

В. А. Лебедев, канд. техн. наук, проф.,
Ю. М. Вернигорov, д-р. техн. наук, проф.
А. А. Кочубей, аспирант.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону Россия.
8-905-426-14-55, *watchbox@mail.ru*

СУЩНОСТЬ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ГРАНУЛИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Раскрыта сущность устройств с вращающимся электромагнитным полем, области их применения, и предпосылки использования их для отделочно-упрочняющей обработки деталей. Определены основные закономерности движения ферромагнитных частиц во вращающемся электромагнитном поле.

Ключевые слова: *магнитоожигенный вращающийся слой, вращающееся электромагнитное поле, ферромагнитные частицы, отделочно-упрочняющая обработка.*

V. Lebedev, Iu. Vernigorov, A. Kochubey

ESSENCE AND REGULARITIES OF DYNAMICS OF PROCESSING THE FERROMAGNETIC GRANULATED ENVIRONMENTS IN THE ROTATING ELECTROMAGNETIC FIELD

The essence of the device with a rotating electromagnetic field, areas of their application, and prerequisites of their use for finishing-strengthening processing of details. The basic pattern of motion of ferromagnetic particles in a rotating electromagnetic field.

Keywords: *magnetic liquefied layer rotating, rotating electromagnetic field, ferromagnetic particles, finishing and hardening processing.*

1. Введение

В работе [1] показано, что если ферромагнитные неравноосные частицы поместить во вращающееся электромагнитное поле достаточной напряженности, то они приходят в сложное, хаотичное движение, создавая своеобразный магнитоожигенный вращающийся (МОВ) слой. Для создания и практического использования МОВ слоя ферромагнитных свободнодвижущихся частиц последние, загружают в устройство, создающее вращающееся электромагнитное поле (ВЭМП).

Основой этих устройств (рис. 1) является индуктор 2, помещенный в корпус 1. Индуктор представляет собой видоизмененный статор асинхронного электродвигателя. В расточку статора устанавливается цилиндрическая труба 3 из немагнитного материала, внутренняя поверхность которой ограничивает рабочую зону устройства. Для повышения стойкости рабочей зоны трубы в нее вставляют сменную вставку 5, которую заменяют по мере износа. Устройства могут быть выполнены с водяным и воздушным охлаждением. Создание в устройствах под воздействием вращающегося электромагнитного поля МОВ слоя, позволяют интенсифицировать целый ряд технологических процессов за счет комплексного протекания в рабочей зоне физико-химических эффектов таких как перемешивание и диспергирование, акустические и электромагнитные явления, трение, высокие локальные давления, электролиз и ударно-импульсные взаимодействия. Благодаря своей относительно несложной конструкции устройства с ВЭМП получили достаточно широкое применение в технологических процессах переработки отходов гальванических, нефтеперерабатывающих производств, переработки

отходов животноводства, в порошковой металлургии, на нефтеперерабатывающих заводах, на производствах красок и полимеров, в строительстве и прочее.

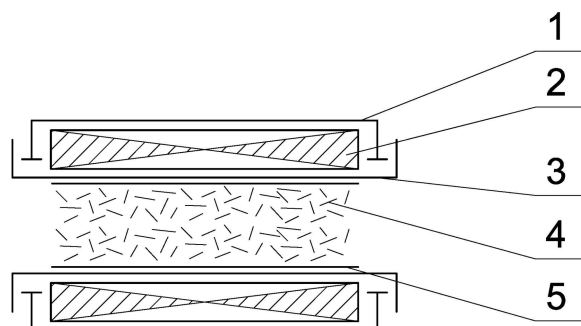


Рис.1 Схема устройства с вращающимся электромагнитным полем

В этой связи представляет интерес использование вращающегося электромагнитного поля, для повышения эффективности технологических переделов изготовления деталей. На основе проведённых предварительных экспериментальных исследований в работе [2] показано, что хаотичное движение частиц во вращающемся электромагнитном поле, приводит к большому количеству столкновений между частицами, частиц с обрабатываемыми изделиями сопровождающихся как прямыми, так и скользящим ударами. Число таких соударений достигает на каждую частицу 10^3 – 10^4 в секунду. В результате ударно-импульсного соударения происходит локальная упруго-пластическая деформация поверхности изделий, находящихся в рабочей зоне устройства. Таким образом, можно сделать вывод: устройства с ВЭМП можно вполне успешно применять для отделочно-зачистной обработки и упрочнения поверхностного слоя деталей.

