Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.926

СОТНИК
Леонид Леонидович

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ДЕЗИНТЕГРАЦИИ В ВИБРОВАЛКОВОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы
(нефтехимические и химические производства)

Минск 2022

Научная работа выполнена в учреждении образования «Барановичский государственный университет».

Научный руководитель:	**Сиваченко Леонид Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортные и технологические машины МО УВО «Белорусско-Российский университет»
Официальные оппоненты:	**Левданский Александр Эдуардович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических производств учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»; **Березовский Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горные машины Белорусского национального технического университета
Оппонирующая организация:	**ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»**

Защита состоится 27 июня 2022 в $12^{\underline{00}}$ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу 220006 г. Минск, ул. Свердлова, 13а, ауд. 240, корп. 4.
Тел. (017) 327-56-20; факс (017) 327-56-20, e-mail: dyadenko-mihail@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «18» мая 2022г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент М.В. Дяденко

ВВЕДЕНИЕ

Процессы дезинтеграции встречаются практически в любой отрасли. В последние десятилетия в ряде передовых предприятий горной промышленности в процессах рудоподготовки, химической промышленности при производстве удобрений, промышленности строительных материалов при производстве цемента, извести и т. д. наблюдается устойчивый переход на использование оборудования зарубежных производителей. Однако немаловажной задачей в современных производственных условиях является создание нового и модернизация имеющегося оборудования.

Для разработки мер по снижению удельной энергоемкости процесса важно выявить закономерности влияния эксплуатационных факторов на энергозатраты. Поиск технических решений, направленных на снижение энергозатрат и интенсификацию процесса дезинтеграции путем модернизации имеющихся агрегатов или создания новых, является актуальной задачей.

Одним из технических решений по модернизации имеющихся агрегатов и созданию новых является конструкция вибровалкового измельчителя. Наличие эксцентрично установленного валка вносит существенные изменения в напряженно-деформированное состояние (НДС) материала, вызывает перераспределение контактного давления и, как следствие, изменяет механизмы и интенсивность дезинтеграции. Поэтому анализ влияния величины эксцентриситета и режимов нагружения имеет большое значение и нуждается в теоретических и практических исследованиях.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016—2020 годы, утвержденным Советом Министров Республики Беларусь 12 марта 2015 г. № 150, а также приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016—2020 годы, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 № 166: пункт 3 «Промышленные и строительные технологии и производство специальной техники»; в части производства специальной техники; пункт 8 «Рациональное природопользование и глубокая переработка природных ресурсов» в части глубокой переработки природных ресурсов.

Цель и задачи исследований. Цель заключается в поиске и научном обосновании новых технических решений в области дезинтеграции, разработке основ расчета вибровалкового измельчителя минерального сырья, обеспечивающего снижение удельного расхода электроэнергии и повышение производительности путем комплексного воздействия на измельчаемый материал.

Для ее достижения понадобилось решить следующие задачи:

– провести анализ теорий разрушения материала и на его основе выбрать направление совершенствования и модернизации существующих агрегатов или создание новых, обеспечивающих повышение эффективности процесса;

– составить модели движения рабочих органов, позволяющие реализовать эффективные условия захвата и измельчения материалов, и на их основе установить оптимальные конструктивные и технологические параметры вибровалкового измельчителя;

– создать математическую модель, позволяющую описать механизм силового воздействия в вибровалковом измельчителе, и получить уравнение для расчета усилия измельчения;

– на основе технологических параметров измельчения разработать конструкцию вибровалкового измельчителя для дезинтеграции минерального сырья (сильвинита и доломита);

– провести экспериментальные исследования по изучению процессов измельчения различного минерального сырья в вибровалковом измельчителе для определения направления их рационального использования, проверки адекватности полученных результатов и оптимизации параметров;

– определить функциональную зависимость удельной энергоемкости дезинтеграции минерального сырья от конструктивных и технологических параметров для обеспечения максимальной эффективности измельчения.

Объект исследования — вибровалковый измельчитель.

Предмет исследования — процесс дезинтеграции, осуществляемый в вибровалковом измельчителе.

Научная новизна:

– разработка, теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение полученных методик расчета и моделей, описывающих процессы дезинтеграции, в зависимости от конструктивных и технологических параметров рабочих органов вибровалкового измельчителя;

– получение аналитических выражений, описывающих конструктивные и технологические параметры, энергетические и количественные показатели вибровалкового измельчителя при измельчении сильвинита и доломита;

– определение оптимальных режимов дезинтеграции сильвинита и доломита, с учетом их свойств, в вибровалковом измельчителе;

– создание конструкции вибровалкового измельчителя, новизна которого подтверждается патентом на изобретение и апробированием в производстве.

Положения, выносимые на защиту.

1. Аналитические зависимости, описывающие кинематику движения рабочих органов вибровалкового измельчителя, подтверждающие возможность дезинтеграции материала раздавливающе-сдвиговым и вибрационным воздействием, позволяющие определить оптимальные геометрические и кинематические параметры измельчителя.

2. Математическая модель разрушения материала между валками, один из которых установлен на эксцентриковом валу, основанная на анализе возникающих статических и динамических усилий, позволяющая рассчитать суммарное усилие на материал и возникающие деформации.

3. Аналитические зависимости определения мощности, затрачиваемой приводом, и производительности вибровалкового измельчителя, учитывающие особенности конструкции и физико-механические характеристики материала, позволяющие эффективно реализовать процесс дезинтеграции.

4. Результаты экспериментальных исследований в виде уравнений регрессии зависимости производительности, мощности, удельной энергоемкости и степени измельчения от величины эксцентриситета, коэффициента соотношения скоростей валков и частоты вращения эксцентрикового вала, позволяющие определить оптимальные параметры процесса измельчения в зависимости от требований, предъявляемых к продукту.

Личный вклад соискателя. Основные результаты, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Определение цели и постановка задач исследований проводились совместно с научным руководителем д.т.н., профессором Сиваченко Л.А.. Соавтор к.т.н., доцент Русан С.И. принимал участие в аналитическом исследовании рабочего процесса измельчителя. Соавтор к.т.н., доцент Богданович И.А. принимала участие в планировании эксперимента. Соавтор к.т.н., доцент Дремук В.А. принимал участие в разработке конструкции измельчителя. Научный руководитель и соавторы совместных работ участвовали в обсуждении полученных результатов.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на международных научно-технических конференциях: в Луцком национальном техническом университете, г. Луцк, 2016 г., Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова, г. Белгород, 2017 г., Белорусско-Российском университете, г. Могилев, 2017—2020 гг., Барановичском государственном университете, г. Барановичи, 2016—2020 гг., Брестском государственном техническом университете, г. Брест, 2019 г.

Проведены опытно-промышленные испытания в филиале СУ-145 ОАО «Стройтрест № 25» (акт испытаний вибровалкового измельчителя-активатора). Предложена методика расчета геометрических и кинематических параметров вибровалкового измельчителя-активатора (акт о внедрении результатов НИР в образовательный процесс).

Опубликование результатов диссертации. Основные результаты исследований опубликованы в 46 научных работах общим объемом 15 авторских листов, в том числе 8 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Республики Беларусь (3,5 авторского листа), 3 научных статьях, в том числе 1 статье в изданиях, рекомендованных ВАК Украины (0,25 авторского листа),

1 статье в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (0,4 авторского листа), 33 материалах конференций и тезисов, 1 монографии, 1 патенте.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня условных обозначений (2 с.), введения (2 с.), общей характеристики работы (3 с.), четырех глав основной части (115 с.), заключения (3 с.), списка использованных источников, содержащего 176 наименований (12 с.), списка работ автора из 46 наименований (6 с.) и приложений (23 с). Общий объем работы составляет 172 страницы, включающих 74 рисунка и 14 таблиц.

