

УДК 663.915

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТООЖИЖЕННОМ СЛОЕ ФЕРРОЧАСТИЦ

**Беззубцева М.М., Волков В.С.**

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

В статье представлены результаты исследований эффективности работы аппаратов с магнитоожигенным слоем (электромагнитных механоактиваторов, электромагнитных приборов контроля загрязненности технологических сред металлосодержащими примесями, электромагнитных мешалок и т.д.). Рассмотрены физико-механические процессы в магнитоожигенном слое из феррочастиц сферической формы при формировании сцепляющего (или диспергирующего) усилия. В результате исследований движения ферромагнитных частиц сферической формы в постоянном электромагнитном поле при относительном смещении цилиндрических поверхностей рабочего объема аппаратов получена математическая модель, описывающая динамику рабочего процесса формирования сцепляющего (или диспергирующего) усилия. На основании анализа решений дифференциальных уравнений Лагранжа II рода, составленных с учетом физических аспектов создания силовых контактов в магнитоожигенном слое из ферротел, определены принципы конструктивного оформления аппаратов для электромагнитного измельчения, механической активации, перемешивания и контроля загрязненности технологических сред.

**Ключевые слова:** магнитоожигенный слой, диспергирующее усилие, коэффициент трения, угол деформации

## RESEARCH OF PHYSICO-MECHANICAL PROCESSES IN MAGNETIC LIQUEFIED LAYER OF FERROPARTICLES

**Bezzubceva M.M., Volkov V.S.**

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

This article presents the results of researches detecting the effectiveness of work of apparatus with magnetic liquefied layer (electromagnetic mechanical activators, electromagnetic devices monitoring contamination by metal-containing impurities in technological environments, electromagnetic mixers etc.). There were considered physico-mechanical processes in magnetic liquefied layer containing metallic particles characterized by spherical form when forming concatenating (dispersing) force. We have researches concerning the motion of metallic particles characterized by spherical form within the permanent electromagnetic field when relative displacing of cylindrical surfaces of the apparatus working volume. As a result of aforesaid researches is presented the mathematical model describing the dynamics of working process when forming concatenating (dispersing) force. The analysis of decisions Lagrange equations of the second kind (which were compiled based on the physical aspects of creation power contacts in magnetic liquefied layer containing of ferromagnetic solids) led to the defining principles of constructive design of devices electromagnetic grinding, mechanical activation, mixing, contamination control in technological environments.

**Keywords:** magnetic liquefied layer, dispersing force, friction coefficient, angle of deformation

Сцепляющее (или диспергирующее) усилие в аппаратах с магнитоожигенным слоем ферротел (электромагнитных механоактиваторов, приборов контроля загрязненности технологических сред ферропримесями, электромагнитных мешалок и т.д.) [1, ..., 6] создается с использованием двух потоков энергии: энергии постоянно по знаку и регулируемого по величине электромагнитного поля, а также энергии, поступающей от приводного электродвигателя. Использование двух потоков энергии позволяет осуществлять тонкое и надежное управление величиной силовых взаимодействий между ферромагнитными рабочими элементами в процессе их переориентации в структурных группах [7, 8, 9]. Множество факторов, которыми в магнитоожигенном слое ферротел можно воздействовать на продукт в нужном направлении, требует, прежде всего, знания физической сущности происходящих в рабочих объемах явлений и их основных закономерностей.

**Цель работы** – исследование эффективности работы аппаратов с магнитоожигенным слоем на основании анализа динамики рабочего процесса деформации и разрушения структурной группы из ферромагнитных элементов сферической формы при формировании сцепляющего (или диспергирующего) усилия.

### Материалы и методы исследований

Предметом исследований являются физико-механические процессы в магнитоожигенном слое феррочастиц сферической формы при формировании сцепляющего (или диспергирующего) усилия.

### Результаты исследования и их обсуждение

При рассмотрении задачи о движении цепочки из металлических шаров в радиальном магнитном поле рабочих объемов аппаратов с магнитоожигенным слоем различного целевого назначения [1, ..., 6] принимаем во внимание, что диаметр внутреннего вращающегося электрода  $R$  велик

по сравнению с диаметром  $R_0$  размоленных шаров. Эту задачу в первом приближении можно заменить задачей о движении структурной группы шаров в однородном поле (рис. 1). Ошибка от такой замены имеет порядок  $\left(\frac{R_0}{R}\right)^3$ .