С целью обоснования технологических возможностей обработки деталей в условиях ВЭМП проведём анализ исследований основных закономерностей динамики МОВ слоя.

2. Закономерности движения ферромагнитных частиц в условиях вращающегося электромагнитного поля

Энергетическое состояние обрабатывающей среды, помещённой во вращающееся магнитное поле, определяется динамическими характеристиками частиц. Под воздействием вращательного электромагнитного поля ферромагнитные частицы совершают сложное движение — поступательное с частым и резким изменением скорости и направления и вращательное с переменной угловой скоростью. В результате чего в зоне действия вращательного электромагнитного поля частицы формируют магнитооживленный вращающийся слой, который обеспечивает реализацию ряда технологических процессов, отмеченных ранее.

Экспериментально установлено [1], что движение ферромагнитных частиц начинается при достижении индукции в рабочей зоне не менее 0,08 Т. Характер движения частиц зависит от многих факторов — скорости вращения и напряженности магнитного поля, создаваемого индуктором, массы, формы, размеров и магнитных свойств частиц, вязкости среды и др. Мелкие частицы, намагничиваясь, притягиваются друг к другу и образуют цепочки, вытянутые в направлении вектора напряженности магнитного поля и вращающиеся за полем вокруг общей оси. Ввиду неуравновешенности слоя

цепочки существуют доли секунды, разрушаясь при столкновении друг с другом и группируясь вновь (Рис.1а). Крупные цилиндрические частицы, как правило, цепочек не образуют, каждая из них движется отдельно от других (Рис 1б).

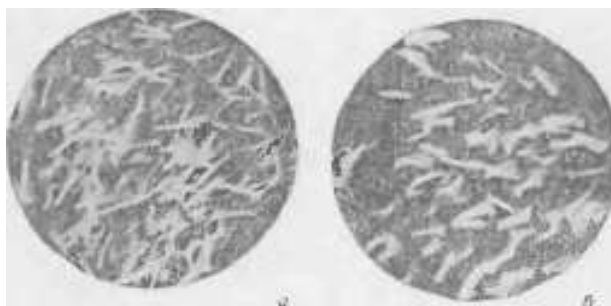


Рис. 1. Характер движения ферромагнитных частиц в слое:
а- образование цепочек; б-вращательное движение отдельных частиц

На рис. 2 показана траектория движения центра тяжести одной частицы за 0,5 с, определенная путем скоростной киносъемки.

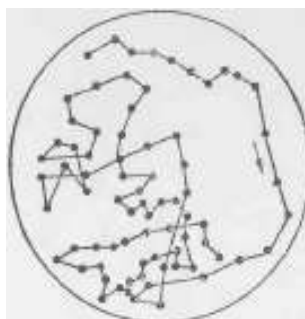


Рис. 2. Траектория движения стальной сферической частицы во вращающемся магнитном поле за 0,5 с.

Статистическая обработка большого количества экспериментальных данных позволила выявить, что радиальная и тангенциальная составляющие скорости движения ферромагнитной частицы подчинены нормальному закону распределения. Направление вектора радиальной составляющей скорости частицы равновероятно, тангенциальная составляющая скорости преимущественно направлена в сторону вращения поля, т. е. имеет место вращение всего слоя в целом.

Исходная система уравнений движения намагниченной частицы во вращающемся магнитном поле имеет вид [3]:

$$I \frac{d\vec{\omega}}{dt} = [\vec{P}, \vec{H}]; \frac{d\vec{P}}{dt} = [\vec{\omega}, \vec{P}]; \vec{\omega}(0) = \vec{\omega}_0; \vec{P}(0) = \vec{P}_0, \quad (1)$$

где I - момент инерции сферической частицы относительно главной оси, $\vec{\omega}$ - угловая скорость частицы, \vec{P} - ее магнитный момент, H - напряженность магнитного поля, $\vec{\omega}_0$ и \vec{P}_0 - начальные скорость и ориентация магнитного момента частицы, t - время.