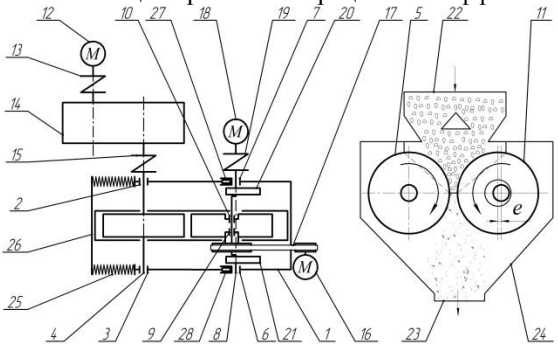
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассмотрены основные положения и теоретические подходы аналитического описания процессов дезинтеграции минерального сырья. Подробно рассмотрены способы измельчения материалов и представлен обзор конструкций оборудования, применяемого для дезинтеграции. Рассмотрены конструктивные отличия применяемого оборудования, их достоинства и недостатки. Более подробно проведен анализ конструкций валковых агрегатов, применяемых в различных промышленных отраслях. Проведен анализ технологических возможностей, прогнозирования их развития и основные направления их совершенствования.

На основании проведенного обзора определены основные направления по созданию принципиально новой конструкции валкового агрегата — вибровалкового измельчителя, способного реализовать раздавливающе-сдвиговое и вибрационное деформирование материала путем установки одного из валков на эксцентриковом валу. Рассмотрены возможности вибрационного воздействия на измельчаемый материал и возникающие при этом вибрационные эффекты.

Вторая глава посвящена теоретическому анализу конструкции вибровалкового измельчителя (рисунок 1).

Вибровалковый измельчитель состоит из рамы, на которой смонтированы ведущий и эксцентриковый валки. Вибрационное воздействие подается на эксцентриковый вал. На эксцентриковом валу установлены противовесы для уравновешивания системы.



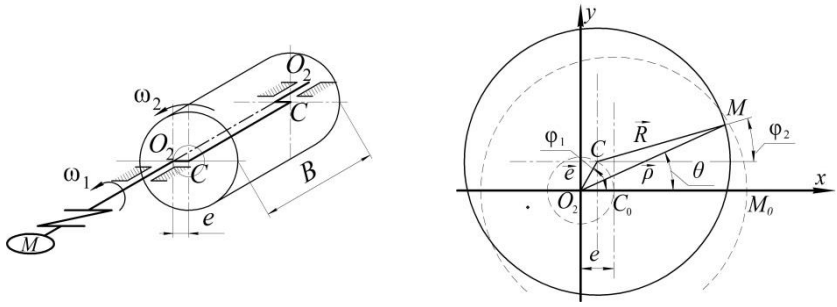
1 — рама; 2, 3, 6, 7, 9, 10 — опоры; 4 — вал; 5 — ведущий валок; 8 — эксцентриковый вал; 11 — эксцентриковый валок; 12, 16, 18 — электродвигатели; 13, 15, 19 — муфты; 14 — редуктор; 17 — ременная передача; 20, 21 — противовесы; 22, 23 — люки; 24 — бункер; 25 — блок пружин; 26 — плита; 27, 28 — регулировочное устройство

Рисунок 1. — Схема конструкции измельчителя

Эксцентриковый вал имеет эксцентриситет e относительно центральной оси эксцентрикового валка.

Процесс работы вибровалкового измельчителя осуществляется следующим образом. Электродвигатели приводят во вращение соответствующие элементы конструкции, причем ведущий валок и эксцентриковый вал вращаются навстречу друг другу. При этом эксцентриковый вал через опоры сообщает подвижному валку круговые колебания с амплитудой e. Через загрузочный люк в межвалковое пространство непрерывным потоком подается подлежащий обработке исходный материал и подвергается интенсивному разрушению путём воздействия на него раздавливающе-сдвигового и вибрационного (ударного) усилия. На основании проведенного кинематического анализа процесса работы принято следующее сочетание конструктивных и технологических параметров — вариант с эксцентрично установленным валком ($e_{вв} = 0$, $e_{эв} = e$) и равными радиусами валков $R_{вв} = R_{эв} = R$ и различной частотой их вращения $n_{вв} \neq n_{эв}$.

Динамическое воздействие на измельчаемый материал в зоне разрушения зависит от кинематических характеристик движения валков. Проведенные аналитические исследования позволили установить, что представленная механическая система (рисунок 2) теоретически допускает три варианта движения: круговое поступательное ($\varphi_2 = 0$) движение, определяемое вращением эксцентрика; составное поступательно-вращательное, при котором $\varphi_2 \neq 0$; вращательное движение вокруг оси O_2O_2 $\varphi_2 = \varphi_1$.



а *б*

Рисунок 2. — Схема эксцентрикового валка

Определены уравнения движения точки M (рисунок 2, *б*):

$$x_M = e\cos\varphi_1 + R\cos\varphi_2, \qquad y_M = e\sin\varphi_1 + R\sin\varphi_2 \qquad (1)$$

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

Для схемы, где один из валков установлен эксцентрично, проведен анализ движения валка (рисунок 3). Установлено, что определяющим параметром при эксцентрично установленном валке будет угол захвата $\alpha_{д\ ср}$ при среднем значении межвалкового пространства $b_{ср} = b_{min} + e$.

В положении II (рисунок 3) (положение IV аналогично). Угол деформации для максимально возможного куска материала d_{max} равен:

$$\alpha_{д\ ср} = \arccos\left(\frac{2R + b_{ср}}{2R + d_{max}}\right). \qquad (2)$$

Установлено, что для эксцентрично расположенного валка предельными будут положения максимального b_{max} и минимального b_{min} значений зазора, что соответствует схемам I и III (рисунок 3).

Угол деформации для максимального зазора b_{max} (рисунок 3, I):

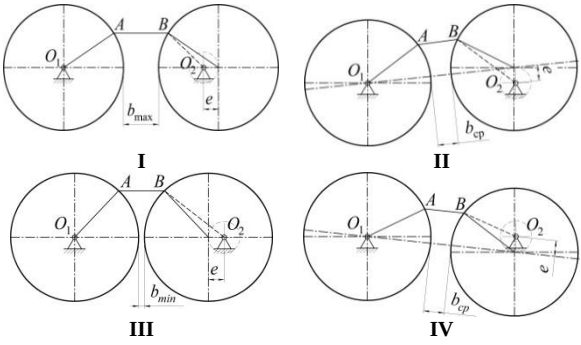
$$\alpha_{д1min} = \arccos\left(\frac{2R + b_{ср} + e}{2R + d_{max}}\right); \qquad \alpha_{д2min} = \operatorname{arctg}\left(\frac{R\sin\alpha_{д1min}}{R\cos\alpha_{д1min} - e}\right). \qquad (3)$$

Угол деформации для минимального зазора b_{min} (рисунок 3, III):

$$\alpha_{д1max} = \arccos\left(\frac{2R + b_{ср} - e}{2R + d_{max}}\right); \qquad \alpha_{д2max} = \operatorname{arctg}\left(\frac{R\sin\alpha_{д1max}}{R\cos\alpha_{д1max} + e}\right). \qquad (4)$$

Исследованный характер изменения углов захвата свидетельствует о наличии сдвиговых деформаций при разрушении материала, что интенсифицирует процесс их измельчения.

Проведен анализ усилия воздействия валков на измельчаемый материал. Усилие измельчения напрямую влияет на энергозатраты процесса и зависит от многих параметров.



I — при максимальном зазоре; II — при среднем зазоре;
III — при минимальном зазоре; IV — при среднем зазоре

Рисунок 3. — Характерные положения валков

При анализе рассмотрен вариант, при котором $\omega_{2r} = \omega_{2e}$.

