

УДК 621.926.32

**Л. Л. Сотник<sup>1</sup>; С. И. Русан<sup>1</sup>**, кандидат технических наук, доцент;**Л. А. Сиваченко<sup>2</sup>**, доктор технических наук, профессор<sup>1</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com<sup>2</sup>Межгосударственное 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. Sotnik<sup>1</sup>; S. I. Rusan<sup>1</sup>**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;**L. A. Sivachenko<sup>2</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Professor<sup>1</sup> Educational institution "Baranovichi State University", 21 Voykova Str., 225406 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com<sup>2</sup> 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.

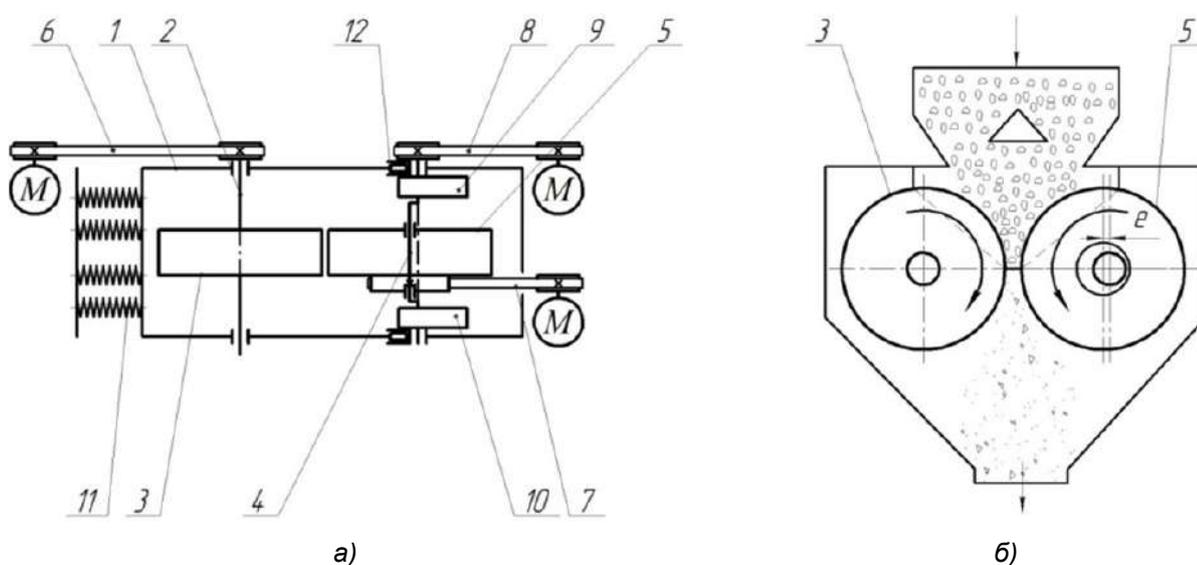


Рисунок 1. — Схема вибровалкового измельчителя: а — вид сверху; б — вид сбоку

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 вала 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 вала 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).