Для описания движения цепочки шаров примем следующие обобщенные координаты:  $x$  – абсцисса центра 0-го шара;  $\varphi_0$  – угол поворота 0-го шара;  $v_i$  – угол, который составляет линия, соединяющая центры  $i-1$  и  $i$ -го шаров с осью ординат;  $\varphi_i$  – угол поворота  $i$ -го шара.

В задаче рассматривается  $n+1$  число шаров, причем,  $i$ -й и  $i+1$  ( $i=0, \dots, n$ ) касаются друг друга.

Условием разрыва цепочки шаров является достижение какого-либо угла  $v$  значения  $\pm v_{кр}$ , которое определяется формулой [7, 9]

$$v_{кр} = \pm \frac{1}{2} \left( \pi - \arccos \frac{13\mu + 11}{9(3\mu + 5)} \right), \quad (1)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость размоленных шаров.

В этот момент сила давления между шарами обращается в ноль.

Момент инерции шара относительно оси, проходящей через его центр, равен:

$$J = \frac{2}{5} m R_0^2, \quad (2)$$

где  $m$  – масса шара.

$$v_{0к}^2 = \left( \dot{x} + 2R_0 \sum_{i=1}^k \dot{v}_i \cos v_i \right)^2 + \left( 2R_0 \sum_{i=1}^n \dot{v}_i \sin v_i \right)^2$$

или

$$v_{ок}^2 = \dot{x}^2 + 4R_0 \dot{x} \sum_{i=1}^k \dot{v}_i \cos v_i + 4R_0^2 \sum_{i,j=1}^k \dot{v}_i \cdot \dot{v}_j \cos(v_i - v_j). \quad (4)$$

Таким образом, кинетическая энергия системы из  $k$  шаров определяется следующей рекуррентной формулой:

$$T_k = T_{k-1} + \frac{m}{2} \left[ \dot{x}^2 + 4R_0 \dot{x} \sum_{i=1}^k \dot{v}_i \cos v_i + 4R_0^2 \sum_{i,j=1}^k \dot{v}_i \dot{v}_j \cos(v_i - v_j) \right] + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}_k^2, \quad (5)$$

где  $T_{k-1}$  – кинетическая энергия системы  $k-1$  шаров.

Для шара, расположенного в основании структурной группы, т.е. у поверхности стенки рабочего объема, кинетическая энергия  $T_0$  равна:

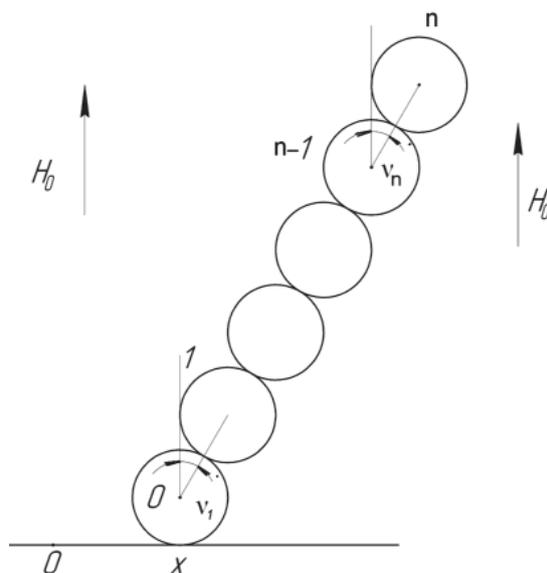


Рис. 1. Схема движения структурных групп из ферромагнитных шаров в однородном магнитном поле

Из рис. 1 следует, что координаты  $k$ -го шара определяются уравнениями

$$\begin{aligned} X_{OK} &= x + 2R_0 \sum_{i=1}^K \sin v_i; \\ Y_{OK} &= R + 2x_0 \sum_{i=1}^K \cos v_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Скорость центра  $k$ -го шара  $v_{ок}$  с учетом уравнений (3) описывается следующим выражением:

$$T_0 = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}_0^2. \quad (6)$$

Для рассматриваемой системы выражение для элементарной работы  $\delta A_K$  имеет вид:

$$\delta A_K = \delta A_{K-1} + M(v_K) \delta v_K + f R_0 F(v_K) (\delta \varphi_{K-1} - \delta \varphi_K), \quad (7)$$