Траектория частицы помещённой в переменное поле с параметрами

$$H_x = H_0 \cos \Omega t, \quad H_y = H_0 \sin \Omega t, \quad H_z = 0,$$

определяется решением уравнения (1). В работе [4] предложено решение линеаризиро-

ванного уравнения вращательного движения для малых углов поворота магнитомягкой частицы во вращающемся магнитном поле. Для его решения использован подход, основанный на следующих допущениях:

- из рассмотрения исключаются диссипативные силы;
- магнитное взаимодействие между частицами отсутствует, и столкновение их является абсолютно упругим;
- основываясь на положении об изотропном распределении магнитных моментов частиц пренебрегается силовым моментом со стороны окружающих частиц; в уравнении вращательного движения учитывается только силовой момент внешнего поля и момент диссипативных сил;
- считается, что угол поворота магнитного момента частицы за время между двумя последовательными столкновениями мал;
- рассматриваются только концентрированные системы, в которых две и более частиц.

Для решения уравнения (1) с учетом инерциального члена в работе [5] рассмотрено уравнение вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной точки. Кинематические уравнения Эйлера составляющих вектора угловой скорости в координатной форме имеют вид [6]

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ \sin\theta & \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \cos\theta & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

где ψ, θ, φ - углы Эйлера.

Принимая, что $\psi = \psi_0 + \psi'$, $\theta = \theta_0 + \theta'$, $\varphi = \varphi_0 + \varphi'$ и разложив тригонометрические функции по малым значениям ψ, θ, φ и отбросив члены второго и более высоких порядков малости, с учетом (2) была получена линеаризованная система уравнений движения в проекциях в виде [5]

$$\begin{aligned} \psi'' \sin\theta_0 \cos\varphi_0 - \theta'' \sin\varphi_0 &= \beta \cos\Omega t (\cos\theta_0 - \theta \sin\theta_0) \\ \psi'' \cos\theta_0 + \varphi'' &= \beta \theta (\cos\theta_0 \cos\varphi_0 \sin\Omega t - \cos\theta_0 \sin\varphi_0 \cos\Omega t) - \\ &- \beta \varphi (\sin\theta_0 \sin\varphi_0 \sin\Omega t - \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \cos\Omega t) + \\ &+ \beta (\sin\theta_0 \cos\varphi_0 \sin\Omega t - \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \cos\Omega t), \end{aligned} \quad (3)$$

где индекс «0» означает начальные значения угла; $\beta = PH/l$

Введя безразмерное время $x = \Omega t$ из двух первых уравнений системы (3) было получено выражение для $\theta(x)$:

$$\theta(x) = C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + \dots, \quad (4)$$

где $C_0 = \theta_0$, $C_1 = \theta'_0$, $C_2 = 1/2(\theta_0 A_2 - A_4)$, $C_3 = 1/6(\theta_0 A_1 + \theta'_0 A_2 - A_3)$,

$$C_4 = 1/12[\theta_0 A_1 - 1/2\theta_0 A_2 + 1/2 A_2 (\theta_0 A_2 - A_4) + 1/2 A_4],$$

где

$$A_1 = \beta \Omega^{-2} \sin\theta_0 \cos\varphi_0, A_2 = \beta \Omega^{-2} \sin\theta_0 \sin\varphi_0,$$

$$A_3 = \beta \Omega^{-2} \cos\theta_0 \cos\varphi_0, A_4 = \beta \Omega^{-2} \cos\theta_0 \sin\varphi_0$$

С учетом (4) после интегрирования второго уравнения системы (3) получено выражение для $\psi(x)$:

$$\psi(x)'' = \psi_0 + \Omega^{-2} \sin\varphi_0 (2C_2 x + 3C_3 x^2 + 3C_4 x^3 + \dots) + \beta \Omega^{-2} \cos\theta_0 \sin x -$$

$$\begin{aligned}
 & -\beta\Omega^{-2}\sin\theta_0\{\theta_0\sin x + \theta_0[(\cos x - 1) + x\sin x] + C_2[2x\cos x + \\
 & + (x^2 - 2)\sin x] + C_3[(x^3 - 6x)\sin x + 3x^2\cos x + 6(\cos x - 1)]\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

