

# Влияние поверхностного эффекта на характеристики электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем

КОНЯЕВ А.Ю., КОНЯЕВ И.А., НАЗАРОВ С.Л.

*Рассмотрены электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем (с линейным или цилиндрическим индуктором). Выполнен анализ характеристик таких машин с учетом краевых эффектов в коротком вторичном элементе. Особое внимание уделено явлению поверхностного эффекта во вторичном элементе. Исследования показали существенное влияние поверхностного эффекта на эффективность электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем, что следует учитывать при выборе конструкций и параметров сепараторов. Обнаруженные закономерности показывают, что сепараторы на основе линейных индукционных машин предпочтительны при сепарации металлосодержащих смесей с фракциями металлических включений, большими 40–50 мм. Сепараторы с вращающимися цилиндрическими индукторами целесообразно использовать при сепарации мелкофракционных смесей, а при обработке крупных металлосодержащих отходов эффективность таких сепараторов снижается.*

**Ключевые слова:** электродинамическая сепарация, бегущее магнитное поле, вторичный элемент, поверхностный эффект

При переработке металлосодержащих отходов и сортировке лома цветных металлов широкое применение могут найти электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем, работающие по принципу линейных индукционных машин (ЛИМ) [1, 2]. Извлекаемые из смесей материалов немагнитные проводящие тела играют при этом роль вторичного элемента (ВЭ) таких машин. Взаимодействие бегущего магнитного поля с вихревыми токами, наводимыми этим полем в проводящих телах, создает электромагнитное усилие, благодаря которому металлические включения выносятся из потока сепарируемых материалов, собираясь в отдельные фракции. Приобретаемые ими ускорения и траектории движения зависят от удельной электропроводности и удельной массы металлов, а также от соотношения электромагнитных и конкурирующих с ними механических сил.

С помощью электродинамических сепараторов может быть успешно решен ряд технологических задач:

отделение металлической фракции от неметаллической в сложных отходах (отходы электро- и

*Electrodynamic separators with traveling magnetic field (fitted with a linear or cylindrical inductor) are considered. The performance characteristics of such machines are analyzed taking into account the edge effects in a short secondary element. Special attention is paid to the surface effect phenomenon in the secondary element. Investigations showed that the surface effect has an essential influence on the performance of electrodynamic separators with traveling magnetic field, which should be taken into account in selecting the designs and parameters of such separators. The revealed regularities show that separators constructed on the basis of linear induction machines are preferable for separating metal-containing mixtures with fractions of metal inclusions larger than 40–50 mm in size. As regards separators fitted with rotating cylindrical inductors, it is advisable to use them for separating fine-fraction mixtures; whereas in processing large fractions of metal-containing wastes these separators show less efficient performance.*

**Key words:** electrodynamic separation, traveling magnetic field, secondary element, surface effect

радиотехнической промышленности, электролампового производства, автомобильный лом и т.п.);

очистка сыпучих материалов от металлических включений (очистка отработанных формовочных смесей от скрапа в литейном производстве и т.п.);

сортировка сложного цветного металлолома при подготовке его к металлургическому переделу: разделение лома по крупности, удельной массе, электропроводности (отделение кускового лома от стружки; разделение сплавов, отличающихся только легирующими добавками, и т.п.);

обогащение алюминиевых шлаков.

Во всех перечисленных случаях достигается большой экономический и экологический эффект, что делает актуальной проблему разработки электродинамических сепараторов.

Конструкции электродинамических сепараторов определяются методами возбуждения бегущего магнитного поля, а также способами подачи и отвода материалов. Наиболее часто применяются сепараторы на основе линейных индукторов с трехфазной обмоткой или с вращающимися магнитами (электромагнитами). Выбор конкретного варианта

зависит от решаемой технологической задачи, производительности установок и размера извлекаемых металлических включений.