где  $\delta A_{k-1}$  – элементарная работа системы шаров  $k-1$ ;  $M(v_k)$  и  $F(v_k)$  – соответственно силы и момент сил взаимодействия одно-

родного магнитного поля с системой шаров. Их значения определяются формулами 8 и 9 соответственно:

$$F_r = -\frac{3}{256} H_0^2 R_0^2 \frac{(\mu-1)^2}{(\mu+2)^3} [(13\mu+11)+9(3\mu+5) \cos 2v]; \quad (8)$$

$$M_v = -\frac{3}{128} H_0^2 R_0^3 \frac{(\mu-1)^2}{(\mu+2)^3} (17\mu+31) \sin 2v; \quad (9)$$

$f$  – коэффициент трения 0-го шара о стенку рабочего объема; где

$$|F(0)| = \frac{3}{32} H_0^2 R_0^2 \frac{(\mu-1)^2}{(\mu+2)^3} (5\mu+7).$$

Для составления уравнений движения структурной группы из феррошаров в рабочем объеме ЭММА воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (10)$$

где  $q_i$  – обобщенные координаты;  $Q_i$  – обобщенные силы.

Анализ уравнения Лагранжа второго рода для рассматриваемой задачи показывает, что уравнения распадаются на две группы. К первой группе относятся уравнения, в которые входят только переменные  $x$ ,  $v$  и их производные, а во вторую группу все остальные уравнения. Для решения поставленной задачи интерес представляют только уравнения первой группы. Эти уравнения можно получить, если в выражениях для кинетической энергии (5) и элементарной работы (6) и (7) положить все  $\varphi_i = 0$ .

Итак, рассмотрим цепочку, состоящую из двух шаров в однородном магнитном поле, и составим дифференциальные уравнения движения этой цепочки.

Для рассматриваемого случая из уравнений (5) и (7) получим:

$$T^* = m \left[ \dot{x}^2 + 2r \dot{x} \dot{v} \cos v + 2r^2 \dot{v}^2 \right]; \quad (11)$$

$$\delta A^* = f_0 (a+b) \delta x - c \cdot \sin 2v \cdot \delta v, \quad (12)$$

$$\ddot{v} = -\frac{1}{2r(2-\cos^2 v)} \left[ \left( r\dot{v}^2 + \frac{c}{rm} \right) \sin 2v + \frac{f(a+b)}{m} \right]. \quad (14)$$

Уравнение (14) можно представить в виде следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{v}_1 &= \dot{v}_2 \\ \dot{v}_2 &= -\frac{1}{2r(1+\sin^2 v_1)} \left[ \left( r\dot{v}_2^2 + \frac{c}{rm} \right) \sin 2v_1 + \frac{f+(a+b)}{m} \right] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

с начальными условиями  $v_1(0) = 0$  и  $v_2(0) = 0$ .

$$a+b = \frac{3}{32} H_0^2 R_0^2 \frac{(\mu-1)^2}{(\mu+2)^3} (5\mu+7);$$

$$c = \frac{3}{128} H_0^2 R_0^3 \frac{(\mu-1)^2}{(\mu+2)^3} (17\mu+31).$$

Тогда уравнения Лагранжа второго рода примут следующий вид:

$$\frac{\partial T^*}{\partial \dot{x}} = 2m(\dot{x} + rv \cos v);$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial \dot{v}} = 2r m (\dot{x} \cos v + 2rv);$$

$$\frac{dT^*}{dt} \frac{\partial^*}{\partial x} = 2m(\dot{x} + r\dot{v} \cos v - rv^2 \sin v);$$

$$\frac{dT^*}{dt} \frac{\partial^*}{\partial \dot{v}} = 2r m (\ddot{x} \cos v - \dot{x} \dot{v} \sin v + 2r\ddot{v});$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial v} = -2rm \dot{x} v \sin v.$$

Отсюда дифференциальные уравнения движения цепочки определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} + r\dot{v} \cos v - r\dot{v}^2 \sin v &= \frac{1}{2m} f(a+b); \\ \dot{x} \cos v + 2r\dot{v} &= -\frac{c}{2rm} \sin 2v. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Исключая из уравнения (13)  $\dot{x}$ , получим:

Численное интегрирование системы (15) осуществлялось с использованием ПК с помощью метода Runge-cutt с постоянным выбором шага интегрирования. Из всего многообразия полученных данных для различных сочетаний входных параметров наибольший интерес представляют результаты, представленные на рис. 2.

