

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-911

doi: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-29-39

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ ШЛИФОВАЛЬНОГО ШЛАМА ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Валерий Александрович Лебедев<sup>1</sup>, Андрей Александрович Ширин<sup>2✉</sup>, Николай Сергеевич Коваль<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup> va.lebidev@yandex.ru, ID – ORCID - 0000-0003-1838-245X

<sup>2</sup> ANDREY.SHIRIN.94@yandex.ru, ID – ORCID - 0000-0003-0770-1072

<sup>3</sup> koval-nc@mail.ru, ID – ORCID - 0000-0002-5787-9621

### Аннотация

Цель исследования. Исследование энергетических условий измельчения ферромагнитных частиц бесконтактным способом в устройствах с вращающимся электромагнитным полем

Задача, решению которой посвящена статья. Разработка энергетической модели управления процессом измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле и экспериментальное подтверждение её адекватности.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на основных положениях теории магнетизма, прочности и разрушения твердых тел. Экспериментальные исследования выполнены в НИИ «Вибротехнологии» Донского государственного технического университета с использованием опытно-экспериментальной установки, реализующей вращающееся электромагнитное поле.

Новизна работы. Установление аналитических зависимостей, описывающих энергетические аспекты измельчения ферромагнитных частиц бесконтактным способом в устройствах с вращающимся электромагнитным полем.

Результаты исследования. Предложена зависимость, позволяющая оценить энергетическое состояние частиц в магнитовибрирующем слое, формируемого в устройствах под воздействием вращающегося электромагнитного поля. Установлено энергетическое условие, определяющее пороговое

значение градиента индукции поля, обеспечивающее устойчивый режим магнитовибрирующего слоя, и, как следствие, измельчение частиц до заданного размера. Разработана энергетическая модель управления процессом измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле и предложены теоретико-вероятностные формулы для оценки продолжительности процесса измельчения

Выводы. Применение устройств с вращающимся электромагнитным полем позволяет бесконтактным способом эффективно реализовать один из важных этапов переработки шламовых отходов металлопроизводства, связанного с измельчением его ферромагнитных частиц, обеспечивающего получение ферромагнитного сырья с высокими гранулометрическими характеристиками.

Предложенная, на основе баланса энергии разрушения и энергии, получаемой частицей от электромагнитного поля с учетом механических и магнитных характеристик материала, энергетическая модель измельчения частиц во вращающемся электромагнитном поле позволяет реализовать процесс управления гранулометрическим размером ферромагнитных частиц шламовых отходов.

**Ключевые слова:** отходы, ферромагнитные частицы, электромагнитное поле, магнитовибрирующий слой, индукция, энергия, разрушение, измельчение.

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-38-90006.

## ENERGY ASPECTS OF GRINDING FERROMAGNETIC PARTICLES OF GRINDING SLUDGE IN A ROTATING ELECTROMAGNETIC FIELD

Valeriy Aleksandrovich Lebedev<sup>1</sup>, Andrey Aleksandrovich Shirin<sup>2✉</sup>, Nikolay Sergeevich Koval<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup> va.lebidev@yandex.ru, ID – ORCID - 0000-0003-1838-245X

<sup>2</sup> ANDREY.SHIRIN.94@yandex.ru, ID – ORCID - 0000-0003-0770-1072

<sup>3</sup> koval-nc@mail.ru, ID – ORCID - 0000-0002-5787-9621

### Abstract

The work objective. Study of energy conditions for grinding ferromagnetic particles by non-contact method in devices with a rotating electromagnetic field.

The problem to which the article is devoted. Development of an energy model for controlling the process of grinding ferromagnetic particles of sludge wastes in a rotating electromagnetic field and experimental confirmation of its relevance.

Research methods. Theoretical studies are based on the main principles of the theory of magnetism, strength and destruction of solids. Experimental studies were carried out at the Research Institute of "Vibrotehnologii" of Don State Technical University using a pilot plant implementing a rotating electromagnetic field.

The novelty of the work. Establishment of analytical dependences describing the energy aspects of grinding ferromagnetic particles in a non-contact manner in devices with a rotating electromagnetic field.

The results of the study. A dependence is proposed that makes it possible to estimate the energy state of particles in a magnetic vibrating bed formed in devices under the influence of a rotating electromagnetic field. The energy condition determining the threshold value of the field induction gradient is estab-

lished, which ensures a stable mode of the magnetic vibrating layer, and, as a consequence, grinding of particles to a given size. An energy model for controlling the grinding process of ferromagnetic particles of sludge wastes in a rotating electromagnetic field is developed and probability-theoretic formulas for estimating the duration of the grinding process is proposed.

Conclusions. The use of devices with a rotating electromagnetic field allows to implement effectively one of the important stages of treating metal sludge wastes associated with grinding of its ferromagnetic particles, which ensures the production of ferromagnetic raw materials with high granulometric characteristics.

