

УДК 663.915

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ НАГРУЗОК В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНОАКТИВАТОРАХ

Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н., Котов А.В.

*ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»,
Санкт-Петербург, e-mail: mysnegana@mail.ru*

В статье представлены результаты теоретических исследований способа формирования силовых контактов в магнитоожигненном слое ферротел с оценкой энергетических затрат, необходимых для энергоэффективного диспергирования материала в электромагнитных механоактиваторах (ЭММА). Обосновано, что процесс измельчения осуществляется в результате взаимодействия намагничиваемых размольных элементов сферической формы в постоянном по знаку и регулируемом по величине электромагнитном поле. При этом разрушение частиц продукта происходит за счет их сдавливания и истирания между шарами, а также в результате ударного воздействия шаров в процессе работы устройства. Множество факторов, которыми в слое ферромагнитных размольных элементов можно воздействовать на продукт в нужном направлении, требует прежде всего знания физической сущности происходящих в рабочих объемах ЭММА явлений и основных их закономерностей. Сложные физико-механические процессы, имеющие место в слое ферромагнитных размольных элементов, недостаточно изучены, хотя способ уже нашел применение в различных отраслях промышленности. В статье обобщены результаты, полученные в области исследований энергетических закономерностей формирования ударно-истирающих нагрузок в рабочих объемах аппаратов с магнитоожигненным слоем размольных ферромагнитных элементов.

Ключевые слова: магнитоожигненный слой, диспергирующее усилие, энергетика процесса, магнитное поле, размольные элементы

ENERGY THEORY OF THE WAY OF FORMATION OF DISPERSING LOADS IN ELECTROMAGNETIC MECHANICAL ACTIVATOR

Bezzubtseva M.M., Volkov V.S., Obukhov K.N., Kotov A.V.

St.-Peterburg agrarian university, St.-Peterburg, e-mail: mysnegana@mail.ru

In the article are shown the the results of theoretical studies connecting with the way of formation of power contacts in the magnetic liquefied layer having ferromagnetic bodies with assessment of energy expenditure that is necessary for energy efficient dispersion of the material in electromagnetic mechanical activators. Justified that the grinding process is carried out by reacting of magnetized grinding elements having spherical shape in the electromagnetic field having a constant sign and adjustable value. Wherein the destruction of product particles occurs due to compression and erasing between the balls and as the result of the impact of balls during operation. There are many factors in the layer of ferromagnetic grinding elements that may have an impact on the product in the desired direction. The operating of this factors requires first of all the knowledge of the physical essence of phenomena occurring in the working volume of electromagnetic mechanical activators and their basic laws. The complex physical and mechanical processes in the layer of ferromagnetic grinding elements are insufficiently studied although the method has found application in various industries. The article provides a summary of the results which were obtained in the study of energy laws connecting with the formation of shock-abrasive loads in the working volume of machines with magnetic liquefied layer of grinding ferromagnetic elements.

Keywords: magnetic liquefied layer, dispersing force, energy of process, magnetic field, grinding elements

Диспергирующее усилие в электромагнитных механоактиваторах (ЭММА) формируется при силовом взаимодействии рабочих органов аппарата в магнитоожигненном слое, создаваемом в объеме обработки материала под действием электромагнитных и механических сил [6, 10, 11, 13, 14]. При прохождении через элементы ЭММА магнитного потока размольные тела организуются в различные структурные построения и создают магнитоожигненный слой, сцепляющий поверхности, ограничивающие объем обработки продукта [7, 9, 12]. При относительном смещении поверхностей структурные построения разрушаются. При этом мелющим телам сообщается кинетическая энергия движе-

ния в рабочем объеме аппарата. Процесс целенаправленной переориентации размольных элементов в структурных группах сопровождается созданием многоточечных контактных взаимодействий между ферроэлементами и частицами обрабатываемого продукта. Силовое воздействие проявляется как в виде усилий сжатия, так и ударно-истирающих нагрузок [1, 2, 3, 8]. Физико-математическое моделирование процесса формирования диспергирующих ударно-истирающих нагрузок между размольными ферроэлементами через прослойку перерабатываемого материала и анализ моделей априори способствует проектированию энергоэффективных ЭММА различного целевого назначения [4, 5].

