

УДК 621.313.17:66.08

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.2.07

**А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин**

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Процессы приготовления однородных по составу смесей порошкообразных материалов применяются во многих отраслях промышленности. **Цель исследования:** рассматривается применение для смешивания порошковых материалов электромагнитных вращателей. В таких электромагнитных аппаратах в качестве рабочих тел выступают ферромагнитные активные элементы. Под действием вращающегося магнитного поля ферромагнитные элементы распределяются по всему объему рабочей камеры и совершают вращательное движение вокруг оси, увлекая частицы перемешиваемых дисперсных материалов. Преимуществами электромагнитных вращателей являются малые размеры, высокая надежность и простота управления процессом перемешивания. Обзор литературных источников показал, что помимо перемешивания порошковых и мелкозернистых материалов электромагнитные вращатели могут обеспечивать выполнение целого ряда других технологических операций: измельчение и диспергирование сыпучих материалов, очистка поверхности изделий, абразивная обработка поверхности заготовок и изделий, упрочнение поверхностей, перемешивание пульп и суспензий, гомогенизация топлива и др. Расширение сфер применения таких аппаратов делает актуальными их моделирование и исследование с целью развития их теории. **Методы и результаты исследований:** предлагается математическая модель электромагнитного вращателя. На основе решения уравнений электромагнитного поля в цилиндрических координатах получены выражения для электромагнитных усилий, действующих в магнитном поле на элементарные ферромагнитные частицы. Анализ таких выражений позволяет объяснить поведение рабочих тел в рассматриваемых аппаратах и получить рекомендации по выбору параметров аппарата. В частности, для улучшения качества перемешивания порошков рекомендуется использовать двухполюсный индуктор. В таком индукторе обеспечивается распределение рабочих тел по всему объему рабочей камеры. В случае многополюсных индукторов возрастает влияние сил магнитного притяжения, и в центре рабочей камеры ферромагнитные элементы отсутствуют. Для проверки теоретических выводов и детального изучения процессов перемешивания порошков в электромагнитных вращателях выполнены исследования опытных установок. Эксперименты проводились как при отсутствии порошков в рабочей зоне, так и при наличии порошков. Результаты таких исследований подтверждают теоретические выводы. В то же время сложность физических процессов в рассматриваемых аппаратах указывает на необходимость продолжения их исследований.

**Ключевые слова:** электромагнитные смесители порошков, ферромагнитные активные элементы, математическая модель, результаты исследований.

**A.Yu. Konyaev, D.N. Bagin**

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

## **MODELING AND RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC MIXERS OF POWDER MATERIALS**

Processes for the preparation of homogeneous mixtures of powder materials are used in many industries. **Purpose of the study:** The article discusses the use of electromagnetic rotators for mixing powder materials. In such electromagnetic devices, ferromagnetic active elements act as working bodies. Under the action of a rotating magnetic field, ferromagnetic elements are distributed throughout the entire volume of the working chamber and rotate around the axis, entraining the particles of the dispersed materials being mixed. The advantages of electromagnetic rotators are small size, high reliability and easy control over the mixing process. A review of literary sources has shown that, in addition to mixing powder and fine-grained materials, electromagnetic rotators can provide a number of other technological operations: grinding and dispersing bulk materials, cleaning the surface of products, abrasive processing of the surface of workpieces and products, surface hardening, mixing slurries and suspensions, fuel homogenization and others. Expansion of the spheres of application of such devices makes their modeling and research relevant for the development of their theory. **Research methods and results:** The paper proposes a mathematical model of an electromagnetic rotator. On the basis of solving the equations of the electromagnetic field in cylindrical coordinates, expressions are obtained for the electromagnetic forces acting in a magnetic field on elementary ferromagnetic particles. The analysis of such expressions makes it possible to explain the behavior of the working bodies in the apparatus under consideration and to obtain recommendations on the choice of the apparatus parameters. In particular, to improve the quality of powder mixing, it is recommended to use a two-pole inductor. In such an inductor, the distribution of working bodies throughout the entire volume of the working chamber is ensured. In the case of multi-pole inductors, the influence of magnetic attraction forces increases, and there are no ferromagnetic elements in the center of the working chamber. In order to check theoretical conclusions and a detailed study of the processes of mixing powders in electromagnetic rotators, studies of experimental installations were carried out. The experiments were carried out both in the absence of powders in the working area and in the presence of powders. The results of such studies confirm the theoretical conclusions. At the same time, the complexity of physical processes in the devices under consideration indicates the need to continue their research.

**Keywords:** electromagnetic powder mixers, ferromagnetic active elements, mathematical model, research results.

### **Введение**

Процессы приготовления однородных по составу смесей порошкообразных материалов осуществляются во многих отраслях промышленности (химической, строительной, металлургической, фармацевтической, пищевой и т. д.), в атомной энергетике. Во многих случаях качество смешивания компонентов определяет ход последующих технологических процессов и качество готовой продукции. Чаще всего для перемешивания сыпучих материалов применяются механические смесители вибрационного и центробежного типов [1–2]. В то же время известны также электромагнитные вращатели с ферромагнитными элементами в качестве рабочих тел [3–9]. В таких аппаратах под действи-

ем вращающегося магнитного поля ферромагнитные элементы распределяются по всему объему рабочей камеры и совершают вращательное движение вокруг оси, увлекая частицы перемешиваемых дисперсных материалов. Преимуществами электромагнитных вращателей по сравнению с аппаратами механического типа являются меньшие габариты, высокая надежность и простота управления процессом перемешивания. Помимо перемешивания порошковых и мелкозернистых материалов электромагнитные вращатели при минимальных изменениях в конструкции могут обеспечивать выполнение целого ряда других технологических операций, таких как:

- измельчение и диспергирование сыпучих материалов;
- очистка поверхности изделий;
- абразивная обработка и упрочнение поверхности заготовок и изделий;
- перемешивание пульп и суспензий;
- гомогенизация топлива и др.