The proposed energy model of particle grinding in a rotating electromagnetic field, based on the balance of the energy of destruction and the energy received by the particle from the electromagnetic field, taking into account the mechanical and magnetic characteristics of the material, makes it possible to implement the process of controlling the granulometric size of ferromagnetic particles of sludge wastes.

**Keywords:** wastes, ferromagnetic particles, electromagnetic field, magnetic vibrating layer, induction, energy, destruction, grinding.

**Funding:** the research was carried out with the financial support of the RFBR within the framework of scientific project No. 20-38-90006.

### Введение

На машиностроительных предприятиях, осуществляющих обработку металлов, ежемесячно образуются тысячи тонн металлосодержащих отходов, представляющих собой технико-экономическую и экологическую проблему. Переработка металлоотходов позволяет поднять коэффициент использования металла до 90 – 95%, сократить потери легирующих элементов, получить значительный экономический

эффект. Существующий дефицит стальных порошков, необходимость экономии материальных ресурсов приводят к пересмотру проблемы использования отходов механообработки, особенно стружковых и шламовых отходов. Чтобы получить из шлама вторсырьё требуемого качества требуется, как показано на рис.1 реализовать целый комплекс технологических операций.

Предметом настоящих исследований

являлся этап переработки образованных за счет больших сил межчастичного взаимодействия, конгломератов шламовых отходов. Именно этот этап переработки позволяет обеспечить высококачественные granulометрические характеристики ферромагнитной компоненты конгломератов, востребованной при изготовлении изделий в порошковой металлургии. Из известных на сегодняшний день устройств для измельчения металлоотходов наибольшее применение получили различного рода дробилки, и бильные мельницы. Однако

сложность конструкции их и высокая степень износа бил обуславливают поиск более эффективных безконтактных способов измельчения. В этом плане научный и практический интерес представляют устройства с вращающимся электромагнитным полем (рис. 2), в условиях которого, осциллирующая под действием сил электромагнитного поля совокупность частиц, образуют магнитовибрирующий слой (МВС), обеспечивающий решение большого комплекса различных технологических задач.



Рис. 1. Схема переработки шлама  
Fig. 1. Sludge processing scheme

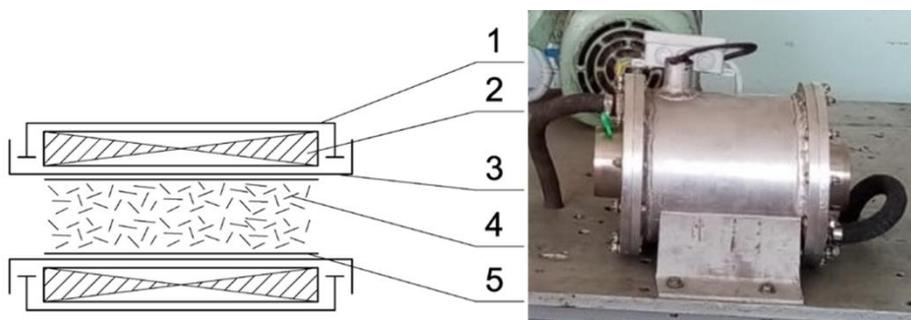


Рис. 2. Устройство с вращающимся электромагнитным полем  
(1 – корпус, 2 – индуктор, 3 – труба, 4 – шлам, 5 – сменная вставка)  
Fig. 2. A device with a rotating electromagnetic field  
(1 – case, 2 – inductor, 3 – pipe, 4 – sludge, 5 – replaceable insert)

В отличие от однородного поля магнитовибрирование во вращающемся поле,

как показано в работах [3, 7] обладает большей интенсивностью поступательного

движения и как следствие большими энергетическими возможностями для реализации процессов разрушения конгломератов шламовых отходов и измельчения их металлических частиц. Эти частицы можно

охарактеризовать как твердое тело, обладающее ферромагнитными свойствами, основными характеристиками которых являются магнитная проницаемость и магнитный момент.

### Оценка энергетического состояния частиц в магнитовибрирующем слое

Определение энергии, сообщаемой вращающимся электромагнитным полем частицам произведём, сделав ряд следующих допущений:

- в условиях установившегося магнитовибрирующего слоя энергия, сообщаемая частицам от внешнего поля, компенсируется диссипацией энергии, затрачиваемой на их разрушение в процессе контактного взаимодействия [1];

- изменения ориентации магнитных моментов частиц за время между последовательными столкновениями относительно мало, что дает возможность линеаризовать уравнение движения ферромагнитных частиц во внешнем поле;

- энергия от поля сообщается частицам как через поступательную, так и через вращательную степени свободы;

- взаимодействия между частицами приводят к установлению эффективного равновесия между поступательными и

вращательными степенями свободы частиц;