Целью данной работы является теоретическое обоснование способа формирования ударно-истирающих нагрузок в магнитоожигенном слое ферротел ЭММА с разработкой физико-математической модели расчета энергетических затрат на ударное разрушение и статическое сжатие частиц обрабатываемого продукта.

Материалы и методы исследований

Предметом исследований является энергетика рабочего процесса формирования ударно-истирающих нагрузок в магнитоожигенном слое сферических размольных элементов ЭММА.

Результаты исследования и их обсуждение

Фундаментальная теория, положенная в основу математического моделирования величины силовых контактов между ферромагнитными элементами в фазах рабочего процесса (формирование, разрушение структурных групп из ферроэлементов, образование «слоя скольжения»), построена на развитии дипольной модели Максвелла [5, 7, 12, 14]. Исследовав и установив количественные параметры энергетического процесса, происходящего с одной структурной группой из феррошаров, и умножив полученный результат на количество структурных групп в объеме обработки продукта, можно определить энергетику всего рабочего процесса формирования диспергирующих нагрузок в ЭММА. При расчетах число цепочек из ферромагнитных размольных элементов определяем по фор-

муле $n_{ц} = \text{Entier} \left(N_{ш} \frac{d}{h_0} \right)$ (здесь $N_{ш}$ – количество размольных элементов сферической формы в рабочем объеме ЭММА; d – диаметр размольного элемента; h_0 – расстояние от статора до ротора).

При разработке линейной теории были сделаны следующие предположения: силы Fr и моменты Mv , действующие на намагничиваемый размольный элемент в рабочем объеме ЭММА, определены на основании развития дипольной модели Максвелла; диаметры размольных элементов много меньше ширины рабочего объема ($d \ll h_0$) и много больше частиц обрабатываемого материала ($d \gg r_{ч}$); структурные группы из размольных элементов до момента их разрушения при достижении критического угла наклона структурной группы из феррошаров $v_{кр}$ при переходе в фазу образования «слоя скольжения» не взаимодействуют между собой.

С учетом исходного размера частиц $r_{ч}$ силы Fr и моменты Mv , действующие на размольные элементы радиусом R_0 в магнитном поле с напряженностью H в рабочем объеме ЭММА, определены равенствами [1, 2, 5]:

$$Fr = \frac{1}{2} \frac{\mu - 1}{\mu + 2} R_0^3 \left. \frac{\partial H^2}{\partial r} \right|_{r=2R+r_{ч}}; \quad (1)$$

$$Mv = \frac{1}{2} \frac{\mu - 1}{\mu + 2} R_0^3 \left. \frac{\partial H^2}{\partial v} \right|_{r=2R+r_{ч}}. \quad (2)$$

Численное интегрирование дает следующие искомые выражения:

$$F_r = \frac{3}{356} H_0^2 R_0^2 \frac{(\mu - 1)^2}{(\mu + 2)^3} \left\{ -[(11 + 13\mu) + 9(5 + 3\mu) \cos 2v] + \frac{r_x}{2R_0} [(29 + 67\mu) + (171 - 117\mu) \cos 2v] \right\}; \quad (3)$$

$$M_v = \frac{3}{128} H_0^2 R_0^3 \frac{(\mu - 1)^2}{(\mu + 2)^3} \sin(2v) \left[-(31 + 17\mu) + \frac{r_{ч}}{R_0} (5 + 3\mu) \right]. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) сохранены только линейные относительно $r_{ч}/R_0$ члены [1]. Критический угол $v_{кр}$,

при котором притяжение шаров сменяется их отталкиванием, определен по формуле

$$v_{кр} = \frac{1}{2} \arccos \frac{11 + 13\mu}{9(5 + 3\mu)} \approx \frac{1}{2} \arccos \frac{13}{27} \approx \frac{\pi}{6}. \quad (5)$$

Половина всех размольных элементов сжимается в структурной группе с силой Fr_{\max} . Работа, которую совершает эта сила, вычислена по формуле

$$A_1 = \frac{N_{ш}}{2} \int_{r_{ч2}}^{r_{ч1}} Fr_{\max}(r_{ч}) dr_{ч}. \quad (6)$$