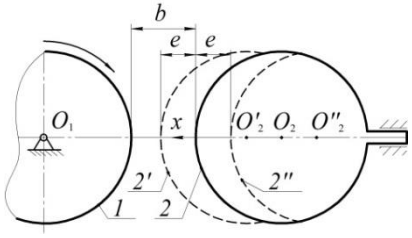


Рисунок 4. — Упрощенная модель поступательного движения эксцентрика

Эксцентрик в этом случае выполняет поступательно-криволинейное движение. Весь валок совершает гармонические колебания (вибрации) вдоль осей координат с амплитудой *e*. Измельчаемый материал представлен совокупностью горизонтальных элементарных слоев. Упрощенная модель поступательных колебаний эксцентрика показана на рисунке 4.

Силовое взаимодействие валка с материалом описано двумя системами сил: силами упругости, согласно закону Гука, и силами, вызванными вибрацией валка (силами инерции).

Причины сжатия слоев две: прохождение материала в активном пространстве между валками и перемещение эксцентрикового валка влево из положения 2 в 2' (рисунок 4), на расстояние *e*. При этом в вибровалковом измельчителе с эксцентриковым правым валком активным пространством следует считать поверхность валка в положении 2. Равнодействующую силу *P*' определим по формуле:

$$P' = ceB\left[a'\operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{k}{b}}\right)\tau_1' - \operatorname{arctg}\tau_1' - (a'-1)\pi/2\right], \qquad (5)$$

где *c* — жесткость материала в единицах силы, что приходится на единицу длины валка (Н / м); $a' = \dfrac{a}{\sqrt{kb}}$; $\tau_1' = \dfrac{\left(R + \sqrt{R^2 - y_0^2}\right)}{y_0}$; $a = 2R + b = O_1O_2$; $k = 4R + b$; y_0 и x_0 — начальные координаты слоя материала.

Статический момент нагрузки *P*' относительно центра O_2:

$$S' = ceB\left\{\frac{\left\{x_0 + a\left[\ln(a - 2x_0)\right]/2\right\}}{2} - \frac{\left[R + a(\ln b)/2\right]}{2}\right\}. \qquad (6)$$

Определены возникающие силы инерции. Первая материальная точка соприкасается с валком и в его положении 2' достигает значения $a_{\max}$. Таким образом, расчетная (максимальная) сила инерции, действующая на элементарный слой, определяется выражением $f_i = m_H(1 - e / H_i)a_{\max} / 2$,
где m_H — масса слоя материала, кг; H_i — ширина слоя материала, м.

Равнодействующая F_i элементарных сил инерции:

$$F_i = f_{ci}B\left\{e\left[a'\operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{k}{b}}\tau_1'\right) - \operatorname{arctg}\tau_1' - (a'-1)\pi/2\right] + y_0\right\}. \qquad (7)$$

Равнодействующая статического момента сил инерции:

$$S_i = f_{ci}B\left\{\frac{e}{2}\left\{x_0 + \frac{a\left[\ln(a - 2x_0)\right]}{2}\right\} + \frac{y_0^2}{2}\right\} - f_{ci}B\left\{\frac{e}{2}\left[R + \frac{a(\ln b)}{2}\right]\right\}. \qquad (8)$$

Как видим, расчетные значения трех силовых факторов имеют место в одной фазе движения эксцентрика, поэтому их воздействия на материал и эксцентрик суммируются. Согласно теоретическому исследованию график зависимости изменения суммарного усилия при продвижении материала через рабочее пространство имеет вид (рисунок 5).

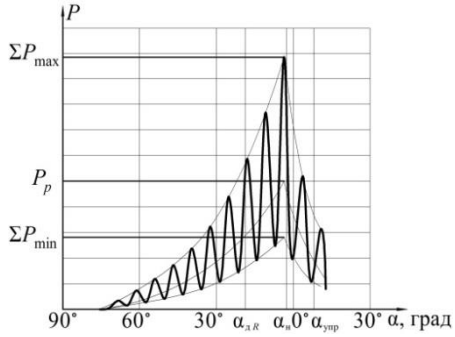


Рисунок 5. — Изменение суммарного усилия

Разработанная методика силового анализа может использоваться с различной эффективностью в зависимости от физико-механических характеристик измельчаемого материала, а также от геометрических *e*, *b*, *R*, кинематических параметров ω и других факторов. Теоретический анализ силового воздействия показывает, что с каждым силовым импульсом эксцентрикового валка происходит значительное увеличение суммарного усилия.

На основании кинематического анализа определены параметры скорости и ускорения точки *M* валка (рисунок 2, *б*):

$$v = e\omega_{эв} \sin\varphi\left(1 - \frac{e\cos\varphi}{\sqrt{z}}\right), \tag{9}$$

где $z = R^2 - e^2\sin^2\varphi$.

Аналогичным путем дифференцирования функции *v* определяем ускорение:

$$a = \frac{e\omega_{эв}{}^2\left(4\cos\varphi z\sqrt{z} - 4e\cos 2\varphi z - e^3\sin^2 2\varphi\right)}{4z\sqrt{z}}. \tag{10}$$

Суммарную мощность привода в предложенной конструкции вибровалкового измельчителя, затрачиваемую на дезинтеграцию материалов, можно определить согласно выражению:

$$N_{вви} = \frac{N_{изм1} + N_{изм2} + N_{виб} + N_{тр}}{\eta}, \tag{11}$$

где $N_{изм1}$, $N_{изм2}$ — мощность на создание раздавливающих деформаций материалов ведущим и эксцентриковым валками, Вт; $N_{виб}$ — мощность на привод эксцентрикового вала с противовесами, Вт; $N_{тр}$ — мощность на преодоление сил трения в подшипниковых узлах валков, Вт.

Анализ выражения показывает, что сдвиговое деформирование уменьшает потребляемую мощность привода. Одним из определяющих параметров потребляемой мощности привода является частота колебаний и амплитуда (величина эксцентриситета) вибрационного валка. Изменение коэффициента соотношения скоростей вращения снижает потребляемую мощность до 20 %, а частота колебаний эксцентрикового валка и величина эксцентриситета увеличивает на 30 %.

Анализ производительности проведен с учетом кинематических особенностей вибровалкового измельчителя:

$$Q = Bb_{\text{ср}}\pi Dn_{\text{вв}}k_v k_{\text{пр}}k_{\text{виб}}k_e\rho\mu\left(\frac{D(1-\cos\alpha_{\text{д ср}})}{b_{\text{ср}}}+1\right), \qquad (12)$$

где k_v — коэффициент соотношения частот вращения (k_v = 0,85…1,0); $k_{\text{пр}}$ — коэффициент проскальзывания шихты (для гладких валков $k_{\text{пр}}$ = 0,6…0,8); $k_{\text{виб}}$ — коэффициент скорости вращения эксцентрикового вала ($k_{\text{виб}}$ = 1,0…1,25); k_e — коэффициент величины эксцентриситета (k_e = 1,0…1,15); ρ — плотность материала, кг / м^3; μ — коэффициент, учитывающий степень разрыхленности материала.

Представленные аналитические выражения и графические зависимости показывают целесообразность использования вибровалкового измельчителя и требуют дальнейшего практического исследования.

В третьей главе представлены методики экспериментальных исследований с использованием многофакторного планирования.

Для проведения многофакторного эксперимента разработана лабораторная экспериментальная установка вибровалкового измельчителя, обладающая следующими параметрами: D = 240 мм; B = 50 мм; $b_{\min}$ = 0…5 мм; e = 0…4 мм; $n_{\text{вв}}$ = 48…192 об / мин; k_v = 0,4…1,1; $n_{\text{эв}}$ = 740…2880 об / мин.