- частицы обладают замороженными магнитными моментами

В работах [2, 3, 17], посвященных исследованию движения ферромагнитных частиц в магнитном поле установлено, что среднее количество энергии, передаваемое внешним полем вращательным степеням свободы одному частице за время  $\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$  равно  $\frac{1}{2}I(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_0)^2$  при  $t = t_0 + \frac{T}{2}$  по начальным значениям  $\varphi_0$  и  $t_0$ , где  $T/2$ - время между столкновениями частиц, которое реализуется в крайних точках траектории возвратно-поступательного движения. Запишем выражение для определения энергии  $E_B$ , передаваемой внешним полем частицам в единицу времени при вращательно-колебательном движении в виде

$$E_B = \frac{1}{2}I(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_0)^2 \cong \frac{1}{2} \frac{(p_m B_v)^2}{\pi l \omega^2}, \text{ Дж.} \quad (1)$$

Для определения энергии, передаваемой частице-конгломерату от вращающегося электромагнитного поля с градиентом  $\frac{\partial B_v}{\partial y}$ , в одномерном случае, не учитывая сопротивление среды, запишем уравнение поступательно – колебательного движения в виде:

$$m\ddot{y} = p_m \frac{\partial B_v}{\partial y} \sin\varphi \cos(\omega t), \quad (2)$$

где  $m$ - масса частицы-конгломерата,  $\ddot{y}$  – ускорение поступательного движения частицы,  $\varphi = \varphi_0 + \varphi_1$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{p}_m$ , сразу после столкновения

частиц,  $\varphi_0$ - угол между этими векторами в начальный момент времени.

Интегрируя уравнение (2), а также принимая, что среднее количество энергии, передаваемое полем при возвратно-поступательном движении одной частицы за время  $T/2$  равно  $\frac{1}{2}m(\dot{y} - \dot{y}_0)^2$  при  $t = t_0 + T/2$  по начальным значениям  $y_0$  и  $t_0$ , получим выражение для энергии, передаваемой полем частицам в единицу времени при поступательно – колебательном движении:

$$E_n = \frac{1}{2}m(\dot{y} - \dot{y}_0)^2 \cong \frac{1}{2} \frac{\rho_m^2}{\pi m \omega^2} \left[ \frac{\partial B_v}{\partial y} \right]^2, \text{ Дж,} \quad (3)$$

где  $\frac{\partial B_v}{\partial y}$  – градиент индукции электромагнитного вращающегося поля, Тл/м.

На основе выражений (1) и (3) предложена зависимость, позволяющая опреде-

лить полную энергию, передаваемую частице-конгломератам во вращающемся электромагнитном поле в единицу времени, а также оценить их энергетическое состояние в магнитовибрирующем слое

$$E = E_B + E_{\Pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho_m^2}{\omega^2} \left[ \frac{B_v^2}{l} + \frac{1}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right], \text{ Дж.} \quad (4)$$

### Энергетическое условие измельчения ферромагнитных частиц

После разрушения конгломератов и выделения из них немагнитных компонентов формируются ферромагнитные частицы шлама размером  $D_H$ , которые в условиях высокоградиентного электромагнитного поля могут подвергаться дальнейшему разрушению-измельчению путем их раскалывания до заданного размера  $D_K$ .

Предположим, что при соударении разных по массе ферромагнитных частиц в магнитовибрирующем слое:

– разрушается одна из частиц;

– процесс взаимодействия частиц считаем происходящим в пределах половины периода, т.е.  $T/2 = \pi/\omega$ ;

– частица обладает запасом кинетической энергии, определяемой выражением (14).

При многократном ударно-импульсном контактном взаимодействии количество энергии  $E_{\text{Я}}$  необходимое для разрушения ферромагнитной частицы

шлама и измельчения её со степенью  $Z_u = D_H/D_K$  согласно [4] равно

$$E_p = \frac{\pi \sigma^2 D_K^3}{12E} (Z_u^3 - 1), \text{ Дж}, \quad (5)$$

где  $B$  – предел прочности при разрушении ферромагнитной частицы. Па;  $D_H$  и  $D_K$  – начальный и конечный эквивалентные диаметры частиц, м;  $Z_u = \frac{D_H}{D_K}$  – степень измельчения частицы;  $E$  – модуль упругости частицы, Па.

Запишем условие разрушения частиц

$$E_m \frac{T}{2} + E_M \frac{T}{2} = E_p$$

где первое слагаемое есть энергия, передаваемая магнитным полем за половину периода первой частице, второе слагаемое – энергия, передаваемая второй частице.