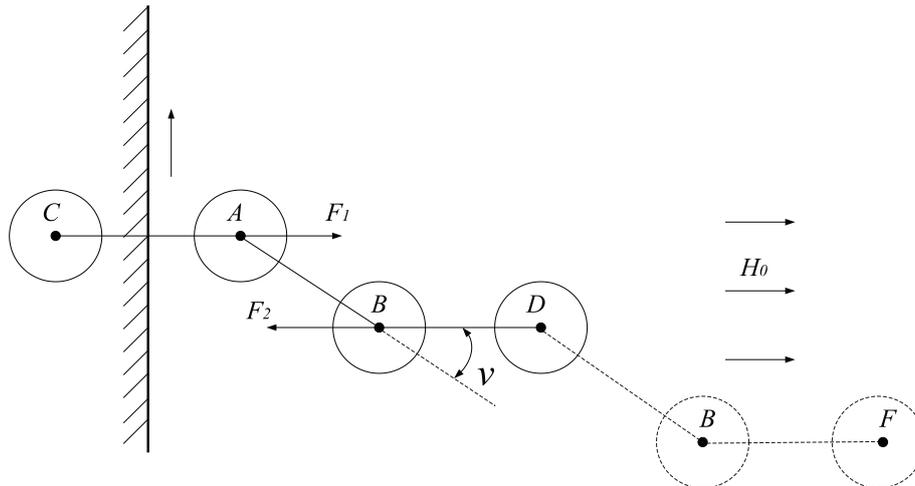


Рис. 1. Деформация структурной группы из размольных элементов в ЭММА.
Неравновесная структурная группа

Как это следует из рис. 2, на горизонтальных участках СА, ВД, ЕГ и т.д. сила сжатия максимальна. Формула для ее определения при $\nu_{кр} = 0$ имеет вид

$$Fr_{max} = \frac{3}{23} H_0^2 R_0^2 \frac{(\mu - 1)^2}{(\mu + 2)^2} \left[-(5\mu + 7) + \frac{r_{ч}}{2R_0} (23\mu + 25) \right]. \quad (7)$$

Интегрирование формулы (3) с учетом равенства (7) дает

$$A_1 = \frac{3}{64} H_0^2 R_0^2 \frac{(\mu - 2)^2}{(\mu + 2)^3} \frac{N_{ш}}{2} \left[(5\mu + 7)(r_{ч1} - r_{ч2}) - \frac{(23\mu + 25)}{4R_0} (r_{ч1}^2 - r_{ч2}^2) \right]. \quad (8)$$

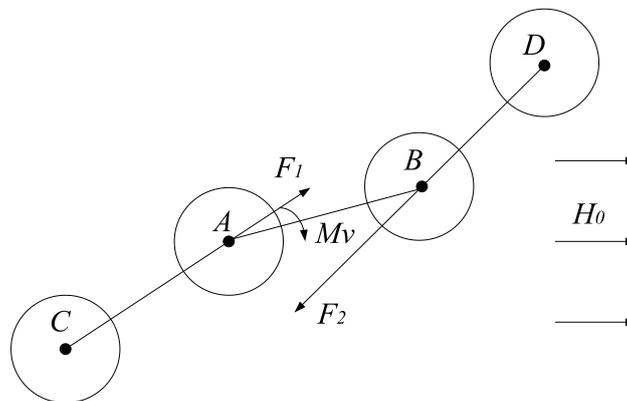


Рис. 2. Деформация структурной группы из размольных элементов в ЭММА.
Равновесная структурная группа

На участках АБ, ДЕ и т.д. угол наклона изменяется от 0 до $\nu_{кр}$. Поэтому на этих участках сила притяжения шаров также меняется. Для простоты учета работы силы сжатия на этих участках принимаем некоторую среднюю силу, действующую на этих участках и соответствующую значению угла $\nu_{кр}$:

$$F_r = H_0^2 R_0^2 \frac{(\mu - 1)^2}{(\mu + 2)^3} \left[-0,43(\mu + 1,37) + \frac{r_{ч}}{R_0} (\mu + 1) \right]. \quad (9)$$