Многие из указанных способов применения электромагнитных вращателей отмечались еще в исследованиях Д.Д. Логвиненко и О.П. Шелякова [3]. В настоящее время можно выделить работы компании GlobeCore, разрабатывающей и выпускающей многофункциональные электромагнитные вращатели – аппараты вихревого слоя (Vortex Layers Machine) [11–12]. Несмотря на указанные достоинства, электромагнитные вращатели применяются значительно реже, чем их механические аналоги. Это можно объяснить сложностью физических процессов в электромагнитных вращателях и недостаточным развитием их теории. В то же время разрабатываются новые конструкции аппаратов вихревого слоя, например, на основе трехфазных линейных индукторов [16–17].

В указанных ранее работах [3–10] главное внимание уделяется механическим процессам в электромагнитных вращателях и их технологическим показателям. Публикаций, посвященных исследованию электромагнитных процессов в рассматриваемых устройствах, значительно меньше. Можно выделить только работы ученых Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ, г. Новочеркасск) [13–14] и Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (г. Харьков, Украина) [15]. Из вышеизложенного следует, что моделирование и исследование электромагнитных вращателей и развитие их теории являются актуальным вопросом.

## Объект исследования и математическое моделирование

В работе рассматривается электромагнитный вращатель (ЭМВ) для перемешивания порошковых материалов на основе трехфазного индуктора, в качестве которого может быть статор асинхронного двигателя. Установка содержит цилиндрическую рабочую камеру, располагаемую коаксиально внутри статора. При этом целесообразно воздействовать на активные элементы, находящиеся в рабочей камере, вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазным индуктором, подобным статору асинхронного электродвигателя. В качестве рабочих тел используются ферромагнитные активные элементы игольчатой формы. Обрабатываемые порошковые материалы и рабочие тела загружаются в рабочую камеру. При включении индуктора ферромагнитные тела под действием вращающегося магнитного поля приходят в движение, увлекая за собой частицы обрабатываемых порошков. Схематично конструкция установки показана на рис. 1.

В рабочем режиме в ЭМВ протекают взаимосвязанные электромагнитные и электромеханические процессы, а также процессы массопереноса. Корректное моделирование таких процессов возможно только численными методами. В то же время для лучшего понимания физических процессов и развития теории рассматриваемых устройств целесообразно использование аналитических моделей, создание которых возможно при ряде упрощающих допущений.

Поскольку ферромагнитные активные элементы занимают не более 5–10 % рабочего объема, то на первом этапе их влиянием на магнитное поле и токи индуктора можно пренебречь (изложенное подтверждается экспериментом). С учетом такого допущения становится возможным аналитическое описание магнитных полей в ЭМВ. При отсутствии в исследуемом объеме проводящей среды магнитное поле удобно описывать как потенциальное (с помощью скалярного магнитного потенциала  $\varphi$ ). Если при этом связать цилиндрическую систему координат с вращающимся магнитным полем, то решение можно получить в магнитостатическом приближении. Конструкция ЭМВ предполагает, что активная длина индуктора больше, чем длина рабочей камеры, поэтому искажением поля на краях индуктора можно пренебречь. В этом случае можно использовать традиционное для подобных задач допущение о том, что все величины не зависят от осевой координаты  $Z$ , а магнитное поле однозначно характеризуется скалярным магнитным потенциалом  $\varphi$  и двумя составляющими напряженности  $H_r$  и  $H_\theta$  (рис. 2).

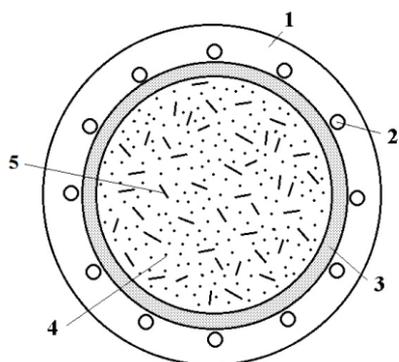


Рис. 1. Схема электромагнитного вращателя: 1 – индуктор; 2 – обмотка; 3 – стенка рабочей камеры; 4 – частицы обрабатываемого материала; 5 – ферромагнитные элементы

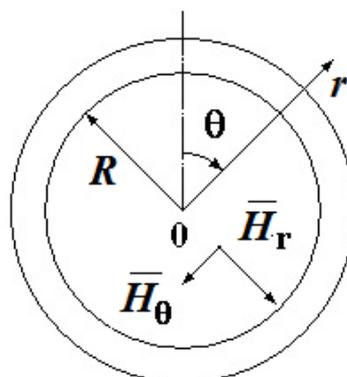


Рис. 2. К описанию магнитного поля ЭМВ в цилиндрических координатах  $(\theta, r)$ :  $R$  – внутренний радиус индуктора;  $H_r$  и  $H_\theta$  – радиальная и угловая составляющие напряженности магнитного поля

При построении математической модели ЭМВ реальные токи, расположенные в пазах магнитопровода индуктора, заменим токовым слоем с линейной плотностью тока  $J$  (А/м):

$$J = J_m \cdot \cos(p\theta), \quad (1)$$

где  $p$  – число пар полюсов индуктора. При указанной замене токов не учитываются только зубцовые гармоники магнитного поля, которые быстро затухают вблизи поверхности индуктора, не проникают через стенки рабочей камеры и не оказывают влияния на рабочие процессы. Изложенное в меньшей степени относится к индукторам с открытыми пазами, поэтому их использование нежелательно.