Для поисковых экспериментов выбран ячеистый бетон (пенобетон 1000): $\sigma_{\text{сж}}$ = 4,5…5,5 МПа; ρ_0 = 1000кг/м^3; $d_{0\text{ср}} = 11{,}5 \times 10^{-3}$ м. Выбор материала обусловлен возможностями конструкции экспериментальной установки измельчителя.

На рисунках 6 – 8 представлены поверхности отклика производительности, потребляемой мощности и степени измельчения.

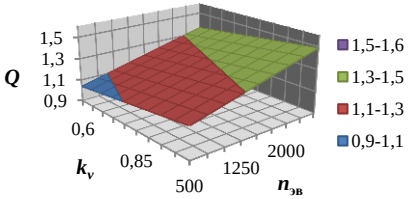


Рисунок 6. — Поверхности отклика производительности

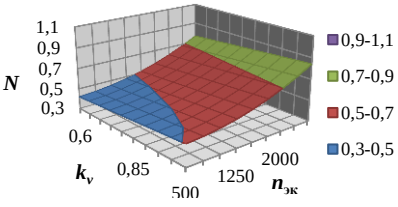


Рисунок 7. — Поверхности отклика потребляемой мощности

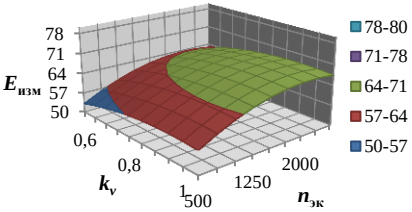


Рисунок 8. — Поверхности отклика степени измельчения

На основании поисковых экспериментов в качестве основного плана принят центральный композиционный ортогональный план ЦКОП-2^3. В таблице 1 представлены факторы, их кодированное обозначение, шаг и уровни варьирования.

Таблица 1. — Уровни варьирования факторов

Факторы	Кодированное обозначение	Шаг варьирования	Уровни варьирования				
			–1,215	–1	0	1	+1,215
$n_{эк}$, об/мин	x_1	500	≈900	1000	1500	2000	≈2100
k_v	x_2	0,2	≈0,56	0,6	0,8	1,0	≈1,04
e, мм	x_3	1	≈0,8	1	2	3	≈3,2

Представлены результаты комплексных экспериментальных исследований по изучению общих и специфических закономерностей процесса измельчения сильвинита и доломита в виде уравнений:

– доломит:

$$Q_{пр} = 4,72 \cdot 10^{-4} n_{эк} + 2,155 k_v + 0,097 e - 1,04 \cdot 10^{-7} n_{эк}^{\ 2} - 1,025 k_v^{\ 2} - 0,337, \quad (13)$$

$$N = 6482 - 1,214 n_{эк} - 8920 k_v - 365 e + 0,262 n_{эк} e + 3.24 \cdot 10^{-4} n_{эк}^{\ 2} + 6372 k_v^{\ 2} + 75 e^2, \quad (14)$$

$$E_{изм} = 0,02404 n_{эк} - 6,2 \cdot 10^{-6} n_{эк}^{\ 2} + 87,3 k_v - 51,75 k_v^{\ 2} + 4,23 e + 19,56, \quad (15)$$

– сильвинит:

$$Q_{пр} = 4,64 \cdot 10^{-4} n_{эк} - 1 \cdot 10^{-7} n_{эк}^{\ 2} + 2,445 k_v - 1,425 k_v^{\ 2} + 0,064 e - 0,595, \quad (16)$$

$$N = 9167 - 1,91 n_{эк} - 13870 k_v - 237 e + 0,228 n_{эк} e + 5,44 \cdot 10^{-4} n_{эк}^{\ 2} + 10100 k_v^{\ 2} + 46 e^2, \quad (17)$$

$$E_{изм} = 0,03156 n_{эк} + 170,7 k_v + 7,97 e - 8,4 \cdot 10^{-6} n_{эк}^{\ 2} - 116,5 k_v^{\ 2} - 1,1 e^2 - 22,85. \quad (18)$$

Проведен анализ влияния каждого фактора на выходные параметры.

Исследование влияния частоты вращения эксцентрикового вала представлено на рисунке 9 (*а* — $n_{эк}$ = 1000 об / мин, *б* — $n_{эк}$ = 1500 об / мин, *в* — $n_{эк}$ = 2000 об / мин, I — доломит, II — сильвинит, $b_{ср} = 4 \times 10^{-3}$ м, k_v = 0,8).

При увеличении $n_{эк}$ с 1000 об / мин до 2000 об / мин и происходит изменение качественных и количественных параметров процесса: степень измельчения материалов возрастает для доломита на 7 %, для сильвинита — на 9%; приведенная производительность возрастает для доломита на 12,4 %, для сильвинита — на 17,4 %; потребляемая мощность привода возрастает для доломита на 10,7 %, для сильвинита — на 5,3 %; удельный расход электроэнергии уменьшается для доломита на 1,5 %, для сильвинита — на 10,3 %.

Исследование влияния коэффициента соотношения частот вращения валков представлено на рисунке 10 (*а* — k_v = 0,6, *б* — k_v = 0,8, *в* — k_v = 1, I — доломит, II — сильвинит, $b_{ср} = 4 \times 10^{-3}$ м, e = 2 мм).

При увеличении k_v с k_v = 0,6 до k_v = 1,0 и прочих факторов на нулевом уровне происходит изменение параметров процесса, при этом немаловажно рассмотреть параметр процесса при k_v = 0,8. Степень измельчения материалов изменяется следующим образом: для доломита возрастает на 3,5 % и убывает на 2,1 %; для сильвинита возрастает на 2 % и убывает на 8,1 %. Приведенная производительность возрастает следующим образом: для доломита на 11,5 % и 16,4 %; для сильвинита — на 9,4 % и 6,9 %.

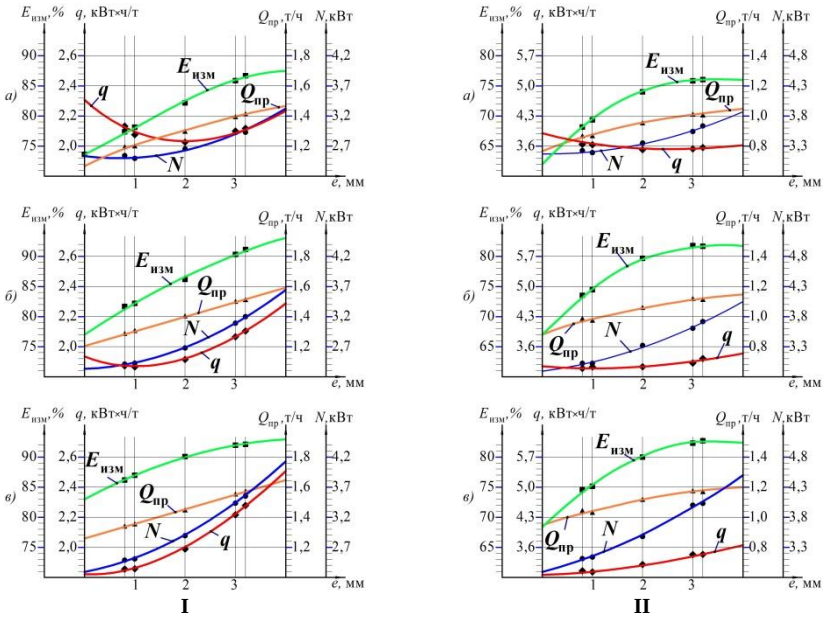


Рисунок 9. — Влияние частоты вращения эксцентрикового вала $n_{эк}$ на $E_{изм}$, q, $Q_{пр}$, N