С учетом принятых допущений измельчение частиц до заданного размера  $D_K$  происходит при выполнении следующего условия:

$$\frac{1}{2\pi} \frac{\rho_m^2}{\omega^2} \left[ \frac{B_v^2}{l} + \frac{1}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{1}{2\pi} \frac{\rho_M^2}{\omega^2} \left[ \frac{B_v^2}{l} + \frac{1}{M} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right] = \frac{\pi \sigma^2 D_K^3}{12E} (Z_u^3 - 1) \quad (6)$$

или

$$B_v^2 \left( \frac{\rho_m^2}{l_m} + \frac{\rho_M^2}{l_M} \right) + \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \left( \frac{\rho_m^2}{m} + \frac{\rho_M^2}{M} \right) = K D_K^3 (Z_u^3 - 1), \quad (7)$$

где  $K = \frac{\pi^2 \sigma^2 \omega^2}{6E}$ , Па/с<sup>2</sup>, – константа, зависящая от механических свойств материала и частоты переменного поля.

Условие (7) позволяет определить пороговое значение градиента индукции

поля, обеспечивающее устойчивый режим магнитовибрирующего слоя, обеспечивающего измельчение частиц до заданного размера  $D_K$

$$\frac{\partial B_v}{\partial y} = \sqrt{\frac{K D_K^3 (Z_u^3 - 1) - B_v^2 \left( \frac{\rho_m^2}{l_m} + \frac{\rho_M^2}{l_M} \right)}{\left( \frac{\rho_m^2}{m} + \frac{\rho_M^2}{M} \right)}}, \text{ Тл/м.} \quad (8)$$

### Энергетическая модель процесс измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле

Рассмотрим процесс хаотичного воздействия в магнитовибрирующем слое ферромагнитных частиц, описываемых диаметром  $d(m)$  и имеющих массу  $m = \frac{\rho \pi d^3}{6}$  (кг), магнитный момент  $P_m =$

$\frac{\Psi \pi d^3}{6}$  (Ам<sup>2</sup>), момент инерции  $I_m = \frac{\rho \pi d^5}{60}$  (кг·м<sup>2</sup>), где  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) – плотность материала,  $\Psi$  (А/м) – намагниченность материала, на случайно выбранную частицу, имеющую начальный диаметр  $D_H$ , массу

$M = \frac{\rho\pi D_n^3}{6}$ , магнитный момент  $P_M = \frac{\Psi\pi D_n^3}{6}$ , момент инерции  $I_M = \frac{\rho\pi D_n^5}{60}$ , и приводящий к её измельчению до размера  $D_K$ .

С учетом принятых значений участ-

$$\left(\frac{\partial B_v}{\partial y}\right)^2 = 9 \frac{\rho K D_K^3 (Z_u^3 - 1) - B_v^2 \pi \Psi^2 (d + D_n)}{\pi \Psi^2 (d^3 + D_n^3)} \quad (9)$$

Преобразовав (9), найдем соотношение между конечными и начальными раз-

вующих во взаимодействии частиц выражение (8) запишем в виде

мерами измельчаемой частицы и градиентом индукции поля в виде:

$$D_K = \sqrt[3]{D_n^3 - K^* \left[ 0,1(d^3 + D_n^3) \left(\frac{\partial B_v}{\partial y}\right)^2 + B_v^2 (d + D_n) \right]}, \text{ м}, \quad (10)$$

где  $K^* = \frac{6\Psi^2 E}{\rho\sigma^2\omega^2}$  ( $\text{м}^2/\text{Тл}^2$ ) – константа, зависящая от механических и магнитных свойств материала и частоты переменного поля. Соотношение (10) позволяет определить градиент индукции поля, при котором разрушается частица диаметром  $D_n$  до частицы диаметром  $D_K$  при условии, что произошло соударение между частицами диаметрами  $D_n$  и  $d$ . Задавая конечный размер частицы, которая определяет размер измельченной частицы, из соотношения (8, 10) определяем, при каких полях реализуется измельчения с заданным гранулометрическим составом.

С целью оценки продолжительности процесса измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов в магнитовибрирующем слое воспользуемся теоретико-вероятностной моделью, предложенной в работах [2, 5], для практических расчётов продолжительности виброударной упрочняющей обработки в виде:

$$t = \frac{k}{Pf}, \quad (11)$$

где  $k$  – количество событий, обеспечивающих технологический эффект;  $P$  – вероятность события, обеспечивающего технологический эффект за один цикл колебаний;  $f$  – частота колебаний, Гц.

Технологически эффект измельчения шламовых отходов в магнитовибрирующем слое, обеспечивается в результате хаотичного и многократного соударения частиц, приводящего к изменению их состава, так и геометрических размеров. Поэтому в качестве количественной величины события, обеспечивающего технологический эффект при разрушении конгломера-

тов вполне объективно может быть принята среднестатистическая степень их измельчения  $Z_{и}$ , представляющая собой отношение масс исходных, выделившихся при разрушении ферромагнитных частиц к частицам требуемого после измельчения размерам.