Разработка и исследование сепараторов является одним из научных направлений кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета. В УрФУ созданы установки электродинамической сепарации разных модификаций, разработаны математические модели и методики их расчета, совместно с заинтересованными предприятиями выполняются конкретные производственные технологии [3–5]. Это позволяет теоретически и экспериментально исследовать закономерности изменения эффективности работы сепараторов от различных факторов (размеров и формы извлекаемых проводящих предметов, электропроводности материалов, частоты и интенсивности бегущего магнитного поля и т.п.) и получать практические рекомендации для создания промышленных установок.

Ранее в [5] авторы показали, что наибольшее влияние на характеристики сепараторов оказывает ограничение размеров ВЭ (извлекаемых частиц), которые часто не превышают длину волны бегущего магнитного поля  $\lambda$ . Ограничение продольного  $b$  и поперечного  $a$  размеров ВЭ обуславливает перераспределение вторичных токов и приводит к снижению электромагнитного усилия и эффективности сепарации.

В статье оценивается влияние поверхностного эффекта во вторичном элементе на характеристики электродинамических сепараторов. При этом наиболее наглядные результаты получаются при использовании математической модели сепаратора с линейным индуктором, описанной в [3]. В такой модели не учитываются продольные краевые эффекты ЛИМ, связанные с разомкнутостью линейного индуктора, а также поперечный эффект и эффект толщины, характерные для массивного ВЭ.

При создании модели использовался подход, хорошо апробированный в работах А.И. Вольдека [6]. Плоский прямоугольный ВЭ, имеющий размеры  $a \times b \times d$ , заполняет в модели всю высоту зазора  $d$  с соответствующей корректировкой удельной электропроводности  $g' (d/d)$ . Первичный и вторичный токи равномерно распределены по зазору с объемными плотностями  $J_1$  и  $J_2$  соответственно. В такой постановке магнитное поле в коротком ВЭ описывается обыкновенным дифференциальным уравнением Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} - a \epsilon_0 (1-s) \frac{\partial H_z}{\partial x} - ja^2 \epsilon_0 H_z = ja J_{1m} e^{-jax}, \quad (1)$$

где  $H_z$  – нормальная составляющая напряженности магнитного поля в пределах ВЭ;  $a = p/t$ ;  $s$  – скольжение;  $J_{1m}$  – амплитуда объемной плотности первичного тока;  $x$  – координата в направлении движения бегущего магнитного поля;  $\epsilon_0$  – электромагнитная добротность ЛИМ:

$$\epsilon_0 = \frac{w m_0 g d}{a^2 d}, \quad (2)$$

где  $w = 2\pi f$  – циклическая частота тока индуктора;  $g$  – удельная электропроводность ВЭ;  $m_0$  – магнитная проницаемость немагнитного ВЭ.

Решение (1) может быть получено в виде

$$H_z(t, x) = H_0 e^{j\omega t} e^{\underline{s}_0 x} + H_1 e^{j\omega t} e^{\underline{s}_1 x} + H_0 e^{j\omega t} e^{\underline{s}_2 x}, \quad (3)$$

где  $\underline{s}_0 = -ja$ ;  $\underline{s}_{1,2} = a \frac{\epsilon_0 (1-s)}{2} \pm \sqrt{\frac{\epsilon_0^2 (1-s)^2}{4} + j\epsilon_0}$

Представление всех трех слагаемых решения (3) в одинаковой форме записи

$$H_n(x, t) = H_{m(n)} e^{\text{Re} \underline{s}_n x} e^{j(\omega t + \text{Im} \underline{s}_n x)}, \quad n = 0, 2 \quad (4)$$