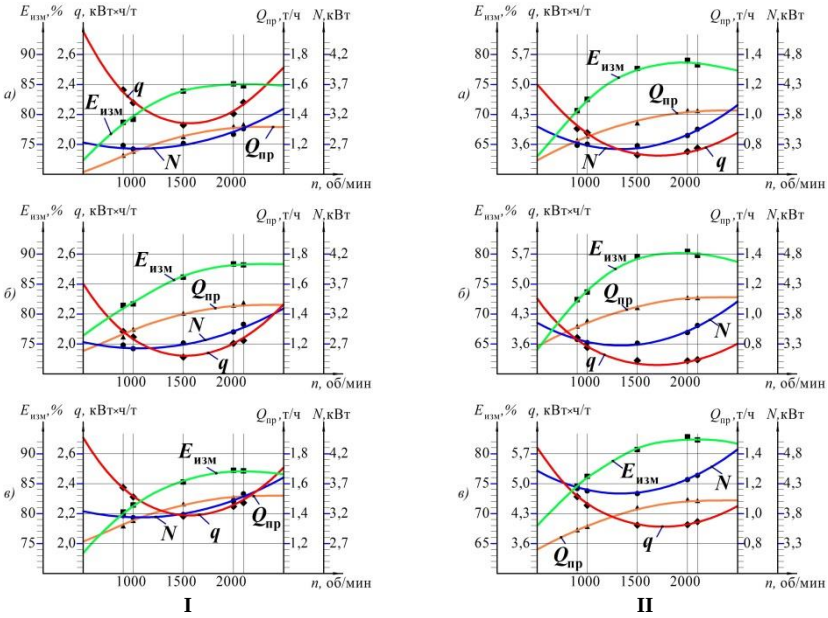


Рисунок 10. — Влияние соотношения частот вращения валков k_v на $E_{изм}$, q, $Q_{пр}$, N

Потребляемая мощность привода уменьшается, если смотреть от верхнего уровня: для доломита — на 15,9 % и 16 %; для сильвинита — на 20,8 % и 22,1 %. Удельный расход электроэнергии, затрачиваемой на осуществление процесса измельчения, уменьшается, если смотреть от верхнего уровня: для доломита — на 12,2 % и 2,1 %; для сильвинита — на 22,6 % и 19,2 %.

Исследование влияния величины эксцентриситета представлено на рисунке 11 (*а* — e = 1 мм, *б* — e = 2 мм, *в* — e = 3 мм, I — доломит, II — сильвинит, $b_{ср} = 4 \times 10^{-3}$ м, $k_v = 1$).

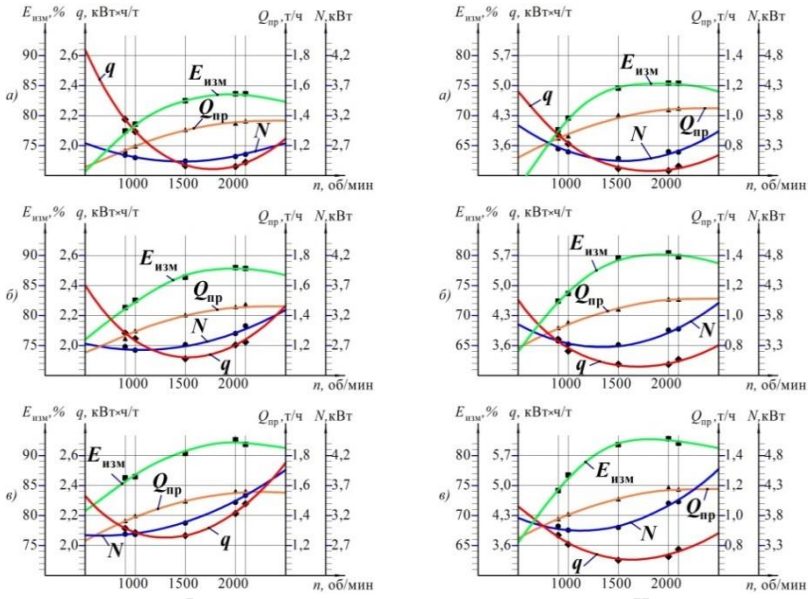


Рисунок 11. — Влияние величины эксцентриситета e на $E_{изм}$, q, $Q_{пр}$, N

При увеличении величины эксцентриситета e с e = 1 мм до e = 3 мм и прочих факторов на нулевом уровне происходит изменение параметров процесса: степень измельчения возрастает для доломита на 10,2 %, для сильвинита — на 9,6 %; приведенная производительность возрастает для доломита на 14,9 %, для сильвинита — на 13 %; потребляемая мощность привода растет для доломита на 26,9 %, для сильвинита — на 19 %; удельный расход электроэнергии увеличивается для доломита на 10,5 %, для сильвинита — на 5,3 %.

Анализ представленных зависимостей позволил определить оптимальные параметры процесс измельчения.

В четвертой главе представлен алгоритм проектирования промышленного образца вибровалкового измельчителя. Представленная методика внедрена в образовательный процесс.

Представлены результаты промышленных испытаний вибровалкового измельчителя. Первый промышленный образец вибровалкового измельчителя изготовлен на унитарном частном производственном предприяти КБ «Промышленные технологии и комплексы». Испытания вибровалкового агрегата показали, что измельчаемый материал не образует застойных зон, по сравнению с пресс-валковыми мельницами, и быстро удаляется из рабочего пространства за счет вибрационного эффекта. Материал имеет однородный состав.

Второй образец изготовлен на основании имеющейся технической документации предыдущего образца с доработкой, а также на основании имеющихся практических рекомендаций. Практические испытания проводились на измельчительном комплексе строительного управления для измельчения отходов бетона, силикатного и керамического кирпича, изделий ячеистого бетона.

Результаты промышленных испытаний вибровалкового измельчителя-активатора в технологической линии переработки строительных отходов показали, что разработанная конструкция измельчителя обладает достаточной работоспособностью в эксплуатации при измельчении материалов.

В результате проведения промышленных испытаний вибровалкового измельчителя при измельчении боя строительных материалов было установлено, что он может использоваться для измельчения разнообразных материалов с различными физико-механическими характеристиками (бетон, ячеистый бетон, газосиликатный кирпич и др.). Использование вибровалкового измельчителя позволило получить готовый продукт с фракцией не более 4 мм.

Это свидетельствует о целесообразности реализации при измельчении отходов строительного производства раздавливающе-сдвигового и вибрационного деформирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Аналитически исследована кинематика валков вибровалкового измельчителя и кинетика движения материала в вибровалковом измельчителе [1, 3, 14, 16, 17, 18]. Проведен анализ изменения углов захвата (при различной величине эксцентриситета), позволяющих реализовать более эффективное разрушение материала за счет сдвигового воздействия [19, 20, 22]. Получены уравнения для расчета конструктивных и технологических параметров рабочих органов, позволяющих реализовать эффективные условия дезинтеграции материала раздавливающе-сдвиговым и вибрационным воздействием [8, 13, 17, 18, 21, 27].

2. Составлено математическое описание и разработана методика расчета скорости и ускорения движения измельчаемого материала с учетом взаимодействия частиц с эксцентрично установленным валком [7, 21]. Результаты теоретических исследований позволили установить закономерности влияния

конструктивных особенностей вибровалкового измельчителя на эффективность процесса [1, 2, 7, 10, 13, 30].

3. Построена математическая модель деформирования материала, аналитически исследован механизм разрушения и получены уравнения для определения усилий измельчения раздавливающе-сдвиговым и вибрационным (ударным) деформированием, изменения напряжений и деформаций материала при вибрационном воздействии [1, 8, 32].