Выразив частоту колебаний через угловую скорость вращательного движения магнитовибрирующего слоя в электромагнитном вращающемся поле  $\omega = 2\pi f$  получим формулу для определения продолжительности измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов

$$t_{и} = \frac{2\pi Z_{и}}{P\omega}, \text{ с}; \quad (12)$$

где:  $Z_{и}$  – среднестатистическая степень измельчения,  $P$  – вероятность события, обеспечивающего технологический эффект за один цикл колебаний,  $\omega$  – угловая скорость вращательного движения магнитовибрирующего слоя.

Что же касается вероятности  $P$ , то её величина определяется кинетикой движения частиц в магнитовибрирующем слое, зависит от его энергетического состояния, определяемого градиентом индукции электромагнитного вращающегося поля и устанавливается экспериментально.

Основным параметром, характеризующим эффективность процесса измельчения ферромагнитных частиц, примем степень измельчения. Если представить частицы ферромагнитного материала как сферы, массы которых равны массе частиц, то степень измельчения задаем как отношение диаметров исходной частицы и частицы после соударения. Как показывают результаты эксперимента [8, 15], степень

измельчения отличается от единицы в третьем, четвертом знаке после запятой. Следовательно, можно предположить, что при единичном акте соударения от частицы отделяется незначительная часть.

С целью оценки эффекта ударного

разрушения частиц дисперсного ферромагнетика в магнитовибрирующем слое использовали порошок  $SmCo_5$  после помола в шаровой мельнице, распределение, по размерам частиц которого представлено на рис. 3.

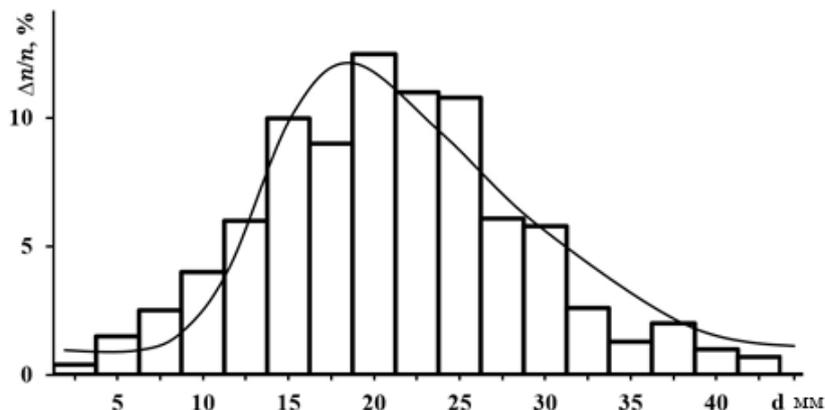


Рис. 3. Распределение частиц по размерам в исходном порошке  $SmCo_5$   
 Fig. 3. Particle size distribution in the original  $SmCo_5$  powder

Порошок загружался в винтовой барабан, помещенный в устройство с вращающимся электромагнитным полем. Под действием пндеромоторных сил порошок образовывал магнитовибрирующий слой, в котором реализовывалось ударное измельчение частиц.

Предположим, что в магнитовибрирующем слое соударение частиц происходит каждые половину периода, задавая степень измельчения единичного акта соударения равную 1,0001, для частицы в 25 мкм, получаем изменение диаметра равное

0,0025 мкм. При этом за одну секунду при частоте промышленного тока 50 Гц частица участвует в 100 соударениях и ее диаметр уменьшается соответственно на 0, 25 мкм. Простым рассуждением можно получить, что в одну минуту частицы претерпевают  $6 \cdot 10^3$  соударений. При этом исходный диаметр частицы 25 мкм уменьшается до размера 10 мкм, 20 мкм – 8 мкм, 10 мкм – 4 мкм и т. д., что соответствует степени измельчения 2,5. На рис. 4 приведена гистограмма порошка после 40 минут воздействия на него МВС.

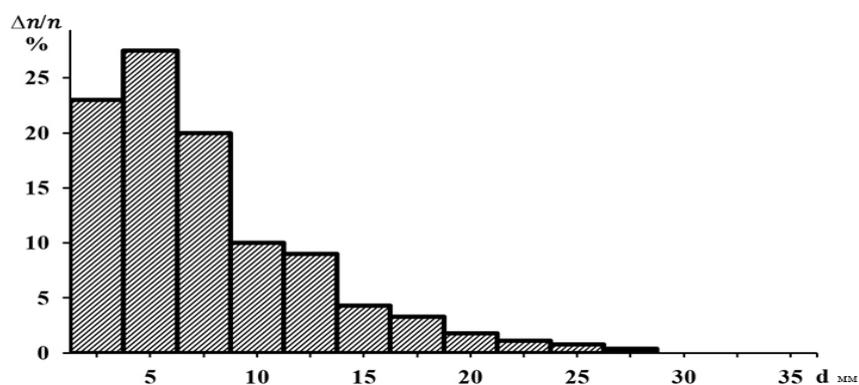


Рис. 4. Гистограмма распределения частиц по размерам через 40 минут воздействия МВС  
 Fig. 4. Histogram of particle size distribution after 40 minutes of exposure to MVS

Анализ полученных зависимостей показывает, что степень измельчения через

40 минут воздействия МВС составляет 3,27. Установлено, что через 60 минут воз-

действия МВС наряду с процессом разрушения наблюдается и процесс агрегирования частиц, что объясняет меньшую степень измельчения после 60 минут воздействия МВС.