С учетом принятых допущений потенциальное магнитное поле в активной зоне ЭМВ описывается уравнением Лапласа [18, 19]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} = 0. \quad (2)$$

Для решения уравнения (2) воспользуемся методом разделения переменных, представив потенциал  $\varphi$  в виде гармонической функции угла  $\theta$ :

$$\varphi = \varphi_m \sin(p\theta). \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получаем дифференциальное уравнение относительно амплитуды скалярного магнитного потенциала  $\varphi_m$ :

$$\frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_m}{\partial r} - \frac{p^2}{r^2} \varphi_m = 0. \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения, подобного (4), известно [20]. Учитывая граничные условия на поверхности индуктора и в центре активной зоны, находим постоянные интегрирования и приходим к решению относительно скалярного магнитного потенциала в виде:

$$\varphi = -\frac{R}{p} J_m \left(\frac{r}{R}\right)^2 \sin(p\theta), \quad (5)$$

где  $R$  – радиус индуктора.

Связь между скалярным магнитным потенциалом  $\varphi$  и напряженностью магнитного поля  $H$  определяется выражением [18, 19]:

$$\vec{H} = -\overline{\text{grad}}\varphi. \quad (6)$$

С учетом этого для радиальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля в активной зоне ЭМВ получаем:

$$H_r = J_m \left(\frac{r}{R}\right)^{p-1} \sin(p\theta), \quad (7)$$

$$H_\theta = J_m \left(\frac{r}{R}\right)^{p-1} \cos(p\theta). \quad (8)$$

Полученные выражения связывают напряженность магнитного поля с линейной плотностью тока индуктора, поэтому они могут быть положены в основу электромагнитного расчета ЭМВ.

Анализ полученных выражений позволяет сделать вывод о целесообразности использования в ЭМСП только двухполюсных индукторов ( $p = 1$ ). Действительно, в двухполюсном индукторе согласно (7)–(8) составляющие напряженности магнитного поля  $H_r$  и  $H_\theta$  не зависят от радиуса  $r$ . В то же время при  $p > 1$  магнитное поле затухает по мере удаления от поверхности индуктора. При этом скорость затухания увеличивается с ростом числа пар полюсов  $p$ . Изложенное иллюстрируется картинками распределения магнитного поля в ЭМСП для разных моментов времени, показанными на рис. 3–4.

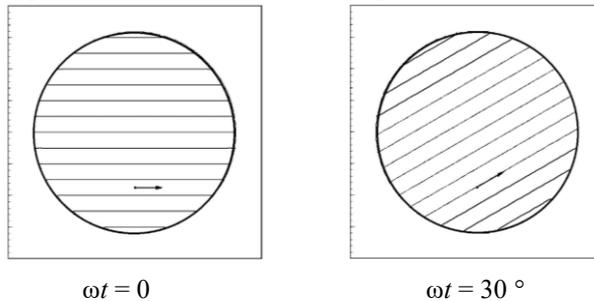


Рис. 3. Картины магнитного поля в двухполюсном индукторе для двух моментов времени

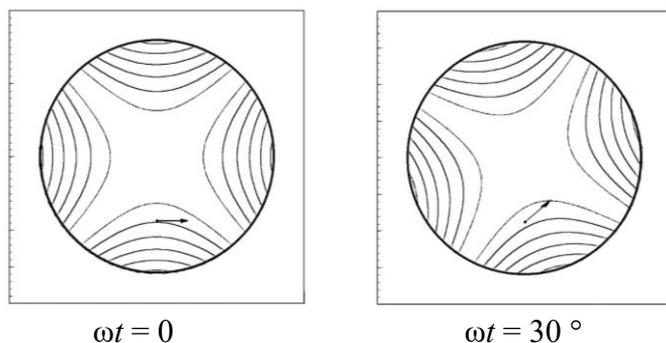


Рис. 4. Картины магнитного поля в четырехполюсном индукторе для двух моментов времени

Характер распределения магнитного поля в ЭМВ, показанный на рис. 3 и 4, подтверждается данными экспериментальных исследований. В частности, на рис. 5 представлены зависимости индукции магнитного поля от расстояния до индуктора ( $y$ , мм) для случая двухполюсного индуктора, а на рис. 6 – зависимости относительного изменения индукции ( $B/B_0$ , где  $B_0$  – индукция поля на поверхности индуктора) от относительного расстояния до индуктора ( $y/R$ , о.е.) при разном числе полюсов.