определяет их как бегущие волны магнитного поля с фазовой скоростью

$$v_n = \frac{w}{\text{Im} \underline{s}_n} \quad (5)$$

и в общем случае с уменьшающейся вдоль движения амплитудой, мерой изменения которой служит глубина проникновения (расстояние, на котором амплитуда волны затухает в  $e \approx 2,72$  раз):

$$D_n = \frac{1}{\text{Re} \underline{s}_n}. \quad (6)$$

Поскольку работоспособность и эффективность электродинамических сепараторов определяются начальным ускорением, сообщаемым извлекаемой проводящей частице, то для анализа их характеристик допустимо ограничиться режимом короткого замыкания ( $s=1$ ), в этом случае

$$D_1 = D_2 = D = \pm \frac{t}{p} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_0}}. \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) можно представить магнитное поле в коротком ВЭ (3) в виде чисто гармонической волны, создаваемой индуктором, и двух затухающих волн, движущихся встречно от краев ВЭ. Возникновение затухающих волн поля имеет вполне четкий физический смысл и объясняется возникновением в коротком ВЭ магнитного поверхно-

стного эффекта. Как известно [7], этот эффект состоит в вытеснении магнитного поля и индуцированной плотности тока от центра проводника к поверхности (раздела сред с различными электрическими и магнитными свойствами). Для принятой модели ЛИМ такими границами «проводник–воздух» будут продольные поверхности ВЭ. Наличие указанного эффекта показывает пространственное распределение огибающих напряженности магнитного поля и плотности вторичного тока. Примеры такого распределения приведены на рис. 1.

Отметим, что для вращающихся асинхронных двигателей с массивным ротором и ЛИМ с протяженным массивным ВЭ проявление магнитного поверхностного эффекта возможно только вдоль двух осей машины: поперечной  $y$  и (или) нормальной  $z$ . Поскольку электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах определяется преимущественно характером продольных

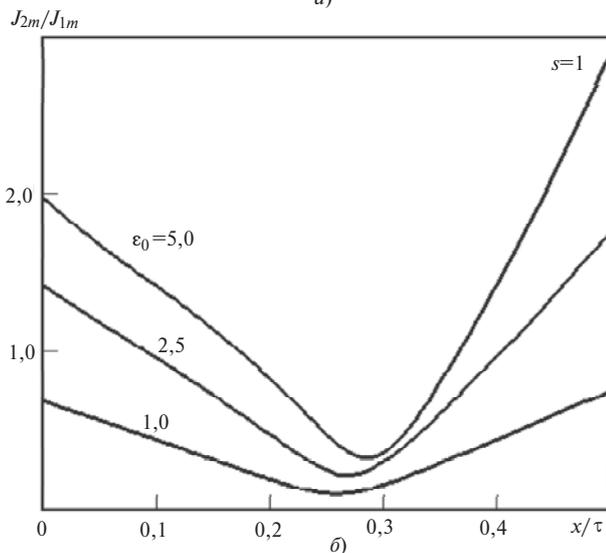
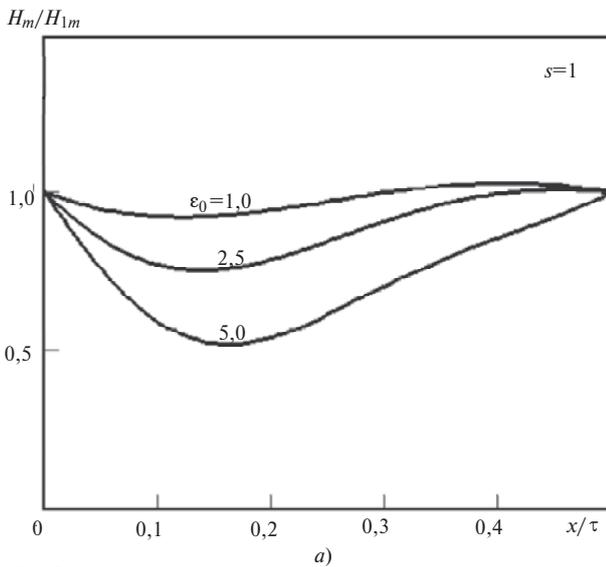


Рис. 1. Распределение относительных значений напряженности магнитного поля (а) и плотности вторичного тока (б) в коротком ВЭ с относительной длиной  $b/t = 0,5$

распределений индукции  $B_z(x)$  и вторичной плотности тока  $J_{2y}(x)$ , следует ожидать, что магнитный поверхностный эффект должен оказывать непосредственное влияние на характеристики электродинамических сепараторов.