Следует отметить, что полученные результаты получены при низкой концентрации частиц в магнитовибрирующем слое. Так, масса навески порошка 30 грамм при среднем диаметре частицы 25 мкм содержит  $43,7 \cdot 10^6$  частиц. Объем экспериментального винтового барабана был равен  $290 \text{ см}^3$ . Частицы в магнитовибрирующем слое в режиме измельчения распределены по всему объему винтового барабана. При этом в единице объема магнитовибрирующего слоя содержится  $150 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  частиц, объем которых составляет  $12,3 \cdot 10^{-10}$

$\text{см}^3$ . Можно предположить, что при такой низкой концентрации соударения частиц каждые половину периода не реализуются, что соответствует расчетным значениям степени измельчения.

После 20 минут измельчения в режиме 1 средний размер частиц порошка уменьшается с 81,3 мкм до 19,2 мкм. При создании в области измельчения устойчивого магнитовибрирующего слоя в режиме 2 средний размер частиц уменьшается до 9 мкм; в режиме 3 - до 2,8 мкм [16] (рис. 5). Из полученных результатов следует, что значения среднего размера частиц обусловлены не только механическими условиями измельчения, но и режимами электромагнитного воздействия

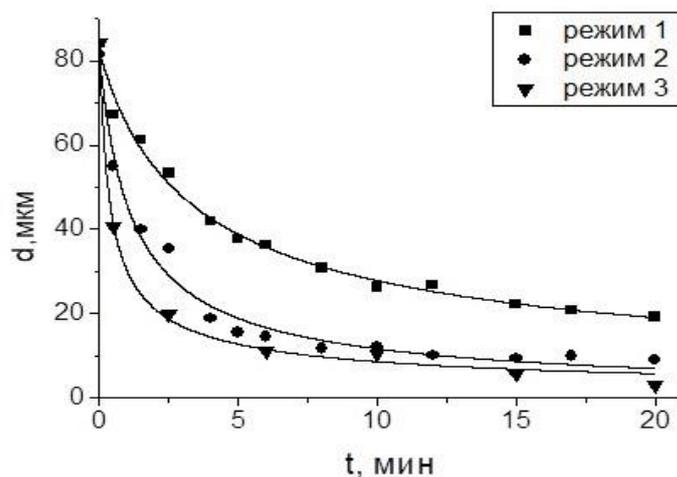


Рис. 5. Зависимость среднего размера частиц от времени измельчения  
Fig. 5. Dependence of the average particle size on the grinding time

При увеличении времени измельчения с 10 мин до 20 мин в режиме 1 степень измельчения возрастает с 3,2 до 4,4; в режиме 2 – с 7,0 до 9,3; а в режиме 3 – с 8,7 до 29,4. Степень измельчения при помоле в течение 25 мин в режиме 3 увеличивается до 43,9, а в режиме 1 даже через 120 мин

помола увеличивается только до 14,9. С ростом градиента индукции возрастает интенсивность движения частиц во вращающемся электромагнитном поле, что приводит к возрастанию роли процесса самоизмельчения [18].

### Заключение

В результате теоретических и экспериментальных исследований показано, что применение устройств с вращающимся электромагнитным полем позволяет бесконтактным способом эффективно реализовать один из важных этапов переработки шламовых отходов металлопроизводства,

связанного с измельчением его ферромагнитных частиц, обеспечивающего получение ферромагнитного сырья с высокими гранулометрическими характеристиками.

Предложенная, на основе баланса энергии разрушения и энергии, получаемой частицей от электромагнитного поля с

учетом механических и магнитных характеристик материала, энергетическая модель измельчения частиц во вращающемся электромагнитном поле позволяет реали-