Соответствующая этой силе работа определена формулой

$$A_2 = H_0^2 R_0^2 \frac{(\mu - 1)^2}{(\mu + 2)^3} \frac{N_{ш}}{2} \left[0,43(\mu + 1,37)(r_{q1} - r_{q2}) - \frac{1}{2R_0} (\mu + 1)(r_{q1}^2 - r_{q2}^2) \right]. \quad (10)$$

Таким образом, работа, затрачиваемая на измельчение продукта от исходного размера зерна r_{q1} до конечного размера r_{q2} статическим сжатием между шарами, равна: $A_{сж} = A_1 + A_2$. При разрушении структурной группы из феррошаров вся затраченная работа на изменение угла ν переходит в кинетическую энергию, которая расходуется на ударное разрушение продукта. Вращение объектов АВ, ДЕ и т.д. осуществляется за счет приложенного к ним момента $M\nu$, который вычисляется по формуле (4). В этой формуле

можно пренебречь отношением r_q/R_0 по сравнению с единицей:

$$M(\nu) = F(\nu)2R_0 \sin \nu - M_\nu(\nu). \quad (11)$$

Работа, затраченная на поворот $N_{об}/2$ объектов типа АВ на угол от 0 до $\pi/6$, определена равенством

$$A_{уп} = \frac{N_{об}}{2} \int_0^{\pi/6} |M(\nu)| d\nu. \quad (12)$$

Окончательная формула для вычисления работы ударного разрушения продукта имеет следующий вид:

$$A_{уп} = N_{об} H_0^2 R_0^3 \frac{(\mu - 1)^2 (0,002 \mu - 0,02)}{(\mu + 2)^3}. \quad (13)$$

Заключение

Физико-математическое моделирование процесса формирования диспергирующих ударно-стирающих нагрузок между размольными ферроэлементами в структурных группах через прослойку перерабатываемого материала и анализ моделей способствует повышению энергоэффективности проектируемых ЭММА различного целевого назначения.

Список литературы

1. Беззубцева М.М. Исследование процесса измельчения какао бобов в электромагнитных механоактиваторах // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 3. – С. 171.
2. Беззубцева М.М. Исследование процесса диспергирования продуктов шоколадного производства с использованием электромагнитного способа механоактивации // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 5–2. – С. 78–79.
3. Беззубцева М.М., Волков В.С. Обеспечение условий управления процессом измельчения продуктов в электромагнитных механоактиваторах (ЭММА) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 7. – С. 93–94.
4. Беззубцева М.М., Волков В.С. Рекомендации по проектированию электромагнитных механоактиваторов // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 5–2. – С. 128–129.
5. Беззубцева М.М., Волков В.С. К вопросу расчета энергетики рабочего процесса в электромагнитных механоактиваторах (ЭММА) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 7. – С. 129–130.
6. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование физико-механических процессов в магнитоожигенном слое

феррочастиц // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 1–1. – С. 13–17.

7. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование физико-механических процессов в дисковом электромагнитном механоактиваторе (ЭДМА) // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 12–1. – С. 116.

8. Беззубцева М.М., Волков В.С. Механоактиваторы агропромышленного комплекса. Анализ, инновации, изобретения // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 5–1. – С. 182.

9. Беззубцева М.М., Волков В.С., Прибытков П.С. Энергетика электромагнитных процессов переработки сельскохозяйственной продукции // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2007. – № 5. – С. 183–184.

10. Беззубцева М.М., Волков В.С., Котов А.В., Обухов К.Н. Определение сил и моментов, действующих на систему ферромагнитных размольных элементов цилиндрической формы в магнитоожигенном слое рабочего объема электромагнитных механоактиваторов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–3. – С. 504–508.

11. Беззубцева М.М., Ружьев В.А., Волков В.С. Теоретические исследования деформированного магнитного поля в рабочем объеме электромагнитных механоактиваторов с магнитоожигенным слоем размольных элементов цилиндрической формы // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6–4. – С. 689–693.

12. Беззубцева М.М., Ружьев В.А., Загаевски Н.Н. Формирование диспергирующих нагрузок в магнитоожигенном слое электромагнитных механоактиваторов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 10. – С. 78–80.