Для подтверждения этого предположения обратимся к выражению тягового усилия одномерной модели ЛИМ с коротким ВЭ [3]:

$$F_x = \frac{\mu_0 b a d}{4a} J_{1m}^2 \frac{2\epsilon_0 s}{1 + \epsilon_0^2 s^2} \text{Re}[1 - \underline{k}_1 + \underline{k}_2], \quad (8)$$

которое представим в виде

$$F_x = F_m \frac{2\epsilon_0 s}{1 + \epsilon_0^2 s^2} k_b = F_m F_*, \quad (9)$$

где  $F_m = \frac{\mu_0 b a d}{4a} J_{1m}^2$  – максимальное усилие, принимаемое за базовое;  $F_* = \frac{2\epsilon_0 s}{1 + \epsilon_0^2 s^2} k_b$  – нормированное усилие;  $k_b = \text{Re}[1 - \underline{k}_1 + \underline{k}_2]$  – коэффициент, учитывающий конечную длину ВЭ;

$$\underline{k}_1 = (1 - j\epsilon_0 s) \frac{e^{\underline{s}_2 b} - e^{-j a b}}{e^{\underline{s}_1 b} - e^{\underline{s}_2 b}} \frac{1 - e^{(\underline{s}_1 + j a) b}}{(\underline{s}_1 + j a) b};$$

$$\underline{k}_2 = (1 - j\epsilon_0 s) \frac{e^{\underline{s}_1 b} - e^{-j a b}}{e^{\underline{s}_1 b} - e^{\underline{s}_2 b}} \frac{1 - e^{(\underline{s}_2 + j a) b}}{(\underline{s}_2 + j a) b}.$$

Анализ (9) на экстремум показывает, что максимум усилия достигается при  $\epsilon_0 s = 1$  и для режима короткого замыкания при  $\epsilon_0 = 1$ . Применительно к электродинамическим сепараторам такой максимум электромагнитного усилия будет определять

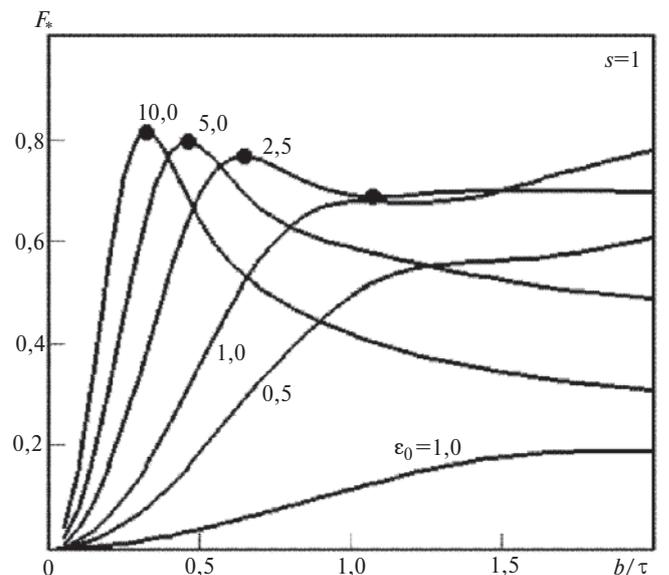


Рис. 2. Зависимости нормированного усилия ЛИМ сепаратора от относительной длины ВЭ

предельно достижимое значение начального ускорения извлекаемой проводящей частицы ( $F_m = F_x / m$ , м/с<sup>2</sup> или Н/кг). Нормированное усилие  $F_*$  показывает искажение электромагнитного усилия, обусловленное ограничением размеров ВЭ. На рис. 2 показаны зависимости  $F_*$  от относительной длины ВЭ  $b/t$  при заданных значениях электромагнитной добротности. Обращает на себя внимание экстремальный характер кривых, все более заметный с ростом  $\epsilon_0$ .

