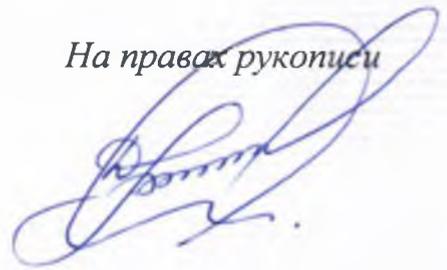


*На правах рукописи*



Багин Дмитрий Николаевич

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СЕПАРАТОРЫ НА ОСНОВЕ  
ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН ДЛЯ ОБРАБОТКИ  
МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ ЛОМА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
**Коняев Андрей Юрьевич**
- Официальные оппоненты: **Аипов Рустам Сагитович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», заведующий кафедрой  
электрических машин и электрооборудования;
- Бегалов Владимир Анатольевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ООО «Тепловодоканал» г. Среднеуральск,  
Свердловской обл., ведущий инженер отдела  
технического обслуживания и внедрения систем автоматизации
- Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Защита диссертации состоится «26» октября 2016 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://1ib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=257276>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  Зюзев Анатолий Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем на основе линейных индукционных машин (ЛИМ) успешно применяются для извлечения цветных металлов из различных видов отходов производства и потребления (кабельный и автомобильный лом, отходы электро- и радиотехнической промышленности, отработанные формовочные пески литейного производства, твердые бытовые отходы и т.п.). Рассматриваемые технологические задачи можно разделить на два типа: в первом случае из потока обрабатываемых материалов выделяются металлические частицы, т.е. происходит разделение металлов и неметаллов, во втором происходит разделение проводящих частиц по физическим свойствам (сортировка лома цветных металлов, сепарация электронного лома и др.). При решении задач второго типа повышается эффективность последующих металлургических процессов: повышается качество выплавляемых сплавов, уменьшается энергопотребление, улучшаются экологические показатели. Для получения селективных концентратов сплавов цветных металлов электродинамические сепараторы практически не имеют альтернативы. В указанных случаях на сепарацию поступают дробленые материалы с крупностью частиц не более 40-50 мм. При этом ЛИМ сепаратора можно рассматривать как линейный асинхронный двигатель с вторичным элементом (ВЭ) малых размеров, в большинстве случаев меньшим половины полюсного деления  $\tau$ . С учетом возрастающих потребностей в сортировке лома и отходов цветных металлов разработка электродинамических сепараторов на основе ЛИМ с ВЭ малых размеров является актуальной.

**Степень разработанности проблемы исследования.** Как в нашей стране, так и за рубежом для электродинамической сепарации чаще всего используются сепараторы на основе индукторов с постоянными магнитами. Такие сепараторы отличаются малым энергопотреблением и позволяют извлекать металлические включения из потока смешанных отходов. Однако для индукционной сортировки лома и отходов цветных металлов такие сепараторы малоэффективны, так как не обеспечивают требуемой селективности разделения сплавов цветных металлов. Для решения такой задачи целесообразны электродинамические сепараторы на основе ЛИМ с подачей материалов по наклонной плоскости, позволяющие формировать требуемые траектории частиц разделяемых сплавов за счет подбора параметров как ЛИМ, так и механической части установки. К сожалению, разработке таких установок не уделяется достаточно внимания. В то же время физические процессы в ЛИМ с ВЭ малых размеров и в сепараторах на их основе имеют ряд особенностей, которые не позволяют использовать известные математические модели и методики расчета электродинамических сепараторов. Например, рассматриваемые ЛИМ характеризуются относительно малыми электромагнитными усилиями. При этом возрастает влияние на результаты сепарации механических сил, действующих на извлекаемые частицы. Методы расчета траекторий движения частиц с учетом совместного действия электромагнитных и механических сил также не разработаны.

Работа выполнялась на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета в рамках госбюджетной

НИР № Н975 42Б 00312/2 «Разработка научных основ и моделирование энерго-сберегающих электротехнологических и специальных электромеханических систем», а также по заказам предприятий ЗАО «НПФ «Металл-Комплект»» (г. Каменск-Уральский) и ЗАО «Южно-Уральский специализированный центр утилизации» (г. Миасс).