Установлено, что решающее значение на процесс разрушения структурной комбинации из ферротел сферической формы оказывает параметр  $f=f_0$  (здесь  $f_0$  – коэффициент трения 0-го шара о стенку рабочей емкости).

При значениях  $f_0 < 0,8$  линии, описывающие изменение угла деформации  $\nu$  цепочки и критического угла ее наклона  $\nu_{кр}$ , при котором сила взаимодействия между шарами равна 0, не пересекаются. То есть для данных условий деформации не достигается равенство  $\nu = \nu_{кр}$ , и цепочка из ферротел не подвергается разрушению. Визуальными наблюдениями на макетах аппаратов с магнитоожженным слоем (с открытыми для наблюдений рабочими объемами) установлено, что «слой скольжения» в рассматриваемых случаях смещается в основания структурных построений и организуется между стенками рабочей емкости и смежными с ними шарами структуры.

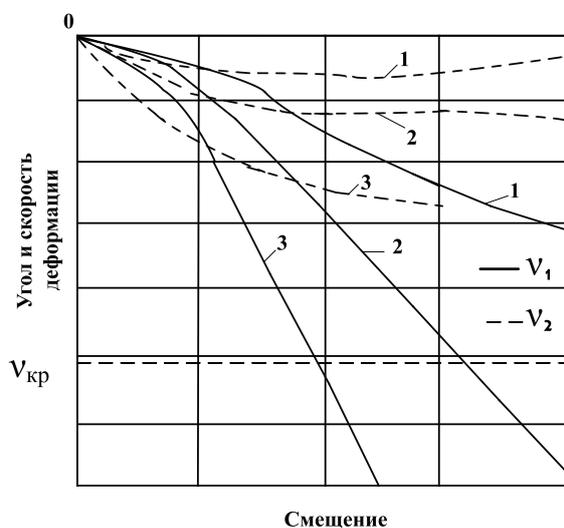


Рис. 2. Анализ деформации и разрушения структурной группы из ферромагнитных размольных элементов сферической формы в рабочем объеме аппаратов с магнитоожженным слоем:  
1 –  $f_0 < 0,8$ ; 2 –  $f_0 = 0,8$ ; 3 –  $f_0 > 0,8$

Представленные на рис. 2 данные свидетельствуют, что при  $f \geq 1$  угол  $\nu$  в процессе деформирования цепочки достигает своего критического значения  $\nu = \nu_{кр}$ , что обуславливает ее разрушение. Причём бо-

лее динамичное разрушение осуществляется при больших значениях коэффициента трения между шарами, расположенными в основании структуры, со стенками рабочего объема исследуемых аппаратов с магнитоожженным слоем.

### Заключение

В результате исследований движения мелющих тел в постоянном по знаку электромагнитном поле при относительном смещении поверхностей рабочего объема получена математическая модель, описывающая динамику рабочего процесса формирования сцепляющего (или диспергирующего) усилия. На основании анализа решений дифференциальных уравнений Лагранжа II рода, составленных с учетом физических аспектов создания силовых контактов в слое ферротел, определены принципы конструктивного исполнения аппаратов. Из изложенного следует, что одним из основных условий эффективной работы аппаратов с магнитоожженным слоем является создание устойчивых оснований структурных построений из феррочастиц. Это достигается за счет увеличения коэффициента трения  $f_0$  между внутренним электродом аппаратов и феррочастицами в основании структурных построений. Устройство ребер, рифлений и т.д. на смещающихся друг относительно друга поверхностях рабочего объема [2] обеспечивает жесткое сцепление оснований структурных групп с этими поверхностями и способствует организации «слоя скольжения» в средней части рабочего объема. Целенаправленная и регулируемая переориентация ферроэлементов в средней части магнитоожженного слоя с образованием «слоя скольжения» обеспечивает заданные условиями производства силовые и энергетические условия проведения технологических процессов [3, 4, 9, 10].

