

01

## Импульсная электродинамическая сепарация малых проводящих частиц

© В.И. Дядин, В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.С. Сочугов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: kozyrev@to.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 4 июня 2007 г.

Теоретически обоснована возможность реализации электродинамического метода ускорения малых проводящих частиц в импульсном магнитном поле индукционных катушек. Показано, что при килоамперном уровне тока за импульс длительностью в десятки  $\mu\text{s}$  металлической частице субмиллиметрового размера можно придать направленную скорость от единиц до десятков  $\text{cm/s}$ .

PACS: 85.70.Rp, 41.20.Gz

Существующие методы селекции проводящих частиц от непроводящей породы основаны на методе электродинамического ускорения проводящих частиц за счет градиента магнитного давления, создаваемого внешними полями в окрестности проводящей частицы. Речь идет о ситуации, когда ширина области проникновения магнитного поля (скин-слоя) в проводящем материале частицы меньше или хотя бы соизмерима с размерами частицы. Для сравнительно больших предметов этот метод успешно работает: известен электродинамический метод штамповки изделий, или магнитомеханические сепараторы проводящих частиц с вращающимися постоянными магнитами [1].

Если размер частиц очень мал (десятые и сотые доли  $\text{mm}$ ), то имеющиеся устройства становятся неэффективными, так как градиенты магнитного давления сообщают мелким частицам недостаточные для

сепарации импульсы. А в некоторых ситуациях возможность отсортировать столь мелкие проводящие частицы от основной массы непроводящих частиц довольно востребована. В качестве примеров можно указать извлечение самородного россыпного благородного металла из глинисто-песчаной породы или селекцию мелких частиц металла из грунта в задачах криминалистики. Современная электрофизическая техника позволяет создавать импульсные высокоградиентные магнитные поля, существенно большие, чем это имеет место в магнитомеханических сепараторах.

Целью настоящей работы является оценка технической возможности электродинамической сепарации малых проводящих частиц по импульсу за счет воздействия на них внешнего неоднородного магнитного поля, возбуждаемого импульсным током в катушке.

Основная идея метода довольно проста — во внешнем переменном магнитном поле  $\mathbf{B}(t)$  проводящая частица за счет генерации в ней индукционных токов Фуко приобретает магнитный момент  $\boldsymbol{\mu} \sim -\partial\mathbf{B}/\partial t$ , на который во внешнем слабонеоднородном магнитном поле действует сила  $\mathbf{F}(t)$  [2]:

$$\mathbf{F}(t) = (\boldsymbol{\mu}(t)\nabla)\mathbf{B}(t). \quad (1)$$

Интегрируя силу, можно найти импульс, который приобретет проводящая частица за время действия переменного поля.

Оценим величину скорости, которую могла бы получить в нестационарном и неоднородном магнитном поле проводящая частица цилиндрической формы, ось симметрии которой ориентирована вдоль вектора магнитной индукции (примем ниже это направление за ось  $Ox$ ). Пусть радиус цилиндра  $R$ , его высота  $H$ , а удельная проводимость металла  $\sigma$ . Поскольку частица предполагается малой по сравнению с толщиной скин-слоя, то магнитным полем токов Фуко можно пренебречь, и магнитный момент частицы будет равен

$$\boldsymbol{\mu} = \int_0^R \pi r^2 \cdot dI(r) = \int_0^R \pi r^2 \cdot \frac{1}{2} \sigma r \left( -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \right) H dr = -\frac{1}{8} \pi \sigma R^4 H \cdot \frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $I(r)$  — это радиальное распределение тока по сечению.

Подставляя (2) в (1), запишем одномерное уравнение движения частицы

$$(\rho\pi R^2 H) \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{8} \pi \sigma R^4 H \left( \frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \frac{\partial\mathbf{B}}{\partial x} \right), \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность металла,  $v$  — скорость частицы. Интегрируя (3) в предположении столь короткого времени импульсного магнитного поля, что частица за время этого импульса не успевает заметно переместиться в пространстве вдоль оси  $Ox$ , получим

$$v(t) = v(0) - \frac{\sigma R^2}{16\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (B(t))^2 - \left( \frac{\partial B^2}{\partial x} \right)_{t=0} \right\}. \quad (4)$$

Характерный масштаб скорости частицы из (5) можно оценить на уровне

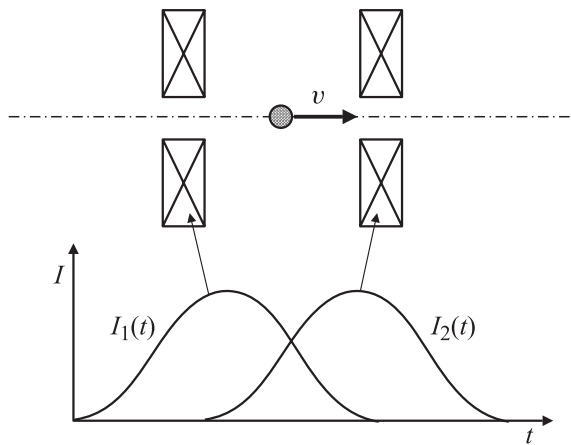
$$v_{\max} \sim \frac{\sigma}{16\rho L} (B_{\max} R)^2, \quad (5)$$

где символом  $L$  обозначен характерный масштаб неоднородности магнитного поля, который на практике может быть реализован в миллиметровом диапазоне. Возьмем для примера параметры медной частицы  $\sigma \cong 6 \cdot 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ,  $\rho \cong 9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , а максимальную величину магнитной индукции, которую нетрудно технически реализовать в импульсном режиме, оценим на уровне  $B_{\max} \sim 5 \text{ T}$ . Тогда при  $L \sim 2 \text{ mm}$  получим для частиц с размерами  $R \cong 0.1 \text{ mm}$  максимальную скорость на уровне  $v_{\max} \cong 5 \text{ cm/s}$ . Эта величина вполне способна обеспечить надежную селекцию проводящих частиц по скоростям относительно не проводящих.