Из последнего уравнения системы (3) с учетом (4) и (5) для $\varphi(x)$ получено решение

$$\varphi_x = P_0 + P_1x + P_2x^2 + P_3x^3 + \dots, \quad (6)$$

где $P_0 = \varphi_0, P_1 = \varphi_0', P_2 = 1/2[-\varphi_0A_1 - 2A_5C_2 + A_6 - \theta_0(A_4 + A_7) - A_2],$
 $P_3 = 1/6[-\varphi_0A_2 - \varphi_0'A_1 - 6A_3C_5\theta_0'(A_4 + A_7) + \theta_0A_3 + A_1]$
 $A_5 = \operatorname{tg}\varphi_0 \operatorname{ctg}\theta_0, A_6 = \beta\Omega^{-2}\cos\theta_0 \operatorname{ctec}\theta_0,$
 $A_7 = \beta\Omega^{-2}\cos\theta_0 \operatorname{sec}\varphi_0.$

На основании полученных решений (4), (5) и (6) в работе [5] определена энергия ε , подкачиваемая полем одной частице за промежуток времени между двумя последовательными столкновениями:

$$\begin{aligned}
 & \frac{n}{t_c} \frac{I}{2} \left\{ \frac{\varepsilon}{I} + \left(\frac{\beta}{\Omega^2} \right)^2 \left[\frac{1}{3} A_8 (\Omega t_c)^2 + \frac{1}{5} A_9 (\Omega t_c)^4 + \frac{1}{7} A_{10} (\Omega t_c)^6 + \right. \right. \\
 & \left. \left. + 2(\Omega t_c)^3 \right] + \frac{\beta \pi^2}{\Omega 8} - \left(\frac{6\varepsilon}{I} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{1}{4} (\Omega t_c) + (\Omega t_c)^2 \right] \frac{1}{2} \Omega t_c \right\} = \\
 & = 6\varepsilon \left[n \left(\frac{\lambda}{m} + \frac{\sigma}{I} \right) \right] + \frac{\varepsilon(1-k)}{t_c} n, \quad (7)
 \end{aligned}$$

где: n - числовая концентрация частиц, $A_8 \dots A_{10}$ - численные коэффициенты, значения которых $A_8 = 86,27; A_9 = -0,604 + 0,225\omega_0 + 0,708\omega_0^2;$
 $A_{10} = 0,290 + 0,037\omega_0^2; I\omega_0^2/6 = \varepsilon$ - энергия на одну степень свободы вращательного движения; λ и σ - коэффициенты трения поступательного и вращательного движений, зависящее от вязкости непрерывной фазы, формы частиц и их концентрации; k - эффективный коэффициент упругости, характеризующий неидеальность столкновений частиц.

Выражение (7) получено из предположения, что МОВ слой находится в состоянии динамического равновесия с непрерывной фазой, а также равенства диссипативной энергии в единице объема МОВ слоя за единицу времени и энергии, передаваемой полем.

В результате столкновений частицы обмениваются между собой энергиями как вращательного, так и поступательного движений. Но в силу того, что магнитное поле возбуждает только вращательные степени свободы частиц, а поступательное движение приобретает в результате столкновений и взаимного диполь-дипольного взаимодействия и является основным параметром, приводящим к интенсификации процессов переноса в МОВ слое, вопрос об эффективности превращения энергии вращательного движения частиц в поступательное имеет важное значение в раскрытии сущности динамики движения частиц в МОВ слое. В конечном итоге рассматриваемый вопрос сводится к анализу эффективности превращения энергии электромагнитного поля в энергию движения частиц.

Обмен между вращательными и поступательными движениями частиц в МОВ слое определяется из решения задачи о столкновении двух вращающихся намагниченных шаров и определения сумматорных инвариантов столкновения, что предоставляет-

ся достаточно сложным. В работе [7] показано, что «вращательная температура» на порядок выше «поступательной», и введен коэффициент ρ , характеризующий эффективность превращения кинетической энергии вращательного движения частиц в поступательное и определяется как их отношение. В работах [5,8] проведен численный анализ и экспериментальная проверка уравнения для определения средней скорости поступательного движения частиц в МОВ слое в зависимости от физических параметров непрерывной и дисперсной фаз, индукции и частоты поля, концентрации частиц и их размеров. Установлено, что для всех значений исследуемых частот после достижения максимального значения скорость резко падает. Индукция поля, соответствующая максимальному значению скорости, с увеличением частоты смещается в область больших значений. Следовательно, для системы с фиксированными физическими параметрами фаз существует набор значений индукций и частот поля, при котором возможен процесс передачи энергии от поля к частицам ($\epsilon > 0$).