### Список литературы

1. Беззубцева М.М., Волков В.С., Зубков В.В. Исследование аппаратов с магнитоожженным слоем // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 6–2. – С. 258–262.
2. Беззубцева М.М. Энергоэффективный способ электромагнитной механоактивации // *Международный журнал экспериментального образования*. – 2012. – № 5. – С. 92–93.
3. Беззубцева М.М., Волков В.С. Электромагнитные мешалки. – Saarbrücken GmbH: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 141 с.
4. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование энергоэффективности дискового электромагнитного механоактиватора путем анализа кинетических и энергетических закономерностей // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10 (часть 9). – С. 1899–1903.
5. Беззубцева М.М., Волков В.С., Губарев В.Н. Способ диагностики загрязненности технологических сред ферропримесями // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2014. – № 1. – С. 60–62.

6. Беззубцева М.М., Волков В.С. Активатор для тонкого измельчения материалов // Инновационные технологии механизации, автоматизации и технического обслуживания в АПК. Сборник материалов Международной научно-практической интернет – конференции. – Орел: Орел ГАУ, 2008. – С. 122–126.

7. Беззубцева М.М., Волков В.С. Прикладная теория способа электромагнитной механоактивации // Известия Международной академии аграрного образования. – 2013. – № 16. – Т/3. – С. 93–96.

8. Беззубцева М.М., Мазин Д.А., Зубков В.В. Исследование коэффициента объемного заполнения ферромагнитной составляющей в аппаратах с магнитооживленным слоем // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2011. – № 23. – С. 371–376.

9. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование режимов работы электромагнитных механоактиваторов // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 8. – С. 109–110.

10. Беззубцева М.М., Волков В.С. Теоретические исследования электромагнитного способа механоактивации // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 5. – С. 72–74.

### References

1. Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Zubkov V.V. Issledovanie apparatov s magnitoozhivlennym sloem. Fundamental'nye issledovaniya. 2013. no. 6–2. pp. 258–262.

2. Bezzubceva M.M. Jenergojefektivnyj sposob jelektromagnitnoj mehanoaktivacii. Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovaniya. 2012. no. 5. pp. 92–93.

3. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Jelektromagnitnye meshalki. – Saarbrucken GmbH: Palmarium Academic Publishing, 2013. 141 p.

4. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Issledovanie jenergojefektivnosti diskovogo jelektromagnitnogo mehanoaktivatora putem analiza kineticheskikh i jenergeticheskikh zakonomernostej. Fundamental'nye issledovaniya. 2013. no. 10 (chast' 9). pp. 1899–1903.

5. Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Gubarev V.N. Spособ diagnostiki zagrjaznennosti tehnologicheskikh sred ferropriimesjami. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2014. no. 1. pp. 60–62.

6. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Aktivator dlja tonkogo izmel'chenija materialov. Innovacionnye tehnologii mehanizacii, avtomatizacii i tehničeskogo obsluzhivaniya v APK. Sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj internet – konferencii. Orel: Orel GAU, 2008. pp. 122–126.

7. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Prikladnaja teorija sposoba jelektromagnitnoj mehanoaktivacii. Izvestija Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya. 2013. no. 16. Tom 3. pp. 93–96.

8. Bezzubceva M.M., Mazin D.A., Zubkov V.V. Issledovanie koeficienta obiemnogo zapolnenija ferromagnitnoj sostavl'jajushhej v apparatah s magnitoozhivlennym sloem. Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2011. no. 23. P. 371–376.

9. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Issledovanie rezhimov raboty jelektromagnitnyh mehanoaktivatorov. Uspехи sovremenno estestvoznaniya. 2012. no. 8. pp. 109–110.

10. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Teoreticheskie issledovaniya jelektromagnitnogo sposoba mehanoaktivacii. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2012. no. 5. P. 72–74.

### Рецензенты:

Карпов В.Н., д.т.н., профессор Института технических систем, сервиса и энергетики, заслуженный деятель науки и образования России, г. Санкт-Петербург;

Ракутько С.А., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией энергоэффективных электротехнологий, ГНУ СЗ НИИМЭСХ, г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 21.01.2014.