Но, к сожалению, формула (5) демонстрирует не конечную, а максимальную скорость движения частицы в продолжении импульса  $B(t)$ . При спаде магнитной индукции к концу импульса до нуля скорость частицы также упадет до нуля, так как при смене знака производной в (2) направление магнитного момента частицы также меняет знак, и ускоренная на переднем фронте импульса поля частица будет заторможена на его заднем фронте. В результате у частицы останется лишь очень небольшая скорость, обусловленная конечным смещением частицы в течение короткого импульса тока в катушке. Поэтому сообщить большой импульс частице с помощью единственной индукционной катушки, ток в которой нарастает и спадает до нуля, не удастся. К тому же приближение малости частицы по сравнению со скин-слоем накладывает ограничения снизу на длительность  $T$  импульса магнитного поля:

$$T \gg \mu_0 \sigma R^2, \quad (6)$$

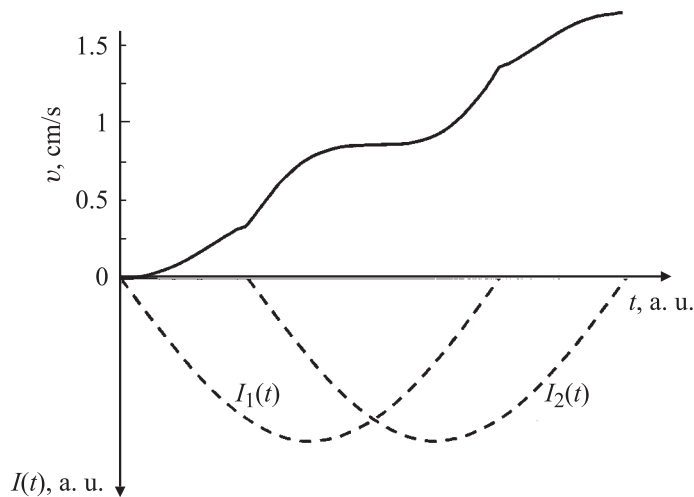
где  $\mu_0$  — магнитная постоянная. Для частиц субмиллиметрового размера справа в (6) стоит величина  $\sim 1 \mu\text{s}$ , так что наш оценочный расчет будет справедлив для субмиллисекундной длительности импульсов тока.



**Рис. 1.** Схема электродинамического метода ускорения проводящей частицы в системе с бегущим магнитным полем.

Ситуация может быть существенно исправлена, если формировать импульсное магнитное поле с помощью двух соосно расположенных катушек, в которых импульсы тока сдвинуты по времени так, чтобы в месте нахождения частицы формировалось „бегущее магнитное поле“. Ситуация схематично показана на рис. 1. В этом случае смена знака производной магнитной индукции в (2) будет одновременно сопровождаться сменой знака градиента индукции в (1). В результате сила (1), действующая на частицу, не будет менять знака, пока не закончатся оба импульса тока. В результате у частицы к этому моменту сохранится довольно высокая скорость движения, оценка которой по порядку величины дается выражением (6).

Естественно, что присутствие второй катушки существенно изменит величину градиента магнитной индукции в месте нахождения частицы и количественная оценка скорости (5) будет сильно завышена. Поэтому нами было проведено интегрирование уравнения движения (3) для медной частицы с теми же, что и выше, параметрами, но в нестационарном поле двух катушек. Через две одинаковые плоские катушки, состоящие из 10 витков (радиус внутреннего витка 2 mm и внешнего — 10 mm) и отстоящие друг от друга на 6 mm, протекают импульсы тока в форме полусинусоид длительностью  $T = 50 \mu\text{s}$  и амплитудой 3 kA. При этих



**Рис. 2.** Расчетная зависимость скорости медной частицы от времени в поле двух плоских катушек.  $I_1(t)$  и  $I_2(t)$  — ток, текущий в соответствующих катушках.

параметрах индукция магнитного поля в месте нахождения частицы достигает как раз уровня  $\sim 5$  Т.

На рис. 2 приведен результат этого расчета, из которого также видно, как меняется во времени ускорение частицы. Максимальная скорость частицы, достигаемая к концу второго импульса,  $v_{\max} \cong 1.6$  см/с. Если сдвиг между импульсами тока варьировать, то максимальная скорость будет меняться и оптимальный режим наблюдается при сдвиге между импульсами  $\Delta t \approx T/3$  (именно этот случай и демонстрируется на рис. 2).

Таким образом, оценочные расчеты показывают техническую возможность создания устройства для непрерывной электродинамической сепарации проводящих частиц в импульсно-периодическом магнитном поле. При частоте следования килоамперных импульсов тока на уровне  $f = 100$  pps средняя мощность генератора тока должна составлять несколько киловатт, что, безусловно, реализуемо на современном уровне развития силовой электроники.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 02.515.11.5003.

## **Список литературы**

- [1] *Кармазин В.В., Кармазин В.И.* Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. М.: Изд-во МГГУ, 2005. 670 с.
- [2] *Тамм И.Е.* Основы теории электричества / М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1946. 660 с.