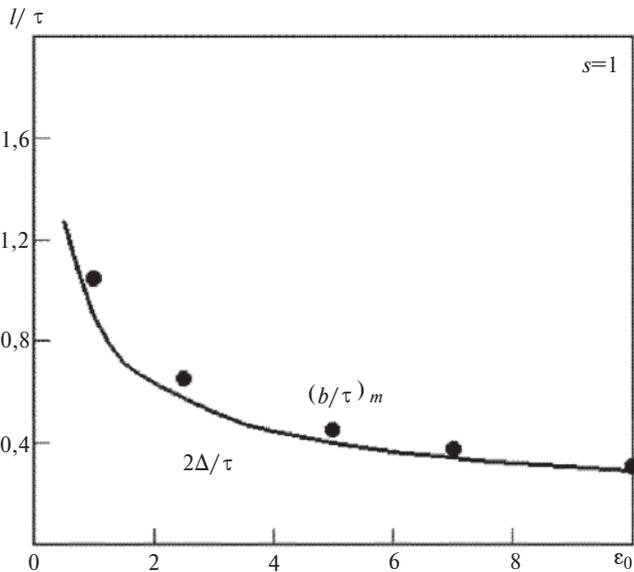


Рис. 3. К оценке связи между местоположением экстремумов кривых  $F_*(b/t)$  и глубиной проникновения

Местоположение экстремумов четко связано с проявлением поверхностного эффекта в коротком ВЭ. Например, на рис. 3 показано практическое совпадение местоположений экстремумов  $(b/t)_m$  с двойной глубиной проникновения ( $2D$ ), отнесенной к значению полюсного деления  $t$ . Это соответствует признаку резко выраженного поверхностного эффекта [7].

С учетом (7) получаем:

$$(b/t)_m = \pm \frac{2}{p} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_0}}. \quad (10)$$

Выражение (10) показывает, что форма зависимостей  $F_*(b/t)$  и местоположение их экстремумов однозначно определяются значением электромагнитной добротности  $\epsilon_0$ . Расчеты по (2) показывают, что электродинамические сепараторы на основе ЛИМ, работающие на частоте 50 Гц и имеющие относительно большие рабочие немагнитные зазоры ( $d > 2-3d$ ), позволяют достичь значения электромагнитной добротности на уровне  $\epsilon_0 = 0,5-2,5$  (оценка дана для наиболее часто обрабатываемых цветных металлов – алюминиевых и медных сплавов). Как видно из рис. 2, в этом случае экстре-

мы зависимостей  $F_*(b/t)$  располагаются в пределах  $(0,5-1,5)t$ , а сами зависимости в указанном диапазоне являются достаточно пологими. В области меньших размеров ВЭ ( $b/t < 0,5$ ) электромагнитное усилие, развиваемое сепаратором, резко уменьшается. Сказанное объясняет, почему электродинамические сепараторы на основе ЛИМ, работающие на частоте 50 Гц, эффективны только при крупности извлекаемых проводящих тел, большей 40–50 мм.

В случае сепарации мелких фракций металлосо-держащих отходов достижение приемлемых усилий возможно только при увеличении интенсивности и частоты магнитного поля. Первый путь ограничивается ростом энергопотребления ЛИМ сепараторов и предельно допустимой тепловой нагрузкой их обмоток. Увеличение частоты магнитного поля в ЛИМ при питании их от преобразователей частоты также нецелесообразно из-за быстрого роста потерь в стальных сердечниках.

Для обработки мелкофракционных смесей предпочтительны электродинамические сепараторы с индукторами на основе вращающихся магнитов либо электромагнитов, в которых повышенные