13. Пуговкин П.Р., Беззубцева М.М. Модель образования сцепляющего усилия в ЭПМ // Известия высших учебных заведений // Электромеханика. – 1987. – № 10. – С. 91.

14. Bezzubceva M.M., Ruzhyev V.A., Yuldashev R.Z. Electromagnetic mechanoactivation of dry construction mixes. International Journal of Applied And Fundamental Research. – 2013. – № 2 – URL: www.science-sd.com/455-24165 (16.11.2013).

References

1. Bezzubceva M.M. Issledovanie processa izmel'chenija kakao bobov v jelektronnym mehanooaktivatorah // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2014. no. 3. pp. 171.
2. Bezzubceva M.M. Issledovanie processa dispergirivaniya produktov shokoladnogo proizvodstva s ispol'zovaniem jelektronnogo spozoba mehanooaktivacii // Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovaniya. 2014. no. 5–2. pp. 78–79.
3. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Obespechenie uslovij upravleniya processom izmel'cheniya produktov v jelektronnym mehanooaktivatorah (JeMMA) // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy. 2012. no. 7. pp. 93–94.
4. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Rekomendacii po proektirovaniyu jelektronnym mehanooaktivatorov // Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovaniya. 2014. no. 5–2. pp. 128–129.
5. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. K voprosu rascheta jenergetiki rabocheho processa v jelektronnym mehanooaktivatorah (JeMMA) // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy. 2012. no. 7. pp. 129–130.
6. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Issledovanie fiziko-mehaničeskikh processov v magnitoozhizhennom sloe ferromagnitnom // Fundamental'nye issledovaniya. 2014. no. 1–1. pp. 13–17.
7. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Issledovanie fiziko-mehaničeskikh processov v diskovom jelektronnym mehanooaktivatore (JeDMA) // Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovaniya. 2012. no. 12–1. pp. 116.
8. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Mehanooaktivatory agropromyshlennogo kompleksa. Analiz, innovacii, izobreteniya // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2014. no. 5–1. pp. 182.
9. Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Pribytkov P.S. Jenergetika jelektronnym mehanooaktivatorom // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2007. no. 5. pp. 183–184.
10. Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Kotov A.V., Obuhov K.N. Opredelenie sil i momentov, dejstvujushchih na sistemu ferromagnitnyh razmol'nyh jelementov cilindricheskoj formy v magnitoozhizhennom sloe rabocheho ob'ema jelektronnym mehanooaktivatorov // Fundamental'nye issledovaniya. no. 11 3, 2014. pp. 504–508.
11. Bezzubceva M.M., Ruzh'ev V.A., Volkov V.S. Teoreticheskie issledovaniya deformirovannogo magnitnogo polja v rabochem ob'eme jelektronnym mehanooaktivatorov s magnitoozhizhennym sloem razmol'nyh jelementov cilindricheskoj formy // Fundamental'nye issledovaniya. 2014. no. 6–4. pp. 689–693.
12. Bezzubceva M.M., Ruzh'ev V.A., Zagaevski N.N. Formirovanie dispergirujushchih nagruzok v magnitoozhizhennom sloe jelektronnym mehanooaktivatorov // Sovremennyye naukojomkie tehnologii. 2014. no. 10. pp. 78–80.
13. Pugovkin P.R., Bezzubceva M.M. Model' obrazovaniya scepplajushhego usilija v JePM // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektromehanika, 1987. no. 10. pp. 91.
14. Bezzubceva M.M., Ruzh'ev V.A., Yuldashev R.Z. Electromagnetic mechanoactivation of dry construction mixes. International Journal of Applied And Fundamental Research. 2013. no. 2 URL: www.science-sd.com/455-24165 (16.11.2013)

Рецензенты:

Салова Т.Ю., д.т.н., профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий» ИТССЭ, руководитель ведущей научной и научно-педагогической школы СПб «Системы, узлы и агрегаты двигателей», г. Санкт-Петербург;

Карпов В.Н., д.т.н., профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и электротехнологии» СПбГАУ, руководитель ведущей научной и научно-педагогической школы СПб «Эффективное использование энергии», г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 19.12.2014.