**Цель исследования:** разработка электродинамических сепараторов на основе линейных индукционных машин для обработки мелких фракций лома и отходов цветных металлов.

Для достижения данной цели решались следующие исследовательские **задачи:** разработка математических моделей и методик расчета как ЛИМ, так и электродинамического сепаратора в целом; выявление закономерностей протекания электромагнитных процессов в ЛИМ с малыми размерами ВЭ (менее 40 мм) и развитие теории таких машин; анализ факторов, влияющих на эффективность сепарации, при рассмотрении электродинамического сепаратора как электромеханической системы; разработка рекомендаций по проектированию и эксплуатации рассматриваемых сепараторов, а также апробация результатов исследований на опытных образцах.

**Областью исследования** в работе определены специальные электрические машины и электромеханические устройства технологического назначения.

**Объектом исследования** являются линейные индукционные машины с вторичными элементами малых размеров и электродинамические сепараторы на основе таких ЛИМ с подачей материалов по наклонной плоскости.

**Научная новизна результатов исследований** состоит в следующем:

1. Разработаны алгоритмы и методики расчета электромагнитных сил, действующих на проводящие частицы в магнитном поле линейного индуктора, с учетом специфики физических процессов в ЛИМ с ВЭ малых размеров (менее 40 мм) на основе развития известных аналитических и численных методов расчета ЛИМ.

2. Разработаны математическая модель и методика расчета боковых электромагнитных сил, действующих на ВЭ малых размеров при входе их в магнитное поле ЛИМ и выходе из него.

3. Разработана математическая модель электродинамического сепаратора на основе ЛИМ с подачей материала по наклонной плоскости для расчета траекторий движения сепарируемых проводящих частиц с учетом совместного действия электромагнитных и механических сил.

4. Выявлены закономерности влияния на характеристики сепараторов различных параметров ЛИМ и механической части установок.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Раскрыты особенности физических процессов в ЛИМ с ВЭ малых размеров и электродинамических сепараторах на их основе.

2. Разработаны методики и программы расчета тяговых и боковых электромагнитных сил с учетом специфики ЛИМ с ВЭ малых размеров.

3. Разработаны методика и программа расчета траекторий движения сепарируемых частиц в сепараторе на основе ЛИМ, предполагающие переход от решения нелинейных уравнений к решению линейных алгебраических уравне-

ний за счет разбиения расчетных зон модели на участки малой длины, в пределах которых коэффициенты уравнений остаются постоянными.

4. Выявлены факторы, влияющие на эффективность сепарации. Получены рекомендации по выбору параметров ЛИМ и механической части установок.

5. Экспериментально подтверждены возможности индукционной сортировки сплавов цветных металлов и электронного лома.

6. Созданы опытные установки электродинамической сепарации, результаты исследований переданы предприятиям – партнерам.

**Методология и методы исследований.** В теоретической части работы использованы известные методы теоретической электротехники и теории электрических машин. Математические модели для расчета тяговых и боковых электромагнитных сил построены на основе решения полевых задач в двумерной постановке. Решение системы нелинейных уравнений, описывающих движение сепарируемых проводящих частиц в сепараторе с учетом электромагнитных и механических сил, заменяется решением системы линейных уравнений, получаемой за счет разбиения зоны сепарации на участки малой длины. Методики расчетов реализованы в математических пакетах Mathcad и Elcut. Результаты расчетов проверены и дополнены данными экспериментальных исследований, полученных на опытных образцах сепараторов на основе ЛИМ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритмы и методики расчета электромагнитных сил, действующих на проводящие частицы в магнитном поле линейного индуктора, с учетом специфики физических процессов в ЛИМ с ВЭ малых размеров (менее 40 мм).

2. Математическая модель и методика расчета боковых электромагнитных сил, действующих на ВЭ малых размеров при входе их в магнитное поле ЛИМ и выходе из него.