зовать процесс управление гранулометрическим размером ферромагнитных частиц шламовых отходов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Levin B.E. Physicochemical bases of production, properties and use of ferrites. M.: Metallurgia, 1979. 427 p.
2. Thomson J. Instability and disasters in science and technology. M.: Mir, 1985. 254 p.
3. Vernigorov Y.M. Simulation of destruction of ferromagnetic materials particles in magneto-vibrational layer // World Science Proceedings of articles the international scientific conference. 2017. pp. 59-70. ISBN 978-5-00090-122-9.
4. Vernigorov Y.M. Magneto-vibrational technology of powder magnets production // Dissertation for the degree of D Eng. Rostov-on-Don. 1995. 369 p.
5. Бабичев А.П. Режимы работы устройства тонкого помола порошка  $\text{SmCo}_5$  // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 6(296). С. 64-70.
6. Багаев В.Н. К теории магнитоэлектродинамического взаимодействия и структурообразования в дисперсных средах // Магнитная гидродинамика. 1986. №2. С. 35-40. doi: 10.22364/mhd.
7. Болога М.К. Некоторые особенности магнетизации дисперсных систем // Магнитная гидродинамика. 1981. №4. С.3-4. doi: 10.22364/mhd .
8. Вернигоров Ю.М. Научно-технологическая технология получения композиционных порошков в магнетовибрирующем слое // Научно-технологические проблемы машиностроения. 2019. № 5(95). С. 3-8. doi: 10.30987/article\_5ca303087c5a57.59333232.
9. Вернигоров Ю.М. Моделирование разрушения агрегатов высокоэрозионных дисперсных ферромагнетиков в магнитных полях различной топологии // Sciences of Europe. 2017. № 21-1(21). С. 43-46.
10. Вернигоров Ю.М. Соударение частиц компактного ферромагнитного материала в магнетовибрирующем слое // Вестник Донского государственного технического университета. 2012. Т. 12. № 1-1(62). С. 95-98.
11. Кочубей А.А. Технологическое обеспечение упрочняющей обработки деталей во вращающемся электромагнитном поле: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кочубей Анатолий Анатольевич. Ростов-на-Дону, 2017. 156 с.
12. Лебедев В.А. Особенности технологического процесса устройств помола ферромагнитных материалов на базе магнетовибрирующего слоя // Научно-технологические проблемы машиностроения. 2019. № 5(95). С. 3-8. doi: 10.30987/article\_5ca303087c5a57.59333232.
13. Мяздриков О.А. Электродинамическое псевдооживление // Межвуз. сб. научн. трудов ЛТИ им. Ленсовета. 1976. №1. С.3-13. ISBN 5-10-003174-3.
14. Плотников Д.М. Повышение качества изделий из порошковых материалов за счет использования магнетовибрационной технологии сепарации шлифовальных шламов подшипникового производства: специальность 05.16.06 "Порошковая металлургия и композиционные материалы": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Плотников Дмитрий Михайлович. Ростов-на-Дону, 2008. 129 с.
15. Ширин А.А. Энергетические условия, обеспечивающие формирование и устойчивый режим магнетовибрирующего слоя во вращающемся электромагнитном поле // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формирования и сборки изделий. Ростов-на-Дону, 22-26 сентября 2020 года. Ростов-на-Дону: Издательство Донского государственного технического университета, 2020. С. 338-342.
16. Егорова С.И. Научные основы и практические аспекты разработки технологий порошковой металлургии, основанных на использовании магнетовибрирующего слоя: специальность 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы»: дисс. на соискание ученой степени докт.-ра техн. наук / Егорова Светлана Ивановна; Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркас. политехн. ин-т). Ростов-на-Дону, 2009. 394 с.
17. Егоров И.Н. Разработка магнетовибрационной технологии помола порошков магнитных материалов, обеспечивающей заданный гранулометрический состав: специальность 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы»: дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Егоров Иван Николаевич. Ростов-на-Дону, 2006. 159 с.
18. Вернигоров Ю.М., Егоров И.Н., Егорова С.И. Эффективность применения электромагнитного поля при механическом измельчении порошков ферромагнитных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10. № 3(46). С.