4. Получены аналитические зависимости по расчету производительности и потребляемой мощности привода вибровалкового измельчителя, позволяющие реализовать эффективные условия дезинтеграции материалов в зависимости от выбора требуемых конструктивных и технологических параметров рабочих органов [4–6, 9, 25–27]. Установлены общие закономерности процесса измельчения материалов с различными физико-механическими характеристиками. На эффективность процесса дезинтеграции исследуемых материалов оказывают влияние следующие основные конструктивные и технологические параметры: величина эксцентриситета e, частота вращения эксцентрикового вала $n_{эк}$ и коэффициент частот вращения валков k_v [3–9, 11, 12, 23, 24, 34–36].

5. Проведенные промышленные испытания вибровалкового измельчителя подтвердили теоретические и экспериментально полученные результаты, что свидетельствует о целесообразности реализации раздавливающе-сдвигового и вибрационного деформирования измельчаемых материалов. Установлено, что увеличение частоты вращения эксцентрикового вала повышает производительность процесса измельчения доломита на 8…14 %, сильвинита — на 12…20 %; степень измельчения возрастает для доломита до 8 % для сильвинита — до 10 %; при этом энергоемкость процесса снижается для доломита на 2…5 %, для сильвинита — на 8…14 % [3–6, 10–12, 34–36].

Изменение коэффициента соотношения частот вращения валков приводит к росту производительности процесса измельчения для доломита до 17 %, для сильвинита — до 10 %; степень измельчения возрастает для доломита до 4 %, для сильвинита — до 8 %; при этом изменение удельной энергоемкость процесса существенно отличается при различных значениях коэффициента k_v и достигает снижения удельной энергоемкости для доломита до 12 %, для сильвинита — до 23 % на оптимальных режимах [9, 11, 12].

Величина эксцентриситета увеличивает производительность процесса измельчения для доломита на 7…15 %, для сильвинита — на 10…14 %; степень измельчения возрастает для доломита до 11 %, для сильвинита — до 10 %; при этом энергоемкость процесса возрастает для доломита на 5…11 %, для сильвинита — на 2…6 % [9, 11, 12].

Оптимальные величины конструктивно-технологических параметров при измельчении изотропного материала — доломита равны соответственно: e = 2 мм; $n_{эк}$ = 800…1800 об / мин; k_v = 0,8…0,9, при измельчении анизотропного материала — сильвинита: e = 2…3 мм; $n_{эк}$ = 1400…2000 об / мин;

k_v = 0,6…0,8 [9, 11, 12, 41, 43]. Доказано, что при разрушении материалов в вибровалковом измельчителе на рекомендуемых конструктивно-технологических параметрах достигается существенная экономия энергозатрат [3–6, 9, 12]. Степень измельчения доломита составляет $E_{из}$ = 86 %, а сильвинита — $E_{из}$ = 80 %, удельный расход электроэнергии при этом составил, соответственно, q = 2,15 кВт · ч / т и q = 2,95 кВт · ч / т.

По результатам выполненных теоретических и лабораторных исследований изготовлен вибровалковый измельчитель (КД ВВИА.613242.002) со следующими размерами: $D \times B$ = 0,25 × 0,2 м (Q = 1,5…2,5 т / ч) и проведены его промышленные испытания.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные аналитические и экспериментальные зависимости, модели, предложенные методики выбора режимов измельчения и последовательности их использования рекомендуются при разработке технологий дробления, измельчения и помола материалов.

На основании предлагаемых условий и параметров разработана методика определения технологических (частоты вращения валков, частота колебаний эксцентрикового валка, угол захвата, эксцентриситет, зазор) и энергосиловых (мощность привода валков, усилия измельчения) параметров вибровалкового измельчителя для измельчения материалов, что позволило разработать конструкцию вибровалкового измельчителя для опытно-промышленных испытаний.

Разработанный вибровалковый измельчитель позволяет измельчать материалы с различными физико-механическими характеристиками и химическим составом. Проведенные эксперименты показали, что в результате раздавливающе-сдвигового и вибрационного воздействия повышается производительность на 15…25 % и снижается энергоемкость процесса до 10 %.

Возможность и эффективность использования разработанных способов и оборудования для измельчения материалов подтверждены актами промышленного апробирования на предприятиях УЧПП КБ «Промышленные технологии и комплексы», в филиале СУ-145 ОАО «Стройтрест № 25», а также внедрением в образовательный процесс в Белорусско-Российском университете.

Разработанная конструкция вибровалкового измельчителя может быть использована на предприятиях при рудоподготовке, в химической промышленности и промышленности строительных материалов (ОАО «Беларуськалий», предприятиях холдинга «Белорусская цементная компания», РУПП «Гранит», ОАО «Керамин», ОАО «Доломит» и др.).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. моногр. / Л.А. Сиваченко, **Л.Л. Сотник**, Т.Л. Сиваченко, В.А. Потапов, Г.М. Абдукаликова, И.М. Корзун, О.И. Наливко, И.М. Дыдышко : под науч. ред. Л.А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. — Барановичи : БарГУ, 2020. – 359 с.

Статьи в научных изданиях, включенных в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

2. Сиваченко, Л.А. Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибровалкового измельчителя / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. – 2017. – Вып. 5. – С. 87–92.

3. Сиваченко, Л.А. Оценка эффективности дробления вибровалкового измельчителя / Л.А. Сиваченко. А.Н. Хустенко, Л.Л. Сотник // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 4. – С. 89–97.

4. Сотник, Л.Л. Исследование влияния отдельных факторов на степень измельченности в вибровалковом измельчителе методом математического планирования эксперимента / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 1. – С. 30–36.

5. 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.

6. 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. Машиностроение. – 2018. – № 4. – С. 19–22.

7. Сотник, Л.Л. Исследования взаимодействия материальной точки с цилиндрическим эксцентриком / Л.Л. Сотник, С.И. Русан, Л.А. Сиваченко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 1. – С. 48–54.

8. Сотник, Л.Л. Метод приближенного анализа взаимодействия материала с валками в вибровалковом измельчителе / Л.Л. Сотник, С. И. Русан, Л.А. Сиваченко, О.И. Наливко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – № 4. – С. 453–463.

9. Сотник, Л.Л. Анализ пропускной способности вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения валка / Л.Л. Сотник, С.И. Русан, Л.А. Сиваченко // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. – 2021. – Вып. 10. – С. 78–87.

Статьи в других научных изданиях

10. Сиваченко, Л.А. Вибровалковый измельчитель и основы его проектирования / Л.А. Сиваченко, И.А. Богданович, Л.Л. Сотник // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві : зб. наук. пр. / Луцький нац. техн. ун-т ; редкол.: В.І. Шваб'юк [та інш.]. – Луцьк : ЛНТУ, 2016. – Вип. 5. – С. 32–39.

11. Сотник, Л.Л. Сравнительный анализ процесса дробления сильвинитовой руды в вибровалковом измельчителе на различных режимах / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко // Труды БГТУ. Сер. 2 : Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – Минск : БГТУ, 2020. – № 2. – С. 76–81.

12. Сотник, Л.Л. Экспериментальные исследования измельчения доломита в вибровалковом измельчителе / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко // Мир транспорта и технологических машин : науч-техн. журн. – Орел, ОГУ, 2020. – № 2. – С. 38–46.

Материалы конференций

13. Сиваченко, Л.А. Основы проектирования вибровалкового агрегата для дезинтеграторной обработки минеральных материалов / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник, И.А. Богданович // Наукоемкие технологии и инновации (XXII научные чтения) : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 6–7 окт. 2016 г. : в 12 ч. / БГТУ им. В.Г. Шухова ; редкол.: Е.Н. Чижова, В.Ш. Гузаиров. – Белгород : БГТУ, 2016. – Ч. 4. Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – С. 179–185.