3. Математическая модель электродинамического сепаратора на основе ЛИМ с подачей материала по наклонной плоскости и методика расчета траекторий движения сепарируемых проводящих частиц с учетом совместного действия электромагнитных и механических сил.

4. Рекомендации по выбору параметров ЛИМ (полюсного деления и частоты) и механической части сепараторов (размеры плоскости подачи, угол ее наклона, скорость подачи, коэффициенты трения).

5. Рекомендации по подготовке лома и отходов цветных металлов, а также электронного лома к сепарации, полученные на основе анализа влияния различных факторов на селективность сепарации.

6. Результаты экспериментальных исследований опытных установок электродинамической сепарации и апробации технологий индукционной сортировки сплавов цветных металлов и сепарации электронного лома.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается сравнением результатов расчетов, полученных по разным методикам; сопоставлением с данными экспериментов; соответствием результатов расчетов физическому смыслу процессов в ЛИМ и сепараторе в целом.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, семинарах, совещаниях.

В том числе на II и III Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» (Екатеринбург, 2011, 2014); X и XI Международных научно-технических конференциях «Проблемы и достижения в промышленной энергетике» (Екатеринбург, 2011, 2012); 2-й и 4-й, Международных научно-технических конференциях «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии» (Екатеринбург, 2012, 2015); 7-й и 8-й Международных научно-технических конференциях «Система управления экологической безопасностью» (Екатеринбург, 2013-14); XLIV Международной научно-технической конференции «Федоровские чтения» (Москва, 2014); Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2014); I и II Международной НТК «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике» (Пермь, 2015, 2016).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 18 научных работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Содержит 137 страниц основного текста, 71 рисунок и 11 таблиц, список литературы, включающий 109 наименований и приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, освещается состояние научной разработанности проблемы, формулируются цель и задачи, определяются область и объект исследования, раскрывается научная новизна, излагается теоретическое и практическое значение работы, перечисляются положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов.

В **первой главе** сделан обзор вариантов конструкций электродинамических сепараторов и технологических задач, решаемых с помощью электродинамической сепарации.

Особое внимание уделено задачам индукционной сортировки сплавов при предварительной обработке лома и отходов цветных металлов, а также сепарации электронного лома. Показано, что на сепарацию материалы поступают после дробления с крупностью частиц цветных металлов не более 40-50 мм. Это означает, что при разработке электродинамических сепараторов возникают задачи расчета ЛИМ с ВЭ малых размеров. Отмечено, что для рассматриваемых технологических задач основным показателем эффективности сепарации является селективность разделения на фракции металлов и сплавов. Как показывает обзор литературы, для решения задач сортировки лома и отходов цветных металлов используются варианты сепараторов, показанные на рисунках 1-2.

Сепараторы шкивного (барабанного) типа предполагают подачу материала с помощью конвейера, либо вибропитателя. На выходе все подаваемые материалы под действием механических сил перемещаются по параболической траектории, зависящей от скорости конвейера и от диаметра шкива. Электромагнитные силы, действующие на проводящие частицы, изменяют траектории их движения, заставляя перемещаться в отдаленные приемники.

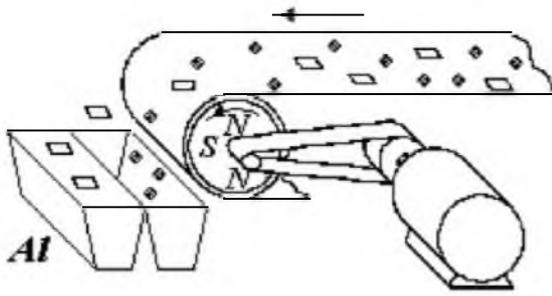


Рисунок 1 – Электродинамический сепаратор шкивного типа с вращающимся магнитным полем