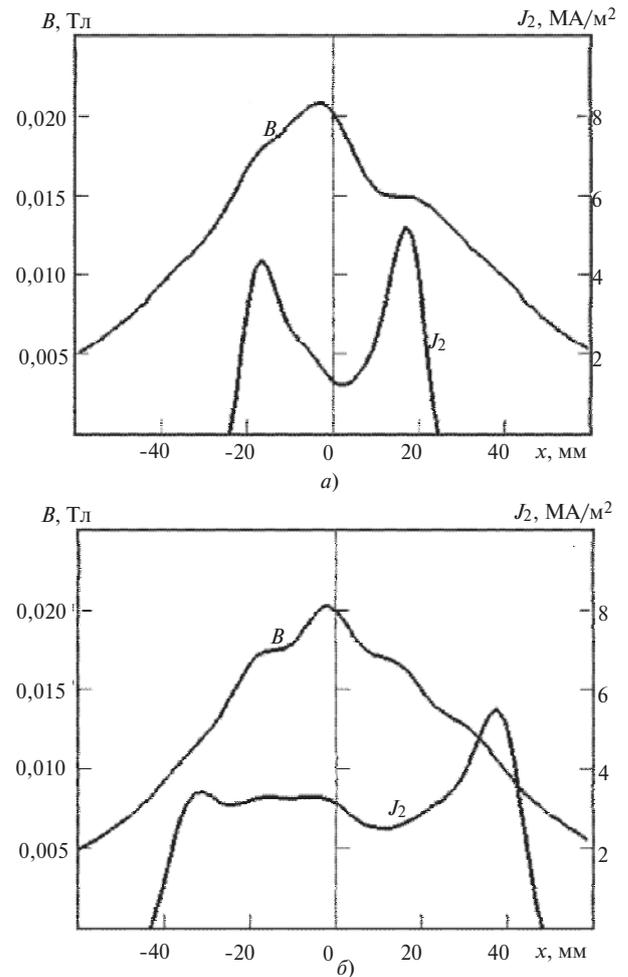


Рис. 4. Распределение индукции  $B(x)$  и плотности вторичных токов  $J_2(x)$  по длине ВЭ сепаратора с вращающимся индуктором: а –  $b/t = 0,69$ ; б –  $b/t = 1,38$

значения частоты магнитного поля обеспечиваются увеличением скорости приводных электродвигателей. При числах пар полюсов  $2p=6, 10$  и вполне достижимых значениях частоты вращения индукторов 3000–6000 об/мин частота магнитного поля сепаратора может составлять от 100 до 1000 Гц.

Электромагнитные процессы в таких сепараторах аналогичны процессам в ЛИМ с коротким ВЭ. При этом из-за малых размеров ВЭ (извлекаемых проводящих частиц) возрастает влияние на электромагнитное усилие описанных выше эффектов перераспределения вторичных токов. В то же время отличительной особенностью сепараторов на основе цилиндрических вращающихся индукторов является неравномерный воздушный зазор (относительно плоского ВЭ), что обуславливает резкое снижение индукции магнитного поля от середины – к краям ВЭ. Соответственно, неизбежное с ростом частоты магнитного поля проявление магнитного поверхностного эффекта в ВЭ приведет к вытеснению вторичных токов к краям ВЭ, в область пониженных значений магнитной индукции. Сказанное иллюстрируется зависимостями на рис. 4. Расчеты выполнены для шестиполюсного индуктора диаметром 111 мм и полюсным делением  $t=58,1$  мм при частоте  $f=250$  Гц и амплитуде линейной плотности тока на поверхности индуктора  $J_{1п} = 14,5$  кА/м.

Описанное явление существенно изменяет характер зависимостей электромагнитных усилий от размеров ВЭ. Так, на рис. 5 приведены зависимости удельного усилия, рассчитанные для описанного выше сепаратора с вращающимся индуктором и аналогичного ему сепаратора на основе ЛИМ (с