Средние скорости частиц МОВ слоя во вращающемся магнитном поле выше, чем в однородном переменном поле, что легко объяснить зависимостью функции Лагранжа от трёх углов и их производных по времени во вращающемся поле. В однородном переменном поле в силу его аксиальной симметрии функция Лагранжа зависит только от одного угла и его производной и, следовательно, подкачка энергии происходит только на одну степень свободы [9].

Состояние системы намагниченных частиц зависит от их концентрации и физических параметров, индукции и частоты поля. Процесс ожигения происходит послойно, начиная с верхних слоев. Полное магнитоожигение, аналогичное равновесному состоянию газа, характеризуется максвелловским распределением частиц по скоростям поступательного движения и получается при достижении некоторого критического значения индукции поля. Переход из развитого магнитоожигенного состояния в плотноупакованное («кристаллическая структура») осуществляется уменьшением поля до критического значения меньшего, чем при прямом процессе. Различие между значениями индукции поля при реализации магнитоожигения в системе намагниченных частиц и при их «кристаллизации» представляет собой интересное явление. В области гистерезиса магнитоожигенное состояние характеризуется хаотическим движением отдельных частиц и кластеров, которые в зависимости от вида магнитного упорядочения дипольных магнитных моментов могут быть абсолютно локально устойчивыми. Абсолютно устойчивыми являются антиферромагнитные агрегаты [10]. Обладая нулевой намагниченностью, они не взаимодействуют с полем, но совершают хаотическое движение в результате столкновений. Локально устойчивые агрегаты ферромагниты, подвергаются воздействию поля и в результате быстрее разрушаются. Примечательно, что с ростом концентрации частиц при магнитоожигении в переменном поле гистерезис практически вырождается, в то время как во вращающемся поле он сохраняется вплоть до объемной концентрации $\varphi \approx 0,4$ для частиц диаметром 2,8...4,7 мм, но имеет тенденцию к сужению. Следовательно диаграмма фазового состояния МОВ слоя характеризуется наличием гистерезиса, который имеет место и при переменном, и при вращающемся, и при пульсирующем магнитных полях [8].

При больших концентрациях ($\varphi > 0,18$) в отличие от переменного поля, где частицы совершают хаотическое движение, во вращающемся поле на них налагается и ротационное движение в целом: они вращаются как квазитвердое тело. Так как линейная скорость ротационного движения приблизительно пропорциональна радиусу, то частицы, находящиеся вблизи оси МОВ слоя, имеют меньшие скорости, чем те, которые

движутся на периферии. Как следствие отмечаем, что распределение частиц по скоростям перестает быть максвелловским [11].

В работе [12, 13], на основе экспериментальных исследований, также установлено, что движение ферромагнитных частиц в МОВ слое возможно только до определенной степени заполнения рабочей зоны камеры этими частицами, при которой все частицы одновременно прекращают движение, образуя ряд параллельно расположенных дисков. Вид таких дисков показан на рис. 3.

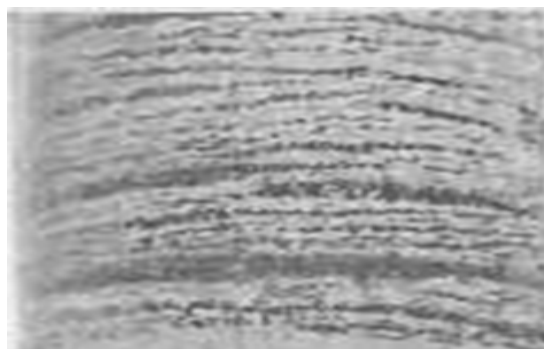


Рис. 3. Диски, образованные ферромагнитными частицами при критическом заполнении камеры этими частицами

Отмечается, что критерием оценки условий прекращения движения ферромагнитных частиц может служить параметр $K_{кр}$, оценивающий степень заполнения рабочего объема зоны влияния вращающегося электромагнитного поля этими частицами в функции от характеристик процесса:

$$K_{кр} = f(x, l/d, V, \omega, \eta, \rho, H, \rho_ч, I_z \dots),$$

где x — магнитная восприимчивость материала частиц; l/d — параметрический критерий подобия (здесь l — длина, d — диаметр частицы); V — объем отдельной частицы; ω — угловая скорость вращения магнитного поля; H — напряженность магнитного поля; η — вязкость среды; ρ — плотность среды, $\rho_ч$ — плотность материала частиц; I_z — момент инерции частицы.