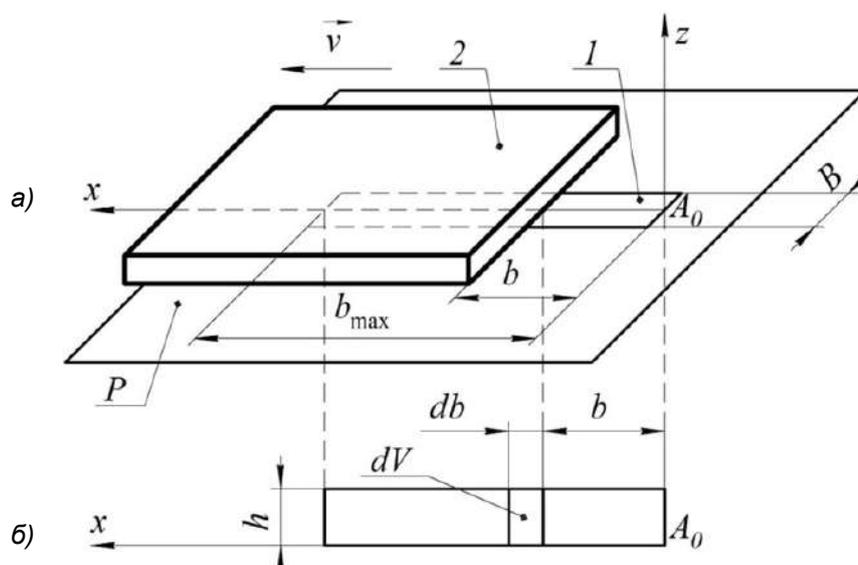


Рисунок 2. — Модель зазора и эпюра изменения объема в эталонном варианте

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  $\Delta b$  зазора обозначим как  $\tau$ . В общем случае  $\tau$  — величина переменная:  $\tau = \tau(t)$ , где  $t$  время движения пластины к рассматриваемому участку  $\Delta b$  зазора. На участках, где зазор открывается раньше, продолжительность перемещения  $\tau$  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 м / 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  $\tau$  пересыпания материала через соответствующий участок зазора.

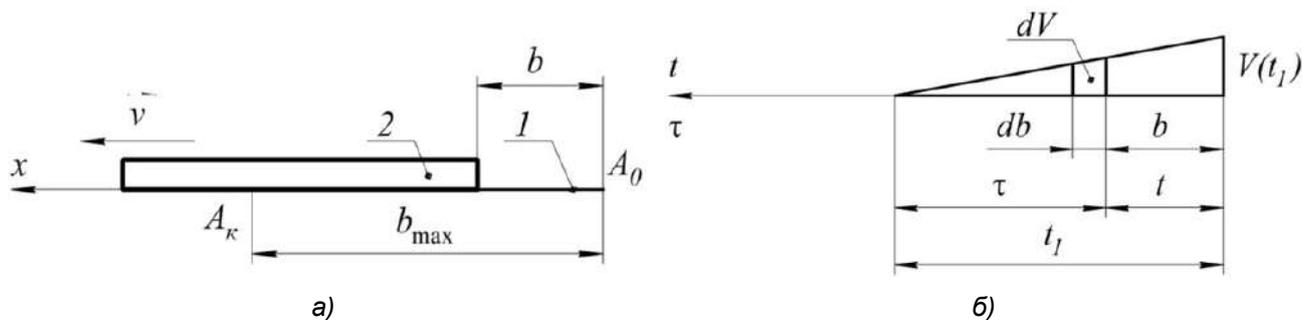


Рисунок 3. — Боковая проекция зазора и эпюр изменения объема в варианте с подвижной пластиной

Наибольший объем вещества  $V(t_1)$  успевает переместиться через участок  $\Delta b$ , 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  $\tau$ ,

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

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).

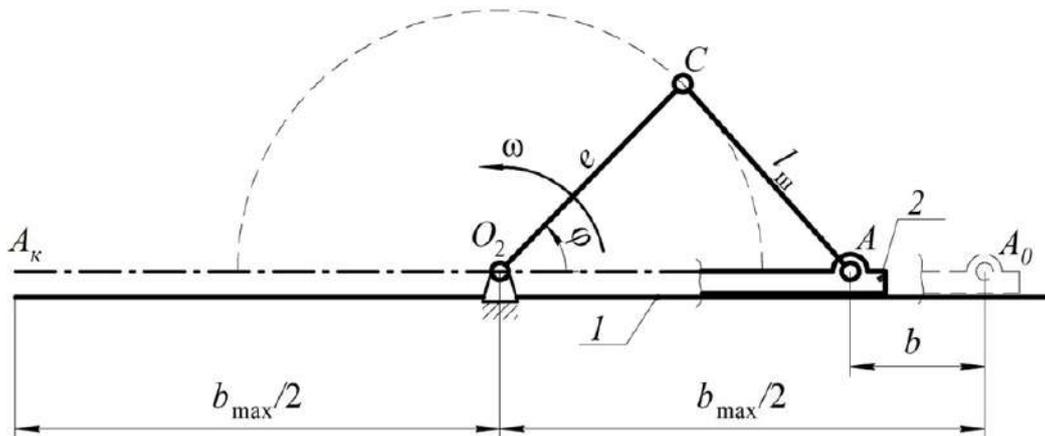


Рисунок 4. — Модель зазора с движением пластины по гармоническому закону

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  $\omega$  кривошипа постоянной, тогда его угол поворота  $\varphi = \omega t$ . 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  $\pi$ , 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];