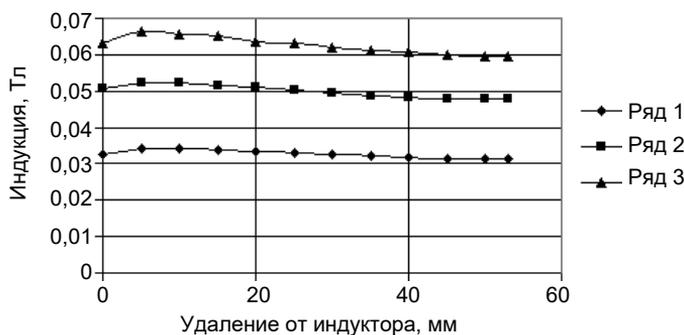


Рис. 5. Распределение магнитного поля в двухполюсном индукторе диаметром 106 мм: кривые соответствуют токам индуктора: 8 (1), 12 (2) и 16 А (3)

В общем случае расчет электромагнитных сил, действующих в бегущем магнитном поле на ферромагнитные, активные элементы произвольной формы и размеров, может быть выполнен только численными методами. Поэтому на первом этапе исследований для качественной оценки физических процессов в ЭМВ рассмотрим действие бегущего магнитного поля на элементарную магнитную частицу

с постоянной относительной магнитной проницаемостью  $\mu_a$ . Известно выражение для объемной плотности механической силы, действующей на такую частицу [18, 19]:

$$\bar{f} = \frac{d\bar{F}}{dV} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_a - 1}{\mu_a} \overline{\text{grad} B^2}. \quad (9)$$

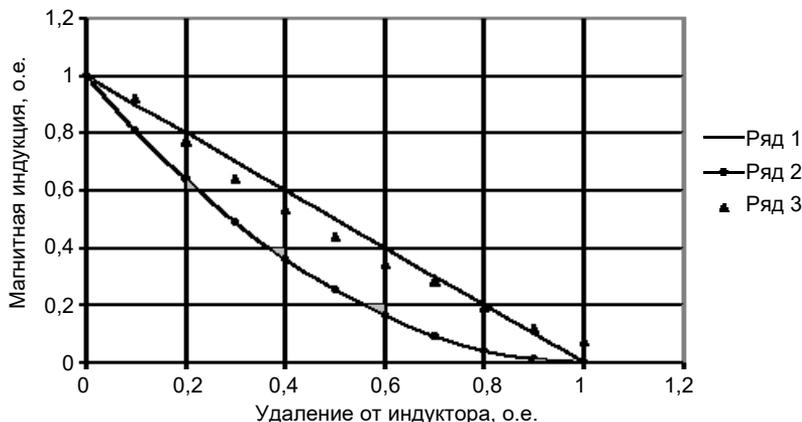


Рис. 6. Распределение магнитного поля в индукторе диаметром 158 мм: расчет для  $2p = 4$  и  $2p = 6$  – кривые 1 и 2 соответственно; экспериментальные данные для  $2p = 4$  показаны точками (ряд 3)

Выражение (9) справедливо для частиц, размеры которых пренебрежимо малы и влиянием которых на процессы в индукторе можно пренебречь. В этом случае можно воспользоваться полученными ранее выражениями для составляющих напряженности магнитного поля (7)–(8) и определить через них входящий в (9) квадрат магнитной индукции:

$$B^2 = B_r^2 + B_\theta^2, \quad (10)$$

где

$$B_r = \mu_0 J_m \left(\frac{r}{R}\right)^{p-1} \sin(p\theta), \quad (11)$$

$$B_\theta = \mu_0 J_m \left(\frac{r}{R}\right)^{p-1} \cos(p\theta). \quad (12)$$

С учетом (10)–(12) объемную плотность силы можно представить как сумму составляющих  $f_r$  и  $f_\theta$ , определяемых через градиенты магнитного поля по соответствующим направлениям:

$$\bar{f} = \bar{f}_r + \bar{f}_\theta = \frac{\mu_a - 1}{\mu_a} (B_r \cdot \overline{\text{grad}_r B_r} + B_\theta \cdot \overline{\text{grad}_\theta B_\theta}), \quad (13)$$

Преобразуя (13), приходим к выражениям:

$$\bar{f}_r = \bar{a}_r(p-1)\mu_0^2 \frac{\mu_a-1}{\mu_a} J_m^2 \frac{r^{2p-3}}{R^{2p-2}} \frac{(1-\cos 2p\theta)}{2}, \quad (14)$$

$$\bar{f}_\theta = \bar{a}_\theta p \mu_0^2 \frac{\mu_a-1}{\mu_a} J_m^2 \frac{\sin 2p\theta}{2}, \quad (15)$$

где  $a_r$  и  $a_\theta$  – единичные векторы цилиндрической системы координат.

### **Анализ результатов моделирования и экспериментальные исследования ЭМВ**

Выражения (13)–(15), полученные во вращающейся системе координат, описывают силы, действующие на частицу, вращающуюся по окружности синхронно с полем, в каждый момент времени. При этом радиальная сила  $f_r$  по (14) – это сила магнитного притяжения, стремящаяся прижать магнитную частицу к поверхности индуктора. Анализируя выражение (14), нетрудно заметить, что в двухполюсном индукторе ( $p = 1$ ) составляющая силы  $f_r = 0$ , а в многополюсном индукторе (при  $p > 1$ ) –  $f_r > 0$ . Этот вывод подтверждается при экспериментальных исследованиях. В многополюсных индукторах ферромагнитные активные элементы совершают хаотические движения вблизи поверхности индуктора, а в центре активного объема частиц нет. В то же время при  $p = 1$  активные элементы распределяются по всему рабочему объему ЭМВ. Вторая (тангенциальная) составляющая электромагнитной силы  $f_\theta$ , определяемая по (15), стремится переместить магнитную частицу к оси полюса. Характер зависимости тангенциальной силы от угла  $\theta$  полностью совпадает с зависимостью от  $\theta$  реактивного момента синхронных электрических машин.