Найти аналитическое выражение такой зависимости весьма затруднительно, так как большинство перечисленных характеристик взаимно связаны и обусловлены друг с другом. Поэтому его обоснование необходимо находить на основе экспериментальных исследований.

3. Заключение

Проведённый анализ позволяет предложить метод обработки, основанный на создании конвективных потоков ферромагнитных частиц в условиях вращающегося электромагнитного поля. Этот метод вполне обоснованно расширяет технологические возможности динамических методов ППД и имеет своё целевое технологическое назначение, связанное с применением его на операциях упрочнения деталей, обладающих выраженными парамагнитными свойствами. К числу таких деталей относятся тонкостенные трубы, стрингеры, пояса, лонжероны, которые широко применяются для изготовления летательных аппаратов [14]. Кроме того этот метод обработки может быть использован на операциях, обеспечивающих подготовку поверхностей для сварки в среде инертных газов, нанесения антикоррозионных и других функциональных покры-

тий, а также улучшения качества уже сформированных на поверхности покрытий. Вместе с тем, следует подчеркнуть, что предлагаемый метод в силу его физической (магнитной) природы, имеет свои специфические особенности, которые требуют проведения целенаправленных научных исследований с целью обоснования его практического применения в технологии обработки деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Логвиненко Д. Д., Щеляков О. П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. Киев, «Техника», 1976. – 143с.
2. Кочубей А. А., Лебедев В. А. Применение вращающегося электромагнитного поля в технологических целях // Интегрированные виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке: сб. тр. по материалам междунар. науч. симп. технологов-машиностроителей, п. Дивноморское, 30 сент. – 3 окт. / ДГТУ. – Ростов н/Д, 2015.
3. Hall W.F. Busenberg S.N., Viskosity of magnetic suspension.-Y.Chem Phys 1969. -vol. 51. – №1. – P. 137–144.
4. Кафаев В. А. Логвиненко Д. Д., Цаеткер О. В., Щеляков О. П., Обереман В.И. области применения аппаратов с вихревым слоем, создаваемым электромагнитным полем // химическое и нефтяное машиностр. 1974. – №11. – С.718–721
5. Марта И. Ф. Магнитооживление во вращающемся магнитном поле //Магнитная гидродинамика. 1987. – №4. – С. 83–90.
6. Хаар де Тер. Основы гамильтоновской механики //М.: Наука. 1974. – 223 с.
7. Бувевич Ю. А., Болога М. К., Сюткин С. В., Тетюхин В. В. О движении частиц при магнитооживлении в переменном поле//Магнитная гидродинамика. 1985. – №3. – С. 3.–12.
8. Болога М. К., Марта И. Ф. Магнитооживление во вращающемся магнитном поле//Магнитная гидродинамика. 1988. – №3. – С. 103.–108
9. Вернигоров Ю. М. Магнитовибрационная технология производства порошковых магнитов // Дис док. техн. наук.- Ростов н/Д. 1995. – 369 с.
10. Бибик Е. Е. Реология дисперсных систем //Л.: Энергия. 1981. – 172с
11. Болога М. К., Заморев В. М., Сюткин С. В., Некоторые динамические аспекты магнитооживленных слоев // Электронная обработка материалов. 1986. – №1. – С.59–63
12. Исследование критического коэффициента заполнения аппарата с вихревым слоем ферромагнитными частицами.- «Химическое и нефтяное машиностроение», 1973, – №11. Авт.: В. В. Кафаров, Д. Д. Логвиненко, О. П. Щеляков, В. Л. Кирейкова, Е. И. Полщипкова
13. Цаеткер К. Л., Логвиненко Д. Д., Герметичный аппарат для проведения процессов в псевдооживленном слое.- «Химическое и нефтяное машиностроение», 1971, – №4.
14. Кочубей А. А., Лебедев В. А. Эффективность применения вращающегося электромагнитного поля для отделочно-упрочняющей обработки деталей летательных аппаратов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: Материалы XVI всероссийской науч.-техн. конф., 17-18 ноября / ПГТУ.- Пермь, 2015.

Поступила в редколлегию 10.12.2015 г.