## REFERENCES

1. Levin B.E. Physicochemical bases of production, properties and use of ferrites. M.: Metallurgia, 1979. 427 p.
2. Thomson J. Instability and disasters in science and technology. M.: Mir, 1985. 254 p.
3. Vernigorov Y.M. Simulation of destruction of ferromagnetic materials particles in magneto-vibrational layer // World Science Proceedings of articles the international scientific conference. 2017. Pp. 59-70. ISBN 978-5-00090-122-9.
4. Vernigorov Y.M. Magneto-vibrational technology of powder magnets production // Dissertation for the degree of D Eng. Rostov-on-Don. 1995. 369 p.
5. Babichev A.P. Operating modes of the SmCo5 powder fine grinding device // *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*. 2012. No. 6(296). pp. 64-70.
6. Bagaev V.N. On the theory of magnetostatic interaction and structure formation in dispersed media // *Magneto hydrodynamics*. 1986. No. 2. pp. 35-40. doi: 10.22364/mhd.
7. Bologa M.K. Some features of magnetic liquefaction of dispersed systems // *Magneto hydrodynamics*, 1981. No. 4. pp.3-4. doi: 10.22364/mhd.
8. Vernigorov Yu.M. Science intensive technology for manufacturing composite powders in a magnetic vibrating layer // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2019. No. 5(95). pp. 3-8. DOI 10.30987/article\_5ca303087cba57.59333232.
9. Vernigorov Yu.M. Modeling of aggregating destruction of hihgrational-dispersed ferromagnetics in magnetic fields of different topology. // *Sciences of Europe*. 2017. № 21-1(21). С. 43-46.
10. Vernigorov Yu.M. Collision of particles of a compact ferromagnetic material in a magnetic vibrating layer // *Vestnik of Don State Technical University*. 2012. vol. 12. No. 1-1(62). pp. 95-98.
11. Kochubey A.A. Technological support of hardening treatment of parts in a rotating electromagnetic field: specialty 05.02.08 "Technology of machine-building": Dr. Ph thesis / Kochubey Anatoly Anatolyevich. Rostov-on-Don, 2017. 156 p.
12. Lebedev V.A. Features of the technological process of devices for grinding ferromagnetic materials based on a magnetic vibrating layer // *Naukoemkie I Vibrovolnovie Tekhnologii Obrabotki Detaley Vysokotekhnologichnikh Izdeliy [High-tech and Vibro-wave Technologies for Processing Parts of High-tech Products]*. Rostov-on-Don, 2016. 26 p. ISBN: 978-5-7890-1570-4.
13. Myazdrikov O.A. Electrodynamic fluidization // Inter-university collection of scientific papers of LTI named after. Lensovet. 1976. No.1. pp.3-13. ISBN 5-10-003174-3.
14. Plotnikov D.M. Improving the quality of products made of powder materials through the use of magnetic vibration technology of separating grinding sludges for bearing production: specialty 05.16.06 "Powder metallurgy and composite materials": Dr. Ph thesis / Plotnikov Dmitry Mikhailovich. Rostov-on-Don, 2008. 129 p.
15. Shirin A.A. Energy conditions ensuring the formation and stable mode of a magnetic vibrating layer in a rotating electromagnetic field // *Fundamental principles of physics, chemistry and mechanics of science intensive technological systems of forming and assembling products*. Rostov-on-Don, September 22-26, 2020. Rostov-on-Don: Publishing House of Don State Technical University, 2020. pp. 338-342.
16. Egorova S.I. Scientific foundations and practical aspects of developing powder metallurgy technologies based on the use of a magnetic vibrating layer: specialty 05.16.06 "Powder metallurgy and composite materials": Dr. habil. thesis / Egorova Svetlana Ivanova; South Russian State Technical University (Novocherkas. polytech. in-t). Rostov-on-Don, 2009. 394 p.
17. Egorov I.N. Development of magnetic vibration technology for grinding powders of magnetic materials, providing a given granulometric composition: specialty 05.16.06 "Powder metallurgy and composite materials": Dr. Ph thesis / Egorov Ivan Nicolae-hiv. Rostov-on-Don, 2006. 159 p.
18. Vernigorov Yu.M., Egorov I.N., Egorova S.I. Efficiency of electromagnetic field application in mechanical grinding of ferromagnetic materials powders // *Bulletin of Don State Technical University*. 2010. Vol. 10. No. 3(46).

Ссылка для цитирования:

Лебедев, В.А. Энергетические аспекты измельчения ферромагнитных частиц шлифовального шлама во вращающемся электромагнитном поле / В.А. Лебедев, А.А. Ширин, Н.С. Коваль // *Транспортное машиностроение*. – 2022. – № 1-2. – С. 29 -39. doi: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-29-39.

### Информация об авторах:

**Лебедев Валерий Александрович**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, почетный работник высшего профессионального образования, тел. 8-951-

539-51-59, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 56336251300, Research- ID-Web of Science AAO-6578-2029, Author-ID-РИНЦ 730421.

**Ширин Андрей Александрович**, аспирант кафед-

ры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, тел. 8-928-212-71-94, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57290402300.

**Коваль Николай Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение и

**Lebedev Valeriy Aleksandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering at Don State Technical University, honorary worker of higher professional education, phone: 8-951-539-51-59, international identifications of the author: Scopus-Author ID 56336251300, Research- ID-Web of Science AAO-6578-2029, Author-ID-РИНЦ 730421.

**Shirin Andrey Aleksandrovich**, Postgraduate of the Department of Mechanical Engineering at Don State

биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета, тел. 8-904-506-68-17, международные идентификационные номера автора: Research-ID-Web of Science ABC-6197-2021.

Technical University, phone: 8-928-212-71-94, international identifications of the author: Scopus-Author ID 57290402300.

**Koval Nikolay Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Instrumentation and Biomedical Engineering at Don State Technical University, honorary worker of higher professional education, phone: 8-904-506-68-17, international identifications of the author: Research-ID-Web of Science ABC-6197-2021.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 22.09.2021; одобрена после рецензирования 22.11.2021; принята к публикации 15.01.2022. Рецензент – Соловьев Д.Л., доктор технических наук, профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 22.09.2021; approved after review on 22.11.2021; accepted for publication on 15.01.2022. The reviewer is Solovyov D.L., Doctor of Technical Sciences, Professor of Murom Branch (Institute) of Vladimir State University, member of the Editorial Board of the journal Transport Engineering.