частоты вращения эксцентрикового вала $n_{эк}$ на производительность Q

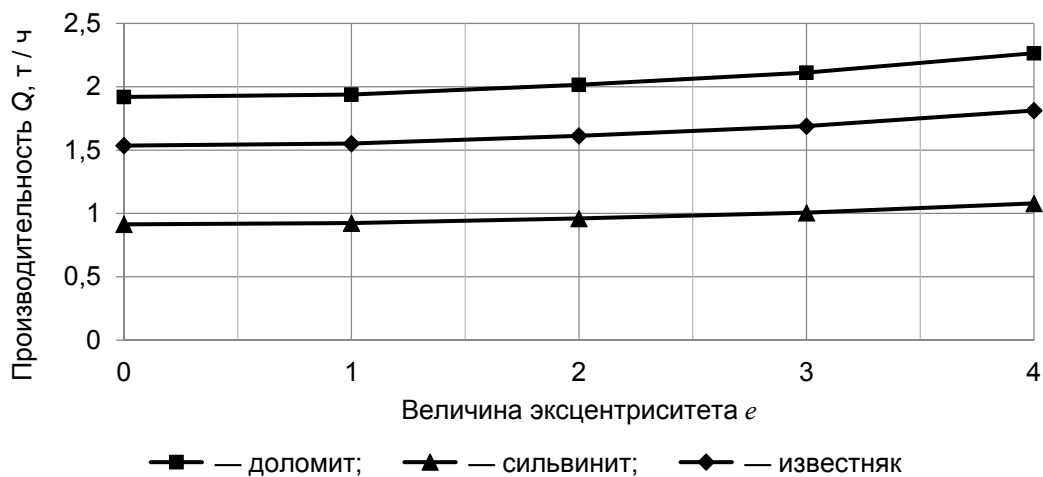


Рисунок 8. — Зависимость влияния величины эксцентриситета e на производительность Q

Закключение. Представленные аналитические выражения и графические зависимости показывают целесообразность использования вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения валка, а также варьирование параметрами: скорости вращения валков, частоты вращения эксцентрикового вала и величины эксцентриситета [7; 11; 14].

Получены аналитические выражения для расчета производительности при измельчении материалов в вибровалковом измельчителе, а также для расчета приведенной производительности в зависимости от технологических и геометрических параметров измельчителя. Полученные зависимости показывают, что наличие эксцентрично установленного валка позволяет повысить производительность до 20 %, но это нуждается в практическом экспериментальном исследовании.

Проведенный анализ производительности в зависимости от варьируемых факторов показал актуальность исследований и необходимость проведения экспериментальных исследований в этом направлении.

Список цитируемых источников

1. Сиденко, П. Л. Измельчение в химической промышленности / П. Л. Сиденко. — М. : Химия, 1968. — 382 с.
2. Серго, Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учеб. для вузов / Е. Е. Серго. — М. : Недра, 1985. — 285 с.
3. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учеб. для вузов по специальности «Обогащение полезных ископаемых» / С. Е. Андреев, В. В. Зверевич, В. А. Перов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Недра, 1980. — 415 с.
4. Селективное измельчение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.] — М. : Недра, 1988. — 286 с.
5. Поникоров, И. И. Расчет машин и аппаратов химических производств и нефтепереработки (примеры и задачи) : учеб. пособие / И. И. Поникоров, С. И. Поникоров, С. В. Рачковский. — М. : Альфа-М, 2008. — 720 с.
6. Романович, А. А. Основы расчета и проектирования пресс-валковых агрегатов для измельчения анизотропных материалов : монография / А. А. Романович, А. В. Колесников. — Белгород : БГТУ, 2011. — 165 с.
7. Сотник, Л. Л. К вопросу анализа производительности вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород, 2018. — Вып. XVII. — С. 360—365.
8. Сотник, Л. Л. Методика расчета конструктивных и технологических параметров вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : межвуз. сб. ст. — Белгород, 2019. — Вып. XVIII. — С. 162—167.
9. Erdmann, P. Numerical simulation of dynamic soil compaction with vibratory compaction equipment / P. Erdmann, D. Adam // Geotechnics of Roads and Railways : proceedings XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering, 9—11 Sept. 2014, Vienna, Austria. — Vienna, 2014. — P. 243—248.
10. Tan, C. Design of a urea granulator with energy optimization / C. Tan // Proceedings of 3rd International conference on engineering and ICT, 4—5 April 2012, Melaka, Malaysia. — 2012. — Vol. 1. — P. 187—191.
11. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. моногр. / Л. А. Сиваченко [и др.] ; под науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. — Барановичи : БарГУ, 2020. — 359 с.
12. Вибровалковый измельчитель-активатор : пат. 186478 Рос. Федерации : B02C4/32 / В. С. Севостьянов [и др.] ; заявл. 20.08.2018 ; дата публ.: 22.01.2019.
13. Гончаревич, И. Ф. Вибротехника в горном производстве / И. Ф. Гончаревич. — М. : Недра, 1992. — 319 с.
14. Сотник, Л. Л. Анализ результатов исследований зависимости производительности от основных факторов вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 81—86.
15. Сотник, Л. Л. Изучение влияния технологических факторов на потребляемую мощность вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко, И. А. Богданович // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. «Машиностроение». — 2018. — № 4. — С. 19—22.
16. Романович, А. А. Энергосберегающие агрегаты для измельчения материалов цементного производства с анизотропной текстурой : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / А. А. Романович. — Белгород, 2014. — 398 л.

Поступила в редакцию 13.10.2021.