Если под действием механических сил (сопротивление среды, трение о стенки рабочей камеры и т.п.) магнитная частица перестает вращаться по окружности синхронно с магнитным полем и останавливается (выпадает из синхронизма), то характер электромагнитных сил меняется. К описанным ранее силам добавляется сила, обусловленная кремальерным эффектом [21]. Этот эффект связывается с тем, что в каждой точке рабочего пространства над поверхностью индуктора вектор магнитной индукции вращается с частотой сети навстречу движению бегущего магнитного поля, как это видно на рис. 3 и 4. При этом образуются локальные вращающиеся (круговые или эллиптические) магнитные поля, в которых металлические частицы ведут себя, как роторы электродвигателя.

телей переменного тока. Немагнитная проводящая частица, подобно ротору асинхронного двигателя, вращается за счет взаимодействия с полем индуцированных в ней токов. На ферромагнитную частицу действуют гистерезисный и реактивный моменты. Как известно из теории электрических машин [22], реактивный момент тем больше, чем более различаются магнитные проводимости по продольной и поперечной осям ротора (в нашем случае магнитной частицы). Поэтому в качестве активных элементов желательно использовать частицы игольчатой формы. В дальнейшем будем называть описанные силы крутящими, поскольку под действием сил кремальерного эффекта частицы могут крутиться на одном месте вокруг своей поперечной оси.

Отметим, что все изложенное справедливо только для уединенных частиц, размеры которых существенно меньше полюсного деления индуктора  $\tau$ . С ростом размеров ферромагнитных частиц усиливается влияние на процессы их собственного магнитного поля. За счет такого поля частицы могут взаимодействовать друг с другом, образуя агрегаты. С другой стороны, концы таких агрегатов могут оказаться под разными полюсами. При этом тангенциальные силы, а также крутящие силы могут уравниваться, и вращение частиц, как по окружности, так и вокруг своей оси становится невозможным. В то же время под действием собственного магнитного поля частиц возникают силы магнитного притяжения даже в двухполюсном индукторе. Указанные эффекты проявлялись в ходе экспериментальных исследований при росте длины активных элементов.

Для выполнения экспериментальных работ в лаборатории университета был создан специальный стенд. Индукторы ЭМВ устанавливались на возвышенном основании и были снабжены подсветкой. Это позволило визуально контролировать процессы, происходящие в рабочих камерах, выполненных из стекла или прозрачной пластмассы. Индукторы ЭМВ подключались к стандартной сети через индукционный регулятор напряжения либо через преобразователь частоты ТПТР 10-230-200. Электрические параметры установки (ток, напряжение, мощность) контролировались с помощью универсального измерительного комплекта К-50. Для оценки влияния на процессы в ЭМВ различных факторов основные параметры экспериментальных моделей изменялись в широких пределах.

Основу экспериментальных моделей ЭМВ составляли индукторы от асинхронных двигателей, отличающихся габаритами и числом пар полюсов:

1) двигатель типа НА-4,5 (0,18 кВт, 2800 об/мин, 220/380 В, 0,75/0,43 А);

2) двигатель типа АОЛ 21-2 (0,4 кВт, 2800 об/мин, 220/380 В, 1,7/0,98 А);

3) двигатель типа АОЛ2-31-2 (4 кВт, 2840 об/мин, 220/380 В, 14/8 А);

4) двигатель типа АО2-51-4 (7,5 кВт, 1460 об/ мин, 220/380 В, 26/15 А).

Другие параметры индукторов, значимые для выполняемых экспериментальных исследований, приведены в таблице. В дальнейшем принадлежность полученных данных к тому или иному индуктору будет отмечаться указанием диаметра (например, индуктор – 72 мм).

#### Основные параметры индукторов ЭМВ

Параметр	Значение			
Диаметр индуктора, мм	58	72	106	158
Длина активной зоны, мм	45	60	120	135
Объем активной зоны, дм <sup>3</sup>	0,12	0,24	1,06	1,68
Число полюсов	2	2	2	4
Полюсное деление, мм	91	113	166	124
Номинальный ток, А	0,43	0,98	8,00	15

В качестве активных элементов в экспериментах применялись ролики игольчатых подшипников (например, ролики 1,5-9,8 и 2,0-6,3 мм), а также элементы, специально нарезанные из стальной проволоки (диаметры –  $d = 0,7...4,0$  мм, длина –  $l = 7...30$  мм, соотношение –  $l/d = 2,5...10$ ). В качестве перемешиваемых сред использовались порошки различных материалов (сода, цемент, кварцевый песок, окись меди), отличающиеся размерами частиц (от 5 до 500 мкм) и насыпной плотностью (от 1,2 до 3,6 г/см<sup>3</sup>).