$\rho_0$  — насыпная плотность материала, кг / м<sup>3</sup>;

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

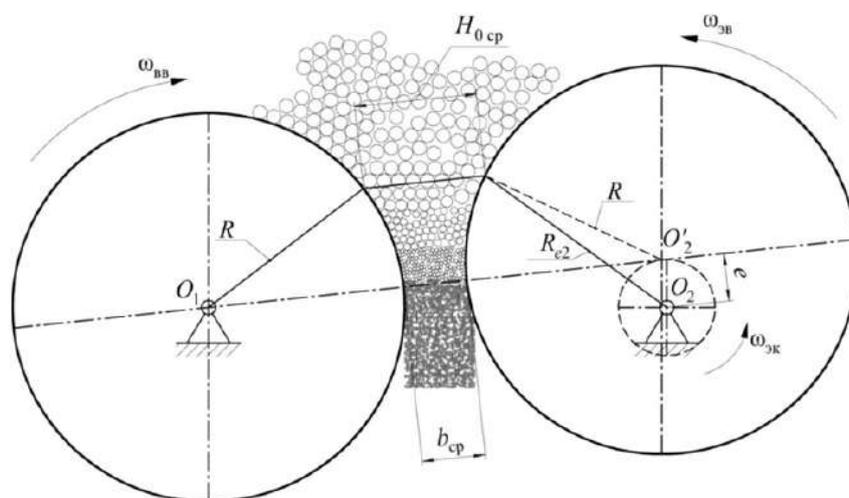
$k_e$  — коэффициент величины эксцентриситета ( $k_e = 1,0 \dots 1,15$ ) [11; 14].

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  $\mu$  и его насыпной плотности  $\rho_0$ ).

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

$$Q_{50} = Q \lg \left( 10^m \sqrt[5]{\frac{E\%}{50}} \right),$$

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<sup>-1</sup>,  $\rho_0 = 1400$  кг / м<sup>3</sup>,  $k_{\text{пр}} = 0,7$ ,  $\mu = 0,3$ :

$$Q = 0,05 \cdot 0,004 \cdot 3,14 \cdot 0,24 \cdot 120 \cdot 1 \cdot 0,3 \cdot 0,7 \cdot 1400 \cdot 1 \cdot \left[ \frac{0,24(1 - \cos 14)}{0,004} + 1 \right] = 14,9 \text{ кг / мин.}$$

Тогда приведенная производительность вибровалкового измельчителя по формуле Розина—Раммлера

$$Q_{50} = 14,9 \lg \left( 10^{0,9} \sqrt[5]{\frac{60}{50}} \right) = 16,21 \text{ кг / мин, или } Q_{50} = 0,97 \text{ т / ч.}$$

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 %.

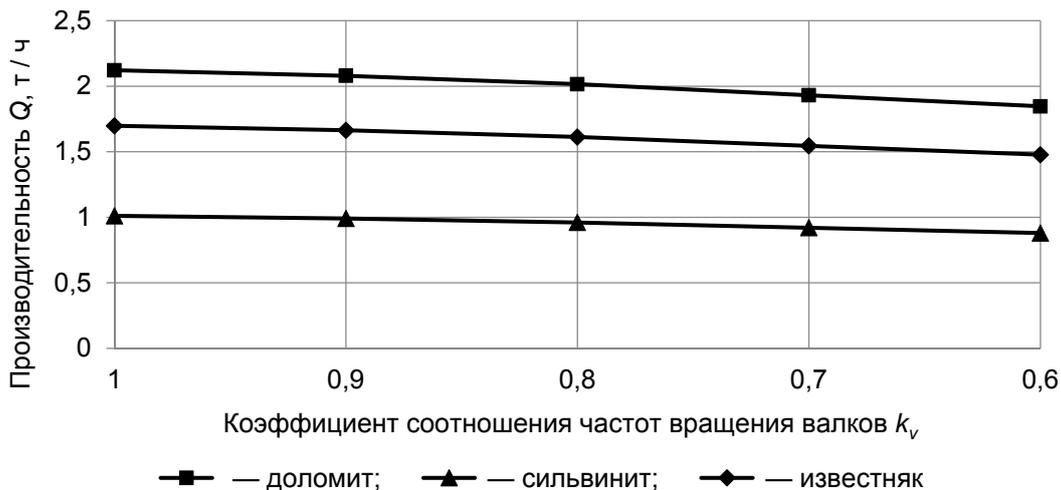


Рисунок 6. — Зависимость влияния величины коэффициента соотношения частот вращения валков  $k_v$  на производительность  $Q$