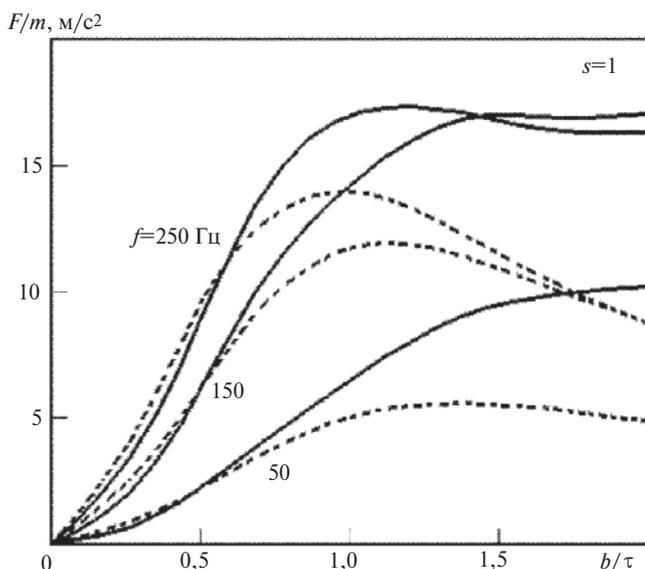


Рис. 5. Зависимости удельного электромагнитного усилия сепаратора от относительной длины ВЭ для линейного (сплошные линии) и вращающегося (пунктир) индукторов

тем же полюсным делением  $t=58,1$  мм). В сепараторах на основе ЛИМ зависимости  $F/m(b/t)$  стремятся к установившемуся значению, поскольку с увеличением длины ВЭ электромагнитное усилие и масса ВЭ растут пропорционально размеру. В сепараторах с вращающимся цилиндрическим индуктором в области больших значений относительной длины ВЭ наблюдается резкое падение удельного усилия. Это объясняется тем, что при росте массы ВЭ усилие перестает расти и может даже снижаться из-за вытеснения вторичных токов в область слабых магнитных полей.

В случае вращающихся индукторов обращает на себя внимание смещение экстремумов удельного усилия при росте частоты в область меньших размеров ВЭ. При прочих равных условиях это можно объяснить влиянием рассмотренного ранее магнитного поверхностного эффекта, обуславливающего вытеснение вторичных токов к краям ВЭ и соответствующее понижение усилия с ростом частоты.

**Вывод.** Исследования показали существенное влияние поверхностного эффекта на эффективность электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем, что следует учитывать при выборе конструкций и параметров сепараторов. Обнаруженные закономерности показывают, что сепараторы на основе линейных индукционных машин предпочтительны при сепарации металлосодержащих смесей при крупности металлических включений, большей 40–50 мм. В то же время сепараторы с вращающимися цилиндрическими индукторами целесообразно использовать при сепарации мелкофракционных смесей, а при обработке крупных фракций металлосодержащих отходов эффективность таких сепараторов снижается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Олейник А.В. Технология отходов. – М.: Альфа-М, Инфра-М, 2011, 352 с.
2. Колобов Г.А., Бредихин В.Н., Чернобаев В.М. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. – М.: Металлургия, 1993, 288 с.
3. Коняев А.Ю., Назаров С.Л. Особенности расчета электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем. – Электротехника, 1995, № 10, с. 56–613.
4. Коняев А.Ю., Назаров С.Л. Исследование характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели. – Электротехника, 1998, № 5, с. 52–58.
5. Коняев А.Ю., Коняев И.А., Маркин Н.Е., Назаров С.Л. Оценка характеристик линейных индукционных машин при ограничении размеров вторичного элемента. – Электричество, 2010, № 4, с. 32–36.
6. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970, 272 с.

7. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Гардарики, 2003, 317 с.

[16.05.13]

*Авторы: **Коняев Андрей Юрьевич** окончил Уральский политехнический институт (УПИ). В 1996 г. защитил докторскую диссертацию «Линейные индукционные машины для технологического электромагнитного воздействия на обрабатываемые электропроводящие изделия и материалы». Профессор кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета.*

***Коняев Иван Андреевич** окончил УГТУ-УПИ в 2005 г. В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию «Электродинамические сепараторы с вращающимся магнитным полем». Доцент кафедры «Электрические машины» Уральского федерального университета.*

***Назаров Сергей Леонардович** окончил электротехнический факультет УПИ в 1979 г. по специальности «Электрические машины». В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию «Линейные асинхронные машины с повышенными электромагнитными нагрузками на вторичном элементе с массивным ферромагнитным сердечником».*