14. Сиваченко, Л.А. Вибровалковый измельчитель / Л.А. Сиваченко, И.А. Богданович, Л.Л. Сотник // Наукоемкие технологии и инновации (XXII научные чтения) : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 6–7 окт. 2016 г. : в 12 ч. / БГТУ им. В.Г. Шухова ; редкол.: Е.Н. Чижова, В.Ш. Гузаиров. – Белгород : БГТУ, 2016. – Ч. 5. Эффективные материалы, технологии и машины для строительства и эксплуатации автомобильных дорог. – С. 194–198.

15. Сиваченко, Л.А. Валковые дробилки и их развитие / Л.А. Сиваченко, Н.В. Гречко, Л.Л. Сотник // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. / под ред. В.С. Богданова. – Белгород, 2016. – Вып. XV. – С. 213–217.

16. Сотник, Л.Л. Кинематический анализ эксцентрикового вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник, С.И. Русан, Л.А. Сиваченко // Ударно-вибрационные системы и машины для строительной и горной отраслей : материалы VI Междунар. науч. симп., Орел, 26–27 апр. 2017 г. / редкол.: Л.С. Ушаков (гл. ред.) [и др.]. – Орел, 2017. – С. 233–241.

17. Сотник, Л.Л. Анализ движения точки валка, установленного на эксцентриковом вале вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник, С.И. Русан, Л.А. Сиваченко // Содружество наук. Барановичи-2017 : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, Барановичи, 18 мая 2017

г. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Барановичский гос. ун-т ; редкол.: В.В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2017. – Ч. 2. – С. 235–237.

18. Сиваченко, Л.А. Кинематический анализ движения эксцентрикового валка вибровалкового измельчителя / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник, С.И. Русан // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 22–23 сент. 2017 г. / Белгород. ГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – С. 298–304.

19. Сотник, Л.Л. Особенности работы и схема вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник, В.А. Дремук, Л.А. Сиваченко // Экономика, технологии и право в современном мире : материалы Междунар. науч.-практ. конф. фак. экономики и права и инженерного фак., Барановичи, 20 окт. 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т ; редкол.: А.В. Никишова (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2017. – С. 106–108.

20. Сиваченко, Л.А. Анализ изменения угла захвата в вибровалковом измельчителе / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. / БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – С. 236–241.

21. Сотник, Л.Л. Определение скоростей и ускорений точки валка вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко, В.С. Севостьянов // Техника и технологии: инновации и качество : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 19 дек. 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранов. гос. ун-т, Студенч. науч. сообщество БарГУ ; редкол.: В.В. Климук (гл. ред.), Ю. Е. Горбач (отв. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2017. – С. 148–150.

22. Сиваченко, Л.А. Анализ изменения угла захвата и межвалкового пространства в вибровалковом измельчителе / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник, И.А. Богданович // Научные стремления : сб. науч. тр. – Минск, 2017. – Вып. 22. – С. 7–11.

23. Сотник, Л.Л. Селективное измельчение в вибровалковом измельчителе / Л.Л. Сотник, О.А. Кузьмина // Актуальные научные исследования в современном мире : сб. науч. тр. Вып. 11 / редкол.: В. П. Коцур (гл. ред.) [и др.]. – Переяслав-Хмельницкий, 2017. – Ч. 10. – С. 33–37.

24. Сотник, Л.Л. Анализ факторов, влияющих на работу вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник // Актуальные вопросы современной науки : сб. ст. по материалам X Междунар. науч.-практ. конф, Томск, 12 марта 2018 г. : в 4 ч. – Уфа, 2018. – Ч. 1. – С. 157–161.

25. Сотник, Л.Л. Определение потребляемой мощности привода вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник // Состояние и перспективы развития химического и нефтехимического комплекса : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–30 нояб. 2018 г. – Минск, 2018. – С. 234–238.

26. Сотник, Л.Л. К вопросу анализа производительности вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко // Энергосберегающие техноло-

гические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. – Белгород, 2018. – Вып. XVII. – С. 360–365.

27. Русан, С.І. Даследаванне прапускной здольнасці тэхналагічных пераходаў са зменнымі параметрамі / С.І. Русан, Л.Л. Сотнік // Техника и технологии: инновации и качество : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 20 дек. 2018 г. / Баранович. гос. ун-т. – Барановичи, 2018. – С. 123–126.

28. Сотник, Л.Л. Анализ существующих комплексов ступенчатого измельчения материалов / Л.Л. Сотник, С.И. Ханин // Техника и технологии: инновации и качество : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 20 дек. 2018 г. / Баранович. гос. ун-т. – Барановичи, 2018. – С. 129–131.

29. Сотник, Л.Л. Теоретический анализ повышения долговечности работы подшипников вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник, В.А. Дремук // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27–28 мая 2019 г. / редкол.: М.В. Нерода [и др.]. – Брест, 2019. – С. 70–73.

30. Сотник, Л.Л. Методика расчета конструктивных и технологических параметров вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник // Энергоресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : межвуз. сб. ст. – Белгород, 2019. – Вып. XVIII. – С. 162–167.

31. Сотник, Л.Л. Анализ ступенчатой переработки материалов в строительной отрасли Республики Беларусь / Л.Л. Сотник // Инновации в науке и практике : сб. ст. : в 4 ч. / редкол.: И. А. Соловьев (гл. ред.) [и др.]. – Уфа, 2019. – Ч. 1. – С. 162–167.

32. Сотник, Л.Л. Моделирование процесса деформирования материала в вибровалковом измельчителе / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко // Завалишинские чтения'20: материалы XV Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике СПб., 15-18 апр. 2020 г. : сб. докл. – СПб. : ГУАП, 2020. – С. 163–167.

33. Сотник, Л.Л. Пути повышения производительности вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник // Наука – практике. Барановичи-2020 : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 15 мая 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. – Барановичи, 2020. – С. 149–152.

34. Сотник, Л.Л. Перспективы применения вибровалкового измельчителя-активатора при измельчении сильвинита перед флотационным обесшламливанием / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко, В.А. Потапов, И.М. Корзун // Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии : материалы национ. конф. – Белгород, 2021. – С. 135–140.

35. Сотник, Л.Л. Влияние амплитудных и частотных характеристик вибровалкового агрегата на производительность и энергоэффективность процесса измельчения сильвинита / Л.Л. Сотник, В.А. Дремук, К.С. Винничек // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 29–30 сент. 2021 г. – Брест, 2021. – С. 145–149.

36. Сотник, Л.Л. Промышленные испытания вибровалкового измельчителя-активатора в технологической линии переработки строительных отходов / Л.Л. Сотник, К.С. Винничек, Е.А. Дерман // Эпоха науки : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Ачинск, дек. 2021 г. – Ачинск, 2021. – С. 86–91.

Тезисы докладов

37. Сотник, Л.Л. К вопросу создания вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-практ. конф, Могилев, 27–28 окт. 2016 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2016. – С. 136.

38. Сотник, Л.Л. Кинематика валка вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 26–27 окт. 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 214.

39. Сотник, Л.Л. Теоретические основы проектирования вибрационной техники в сфере измельчения материалов / Л.Л. Сотник, И.О. Волостных // Содружество наук. Барановичи-2018 : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, Барановичи, 17 мая 2018 г. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т, Студенч. науч. о-во БарГУ ; [редкол.: В.В. Климук (гл. ред.) и др.]. – Барановичи, 2018. – Ч. 3. – С. 116–117.

40. Сотник, Л.Л. Основы расчета мощности привода вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 25–26 окт. 2018 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2018. – С. 146.