На первом этапе исследовались магнитные поля в активной зоне установок. Некоторые результаты таких исследований представлены на рис. 5 и 6. Распределения магнитного поля при удалении от поверхности к центру индуктора, показанные на этих рисунках, в целом соответствуют теоретическим выводам. Некоторое уменьшение радиальной составляющей магнитной индукции при измерениях в двухполюсных индукторах (см. рис. 5) объясняется относительно

большими размерами измерительной катушки (ширина – 8 мм). С увеличением диаметра индуктора, а значит, и полюсного деления  $\tau$  такое изменение  $B_m$  становилось менее заметным (например, для индуктора с диаметром 58 мм уменьшение индукции составило 36–38 %, а для индуктора 106 мм – всего 6–8 %). В то же время, как видно на рис. 6, в случае многополюсных индукторов ( $2p \geq 4$ ) индукция магнитного поля быстро затухает и в центре активной зоны достигает нуля. Испытания четырехполюсного индуктора диаметром 158 мм в рабочем режиме показали, что из-за наличия сил притяжения ферромагнитные активные элементы, совершая хаотические движения, сосредотачиваются у поверхности индуктора. При этом в центре активной зоны активные элементы отсутствуют, и обработка материала не происходит. Это свидетельствует о нецелесообразности применения в ЭМВ многополюсных индукторов. Поэтому основные исследования выполнялись на двухполюсных индукторах.

Работоспособность исследуемых моделей ЭМВ, т.е. способность активных элементов совершать хаотические вихревые движения в бегущем магнитном поле индукторов, оценивалась при визуальном наблюдении процессов в активной зоне индукторов. Поведение активных элементов наблюдалось как в присутствии обрабатываемых порошковых материалов, так и без них. Отметим, что характер движения активных элементов при наличии и отсутствии порошка в целом одинаков. Разница состоит только в уровне токов индуктора (а значит, и магнитной индукции), при которой начинаются те или иные явления.

Движение ферромагнитных, активных элементов игольчатой формы начинается уже в относительно слабых магнитных полях при уровне индукции – 0,01 Тл (цифры даны для пустого зазора). В соответствии с правилом Максвелла [18] тела, находящиеся в магнитном поле, стремятся переместиться так, чтобы увеличивался магнитный поток. Поэтому элементы начинают ориентироваться вдоль магнитных силовых линий. При дальнейшем увеличении тока индуктора элементы выстраиваются вдоль силовых линий поля, образуя агрегаты в виде мостиков, объединяющих полюса индуктора. Под действием тангенциальных сил (реактивного момента) такие агрегаты начинают поворачиваться вслед за бегущим полем индуктора. При индукции 0,02–0,04 Тл становится заметным действие крутящих сил, под действием которых агрегаты рассыпаются, и начинается хаотическое

вращательно-поступательное движение элементов в поле (вихревое движение). При этом в двухполюсных индукторах элементы, совершающие вихревые движения, занимают весь активный объем рабочей камеры, а в четырехполюсном индукторе они совершают хаотическое движение только вблизи поверхности индуктора. Магнитная индукция, при которой начинается вихревое движение, зависит от соотношения длины и диаметра активных элементов. Например, указанное выше меньшее значение индукции (0,02 Тл) относится к элементам с  $l/d \approx 10$ , а большие значения (0,04 Тл) – к элементам с  $l/d \approx 3$ . Отметим, что при смешивании элементов разных размеров образуются более прочные агрегаты, разрушение которых происходит в более сильных магнитных полях.

Ход процессов в ЭМВ зависит от количества элементов, одновременно находящихся в активной зоне. При относительно большом количестве элементов агрегаты, образуемые ими в слабых полях, более прочны, поэтому разрушаются при больших значениях токов и индукций. Существует также предельное количество элементов, при превышении которого разрушения агрегатов не происходит. Например, при испытаниях модели ЭМВ с диаметром индуктора 58 мм (активный объем – 0,12 дм<sup>3</sup>) и использовании элементов длиной 10 мм и диаметром 2 мм вихревое движение прекращалось при количестве элементов, большем 50. В этом случае активные элементы срачивались в кольцеобразный агрегат, и наблюдалось вращение такого кольца. При дальнейшем росте количества элементов такой кольцеобразный агрегат может удерживаться от вращения силами трения о стенки камеры, обусловленными магнитным притяжением. Для описанного выше эксперимента остановка кольца наблюдалась при количестве элементов около 100 (при этом элементы занимали около трети объема рабочей камеры).

Все эффекты, обнаруженные при исследованиях моделей ЭМВ без порошка, имеют место и при наличии порошка. Очевидно только, что все стадии процесса, как то ориентация элементов в поле, выстраивание их в агрегаты, разрушение агрегатов и вихревое движение элементов, начинаются при больших значениях токов и индукции, чем в случае пустого зазора. При экспериментах рабочая камера заполнялась порошком на треть своего объема. При этом уровень магнитной индукции, при которой начинается вихревое движение актив-

ных элементов, возрастал в среднем в 1,3–1,4 раза по сравнению с уровнем индукции для аналогичных экспериментов без порошка. Примечательно, что характер процессов и уровень начальных тока и индукции практически оставались теми же при изменении свойств обрабатываемых порошков (в частности, насыпная плотность изменялась в пределах от 1,23 до 3,63 г/см<sup>3</sup>). Отмечалось также, что перемешивание порошков происходит более интенсивно с ростом размеров активных элементов.

В целом, экспериментальная оценка процессов, происходящих в активной зоне ЭМВ, подтвердила теоретические выводы, сделанные ранее относительно сил, действующих на активные элементы в бегущем магнитном поле. Анализ выявленных эффектов позволяет сформулировать задачи дальнейших исследований:

- оптимизация размеров активных ферромагнитных элементов и определение количества элементов, необходимого для устойчивой работы ЭМВ;
- оценка требуемого уровня магнитной индукции в активной зоне, при которой реализуется устойчивое вихревое движение элементов;
- оценка влияния частоты токов на характер физических процессов в ЭМВ.