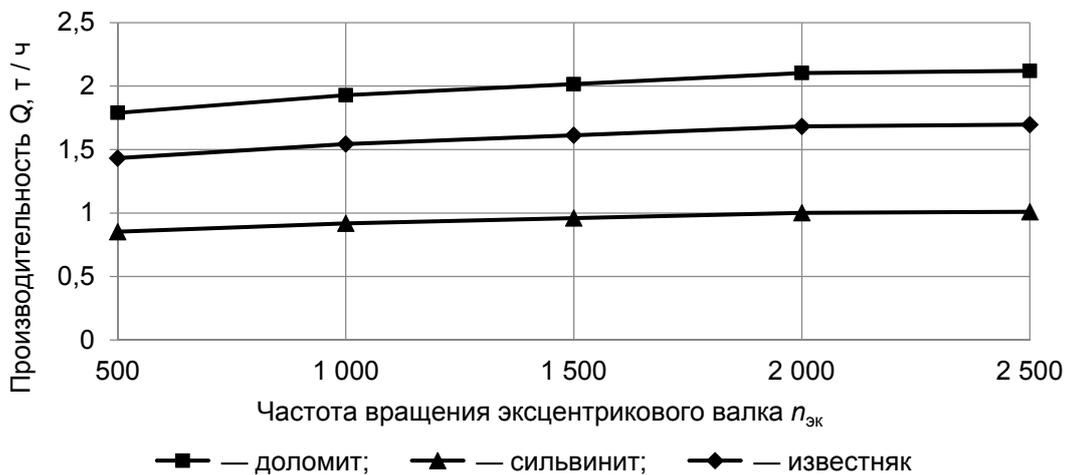


Рисунок 7. — Зависимость влияния частоты вращения эксцентрикового вала  $n_{эк}$  на производительность  $Q$

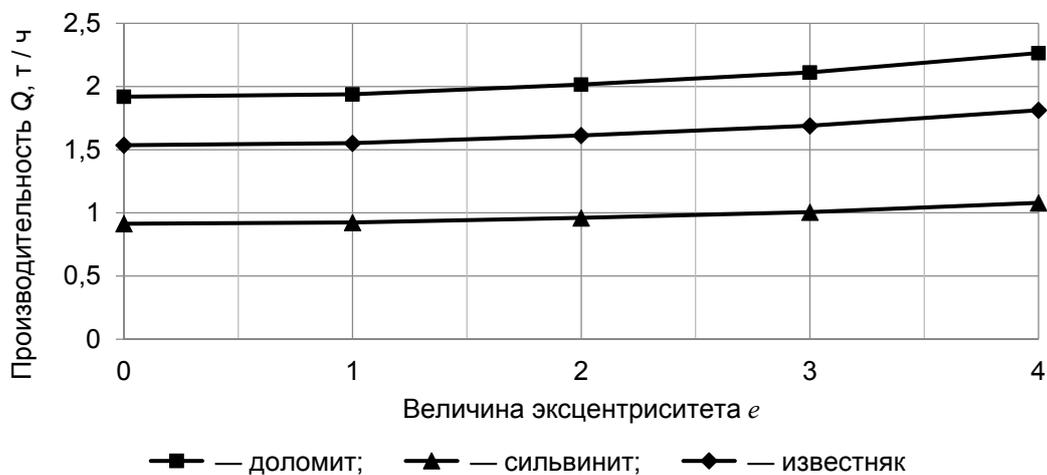


Рисунок 8. — Зависимость влияния величины эксцентриситета  $e$  на производительность  $Q$

**Заклучение.** 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 : В02С4/32 / 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.