41. Сотник, Л.Л. К вопросу классификации существующих измельчителей / Л.Л. Сотник, А.Н. Хустенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апр. 2019 г. / редкол.: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 198–199.

42. Сотник, Л.Л. Оптимальные параметры процесса измельчения доломита в вибровалковом измельчителе / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 24–25 окт. 2019 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2019. – С. 146.

43. Сотник, Л.Л. Вибровалковый измельчитель-активатор для переработки строительных отходов / Л.Л. Сотник, К.С. Винничек, Л.А. Сиваченко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апр. 2020 г. / редкол.: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 251–252.

44. Сотник, Л.Л. Оценка влияния частоты вращения эксцентрикового вала на процесс измельчения / Л.Л. Сотник, К.С. Винничек // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф, Могилев, 28–29 окт. 2021 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2021. – С. 108.

45. Сотник, Л.Л. Анализ пропускной способности вибровалкового измельчителя-активатора при различных режимах движения валков / Л.Л. Сотник, С.А. Саханько, Л.А. Сиваченко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2021 г. / редкол.: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2021. – С. 102–103.

Патенты

46. Вибровалковый измельчитель-активатор : пат. РФ № 186478 : B02C 4/32 / В.С. Севостьянов, Л.А. Сиваченко, М.В. Севостьянов, Т.Л. Сиваченко, Л.Л. Сотник, П.Ю. Горягин. – № 2018130277 ; заявл. 20.08.2018 ; опубл. 22.01.2019.

РЕЗЮМЕ

Сотник Леонид Леонидович

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ДЕЗИНТЕГРАЦИИ В ВИБРОВАЛКОВОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ

Ключевые слова: вибровалковый измельчитель, эксцентриситет, вибрационное воздействие, раздавливающе-сдвиговое деформирование, производительность, удельная энергоемкость, энергозатраты.

Цель диссертационной работы заключается в поиске и научном обосновании новых технических решений в области измельчения, разработке основ расчета вибровалкового измельчителя минеральных материалов, обеспечивающего снижение удельного расхода электроэнергии и повышение производительности путем комплексного воздействия на измельчаемый материал.

Методы исследования и аппаратура: аналитическое моделирование процесса разрушения материала в вибровалковом измельчителе, движения материала в межвалковом пространстве; экспериментальные исследования влияния варьируемых факторов на потребляемую мощность, производительность, степень измельчения и энергоемкость.

В работе рассмотрена сущность процесса измельчения в целом, что позволило определить ряд перспективных направлений по совершенствованию валковых агрегатов. Исследована кинематика валков и кинетика движения материала в вибровалковом измельчителе, позволившие получить уравнения для расчета конструктивных и технологических параметров.

Построена математическая модель деформирования материала в вибровалковом измельчителе. Получены уравнения для определения усилий измельчения раздавливающе-сдвиговым и вибрационным (ударным) воздействием.

Теоретические расчеты позволили получить аналитические зависимости по расчету производительности и потребляемой мощности привода.

На основании теоретических и экспериментальных исследований спроектирована полупромышленная установка, которая прошла испытания на стадии переработки отходов строительных конструкций в филиале СУ-145 ОАО «Стройтрест № 25».

Область применения: машиностроение, предприятия горной и фармацевтической промышленности, порошковой металлургии.

РЭЗЮМЭ

Сотнік Леанід Леанідавіч

ІНТЭНСІФІКАЦЫЯ ПРАЦЭСУ ДЭЗІНТЭГРАЦЫІ У ВІБРАВАЛКОВЫМ ЗДРАБНЯЛЬНІКУ

Ключавыя словы: вібравалковы здрабняльнік, эксцэнтрысітэт, вібрацыйнае ўздзеянне, расціскальна-зрушвальнае дэфармаванне, прадукцыйнасць, удзельная энергаёмістасць, энергазатраты.

Мэта дысертацыйнай работы заключаецца ў пошуку і навуковым абгрунтаванні новых тэхнічных рашэнняў у галіне драбнення, распрацоўцы асноў разліку вібравалковага здрабняльніка мінеральных матэрыялаў, які забяспечвае зніжэнне ўдзельнага расходу электраэнергіі і павышэнне прадукцыйнасці шляхам комплекснага ўздзеяння на матэрыял які здрабняецца.

Метады даследавання і апаратура: аналітычнае мадэляванне працэсу разбурэння матэрыялу ў вібравалковым здрабняльніку, руху матэрыялу ў міжвалковай прасторы; эксперыментальныя даследаванні ўплыву фактараў якія вар'іруюцца на спажываную магутнасць, прадукцыйнасць, ступень драбнення і энергаёмістасць.

У працы разгледжана сутнасць працэсу драблення ў цэлым, што дазволіла вызначыць шэраг перспектыўных напрамкаў па ўдасканаленні валковых агрэгатаў. Даследавана кінематыка валкоў і кінетыка руху матэрыялу ў вібравалковым здрабняльніку, якія дазволілі атрымаць ўраўненні для разліку канструктыўных і тэхналагічных параметраў.

Пабудавана матэматычная мадэль дэфармавання матэрыялу ў вібравалковым здрабняльніку. Атрыманы ўраўненні для вызначэння намаганняў драбнення расціскальна-зрушвальным і вібрацыйным (ударным) уздзеяннем.

Тэарэтычныя разлікі дазволілі атрымаць аналітычныя залежнасці па разліку прадукцыйнасці і спажыванай магутнасці прывада.

На аснове тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў спраектавана паўпрамысловая ўстаноўка, якая прайшла выпрабаванні на стадыі перапрацоўкі адходаў будаўнічых канструкцый у філіяле БУ-145 ААТ «Будтрэст № 25».

Галіна выкарыстання: машынабудаванне, прадпрыемствы горнай і фармацэўтычнай прамысловасці, парашковай металургіі.

SUMMARY

Sotnik Leonid Leonidovich

INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF DISINTEGRATION IN THE VIBROROLL GRINDER

Key words: vibraroll grinder, eccentricity, vibration effect, crushing-shear deformation, productivity, specific energy consumption, energy consumption.

The purpose of the thesis is to search and scientific justification for new technical solutions in the field of grinding, the development of the fundamentals of calculating a vibraroll grinder of mineral materials, which ensures a reduction in the specific energy consumption and increase productivity, through a comprehensive effect on the material being ground.

Research methods and equipment: analytical modeling of the process of destruction of the material in a vibraroll grinder, the movement of the material in the roll space; experimental studies of the influence of variable factors on power consumption, productivity, degree of grinding and energy intensity.

In the work the essence of the grinding process as a whole is considered, which made it possible to determine a number of promising areas for improving roll aggregates. The kinematics of a roll and the kinetics of material movement in a vibratory mill are studied, which made it possible to obtain equations for calculating structural and technological parameters.

A mathematical model of the deformation of the material in a vibraroll grinder is constructed. An equation is obtained for determining the grinding forces by crushing-shear and vibrational (shock) deformation.

Theoretical calculations made it possible to obtain analytical relationships for calculating the performance and power consumption of the drive.

Based on theoretical and experimental studies, a semi-industrial plant was designed, which was tested at the stage of processing waste from building structures at Branch SU-145 of JSC «Stroytrest No. 25».

Scope: mechanical engineering, enterprises of the mining and pharmaceutical industries, powder metallurgy.

Подписано в печать 14.05.2022. Формат 60×84 1/16.
Отпечатано на копировально-множительной технике. Тираж 70 экз. Заказ 792.

Полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Барановичский государственный университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/424 от 09.09.2016.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в редакционно-издательской группе БарГУ.
Ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи. Тел. 8 (0163) 64 34 77, e-mail: rig@barsu.by.