### **Заключение**

Таким образом, анализ литературных источников подтвердил широкие возможности применения электромагнитных вращателей для решения различных технологических задач. Выполненные в УрФУ теоретические и экспериментальные исследования ЭМВ на примере перемешивания порошковых материалов позволили выявить закономерности физических процессов в таких устройствах и показали необходимость их оптимизации. При этом из-за сложности физических процессов в ЭМВ следует развивать их моделирование численными методами и сочетать теоретические исследования с физическим моделированием ЭМВ.

### **Библиографический список**

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 215 с.

2. Гарабажиу А.А. Интенсификация процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в современных конструкциях смесителей // Строительная наука и техника (Беларусь). – 2010. – № 4. – С. 27–42.

3. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. – Киев: Техника, 1976. – 143 с.

4. Вершинин И.Н., Вершинин Н.П. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем. – Сальск–Москва: Передовые технологии XXI века, 2007. – 368 с.

5. Вершинин Н.П. Установки активации процессов. – Ростов-н/Д: Инноватор, 2004. – 96 с.

6. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование смесителя с магнитооживленным слоем ферромагнитных тел // Известия Санкт-Петербург. гос. аграрного ун-та. – 2020. – № 59. – С. 129–134.

7. Пат. 2319546 Рос. Федерация, МПК51 В02С 19/00. Способ магнитомеханического измельчения материалов ферромагнитными мелющими телами / Борисков Ф.Ф., Борисков Д.Ф., Филатов А.Л., Мотовилов В.А., Парамонов Л.А.; заяв. и патентообл. Институт электрофизики УрО РАН. – 2005134598/03, заявл. 08.11.05; опубл. 20.03.08. Бюл. № 8. – 5 с.

8. Кочубей А.А., Лебедев В.А. Эффективность применения вращающегося магнитного поля для отделочно-упрочняющей обработки деталей летательных аппаратов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2015. – Т. 1. – С. 175–178.

9. Мищенко М.В., Боков М.М., Гришаев М.Е. Активация технологических процессов обработки материалов в аппаратах с вращающимся электромагнитным полем // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – С. 3508–3512.

10. Гиль Н.А., Жаров В.П., Смахунов Е.А. Факторы конструктивной оптимизации процессов в аппаратах вихревого слоя // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 15, вып. 3. – С. 73–80.

11. Company GlobeCore. Vortex Layers Machine ABC-100. – URL: [www.globecore.de](http://www.globecore.de); [www.globecore.ru](http://www.globecore.ru) (дата обращения: 19.04.2021).

12. May F. Possible uses of vortex layer systems // Global Recycling. – 2020. – Vol. 6, iss. 1. – P. 48–51.

13. Куимов Д.Н., Павленко А.В., Белов А.В. Электромеханический преобразователь со вторичной дискретной частью в системах обработки нефти и нефтепродуктов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – № 5. – С. 39–46.

14. Данилина Э.М., Володин Г.И., Бреславец В.П. Потери энергии на вихревые токи в электромагнитных аппаратах вихревого слоя и способы их снижения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 1. – С. 43–47.

15. Milykh V.I., Shilkova L.V. Numerical-Field Calculation of the Angle Torque Characteristic of the Three-Phase Inductor of the Magnetic Field of the Electromagnetic Stirrer in Processing Dissimilar Mixtures // Problemele energeticii regionale. – 2019. – № 1–2(42). – P. 55–64. DOI: 10.5281/zenodo.3239174

16. А. с. SU 1023573 А1. МКИ Н 02 К 41/025. Линейный индукционный аппарат / Шинкаренко В.Ф., Попков В.С., Славинский И.Л.; заяв. № 3384131 от 23.11.1981; опубл. 15.06.1983. Бюл. № 22.

17. А. с. SU 1713634 А1. МКИ В 01 F 13/08. Индукционный аппарат / Шульга В.Г., Шинкаренко В.Ф., Попков В.С., Баранник А.М.; заяв. № 4690941 от 12.05.1989; опубл. 23.02.1992. Бюл. № 7.

18. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергия, 1975. – Т. 3. – 208 с.

19. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – 11-е изд. – М.: Наука: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.

20. Аполлонский С.М. Дифференциальные уравнения математической физики в электротехнике. – СПб.: Питер, 2012. – 352 с.

21. Laithwait E.R. Induction machines for special purposes. – New York: Chemical Publishing Co, 1966. – 337 p.

22. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Электрические машины переменного тока. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.

## References

1. Makarov Iu.I. Apparaty dlia smesheniia sypuchikh materialov [Apparatus for mixing bulk materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 215 p.

2. Garabazhiu A.A. Intensifikatsiia protsessov peremeshivaniia sukhikh sypuchikh materialov v sovremennykh konstruktsiiakh smesitelei [Intensification of mixing processes for dry bulk materials in modern mixer designs]. *Stroitel'naiia nauka i tekhnika (Belarus')*, 2010, no. 4, pp. 27–42.

3. Logvinenko D.D., Sheliakov O.P. Intensifikatsiia tekhnologicheskikh protsessov v apparatakh s vikhrevym sloem [Intensification of technological processes in devices with a vortex layer]. Kiev: Tekhnika, 1976, 143 p.

4. Vershinin I.N., Vershinin N.P. Apparaty s vrashchaiushchimsia elektromagnitnym polem [Devices with a rotating electromagnetic field]. Sal'sk-Moscow: Peredovye tekhnologii XXI veka, 2007, 368 p.

5. Vershinin N.P. Ustanovki aktivatsii protsessov [Process activation settings]. Rostov-n/D: Innovator, 2004, 96 p.

6. Bezzubtseva M.M., Volkov V.S. Issledovanie smesitelia s magnitoozhizhennym sloem ferromagnitnykh tel [Study of a mixer with a magnetically fluidized layer of ferromagnetic bodies]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2020, no. 59, pp. 129-134.

7. Boriskov F.F., Boriskov D.F., Filatov A.L., Motovilov V.A., Paramonov L.A. Sposob magnitomekhanicheskogo izmel'cheniia materialov ferromagnitnymi meliushchimi telami [Method of magnetomechanical grinding of materials with ferromagnetic grinding bodies]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2319546 (2008).

8. Kochubei A.A., Lebedev V.A. Effektivnost' primeneniia vrashchaiushchegosia magnitnogo polia dlia otdelchno-uprochniaushchei obrabotki detalei letatel'nykh apparatov [Efficiency of using a rotating magnetic field for finishing and hardening processing of aircraft parts]. *Aerokosmicheskaiia tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2015, vol. 1, pp. 175-178.

9. Mishchenko M.V., Bokov M.M., Grishaev M.E. Aktivatsiia tekhnologicheskikh protsessov obrabotki materialov v apparatakh s vrashchaiushchimsia elektromagnitnym polem [Activation of technological processes for processing materials in devices with a rotating electromagnetic field]. *Fundamental'nye issledovaniia*. 2015, no. 2, pp. 3508-3512.

10. Gil' N.A., Zharov V.P., Smekhunov E.A. Faktory konstruktivnoi optimizatsii protsessov v apparatakh vikhrevogo sloia [Factors of constructive optimization of processes in the apparatus of the vortex layer]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. vol. 15, iss. 3, pp. 73-80.

11. Company GlobeCore. Vortex Layers Machine ABC-100, available at: [www.globecore.de](http://www.globecore.de); [www.globecore.ru](http://www.globecore.ru) (accessed 19 April 2021).

12. May F. Possible uses of vortex layer systems. *Global Recycling*, 2020, vol. 6, iss. 1, pp. 48-51.

13. Kuimov D.N., Pavlenko A.V., Belov A.V. Elektromekhanicheskii preobrazovatel' so vtorichnoi diskretnoi chast'iu v sistemakh obrabotki nefi i nefteproduktov [Electromechanical converter with a secondary discrete part in oil and oil products processing systems]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2017, no. 5, pp. 39-46.

14. Danilina E.M., Volodin G.I., Breslavets V.P. Poteri energii na vikhrevye toki v elektromagnitnykh apparatakh vikhrevogo sloia i sposoby ikh snizheniia [Energy losses due to eddy currents in electromagnetic devices of the vortex layer and methods of their reduction]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2014, no. 1, pp. 43-47.

15. Milykh V.I., Shilkova L.V. Numerical-Field Calculation of the Angle Torque Characteristic of the Three-Phase Inductor of the Magnetic Field of the Electromagnetic Stirrer in Processing Dissimilar Mixtures. *Problemele energeticii regionale*, 2019, no. 1-2(42), pp. 55-64. DOI: 10.5281/zenodo.3239174

16. Shinkarenko V.F., Popkov V.S., Slavinskii I.L. Lineinyi induktsionnyi apparat [Linear induction apparatus]. Avtorskoe svidetel'stvo SU 1023573 A1 (1983).

17. Shul'ga V.G., Shinkarenko V.F., Popkov V.S., Barannik A.M. Induktsionnyi apparat [Induction apparatus]. Avtorskoe svidetel'stvo SU 1713634 A1 (1992).

18. Polivanov K.M. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Energiia, 1975, vol. 3, 208 p.

19. Tamm I.E. Osnovy teorii elektrichestva [Foundations of the theory of electricity]. 11nd ed. Moscow: Nauka: FIZMATLIT, 2003, 616 p.

20. Apollonskii S.M. Differentsial'nye uravneniia matematicheskoi fiziki v elektrotehnike [Differential equations of mathematical physics in electrical engineering]. Saint Petersburg: Piter, 2012, 352 p.

21. Laithwait E.R. Induction machines for special purposes. New York: Chemical Publishing Co, 1966, 337 p.

22. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Elektricheskie mashiny peremennogo toka [Electric machines. AC electric machines]. Saint Petersburg: Piter, 2007, 350 p.

### **Сведения об авторах**

**Коняев Андрей Юрьевич** (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета (УрФУ) им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: a.u.konyaev@urfu.ru).

**Багин Дмитрий Николаевич** (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, профессор Военно-учебного центра УрФУ (620002, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 62, e-mail: bagin19@mail.ru).

### **About the authors**

**Andrey Yu. Konyaev** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrotechnological systems of the Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: a.u.konyaev@urfu.ru).

**Dmitry N. Bagin** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Professor of the Military Training Center of the Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Yekaterinburg, 62, Komsomolskaya str., e-mail: bagin19@mail.ru).

Получено 24.05.2021