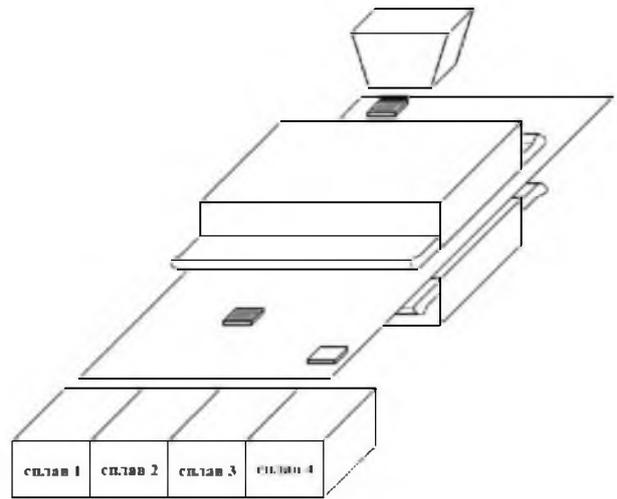


Рисунок 2 – Схема сепаратора на основе ЛИМ с подачей материалов по наклонной плоскости

В случае ВЭ малых размеров электромагнитные силы могут быть меньше центробежных и различия в траекториях движения частиц с разными физическими свойствами уменьшаются. В сепараторах на основе ЛИМ с подачей материала по наклонной плоскости и отводом выделяемых продуктов в сторону от потока по сравнению с сепараторами шкивного типа увеличиваются время пребывания частиц в активной зоне индуктора и отклонения частиц от линии подачи под действием электромагнитных сил. В таких сепараторах имеется больше возможностей для формирования необходимых траекторий движения за счет выбора параметров как ЛИМ (полюсное деление, частота, зазор), так и механической части установок (размеры плоскости подачи, угол ее наклона, материал, из которого изготовлена плоскость и др.). Такие дополнительные возможности формирования траектории движения частиц являются достоинством этого варианта электродинамических сепараторов, обеспечивающим селективность разделения металлов. В силу указанных причин, электродинамический сепаратор на основе двустороннего линейного индуктора с подачей материала по наклонной плоскости выбран в качестве объекта исследования в работе.

Во **второй главе** выявлены и систематизированы особенности ЛИМ с ВЭ малых размеров и сепараторов на их основе; обоснован выбор математических моделей и методик расчета ЛИМ, которые модифицированы для случая ВЭ малых размеров; представлены разработанные математические модели и выражения для расчета боковых электромагнитных усилий, возникающих при входе частиц в магнитное поле ЛИМ и выходе из него в направлении, поперечном по отношению к направлению бегущего магнитного поля; дана оценка боковых электромагнитных сил и сил отталкивания, действующих на частицу.

Можно выделить следующие особенности рассматриваемых устройств:

1. В рассматриваемых задачах сепарации дробленых лома и отходов цветных металлов размеры извлекаемых частиц, выполняющих функцию ВЭ ЛИМ, значительно меньше размеров индуктора: длина в направлении движения поля  $b < 0,5\tau$ , ширина  $a \ll L_{ин}$  ( $L_{ин}$  – ширина индуктора). Ограничение размеров

ВЭ приводит к существенному перераспределению вторичных токов и уменьшению развиваемых электромагнитных усилий. Изменение конфигурации вторичных токов, связанное с ограничением продольного размера ВЭ  $b$  иллюстрируется на рисунке 3. Видно, что часть периода во ВЭ может существовать два контура вторичных токов, а часть – один контур. Расчеты показывают, что при  $b < 0,5\tau$  преобладает одноконтурное распределение вторичных токов (рис.4).

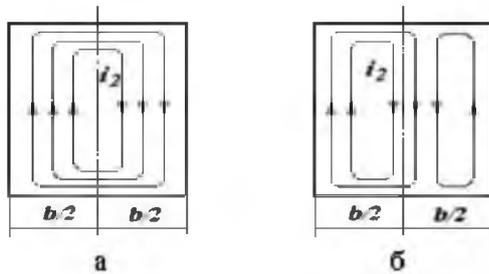


Рисунок 3 – Распределение вторичных токов в разные моменты времени (а - одноконтурное, б - двухконтурное)

Допущение об одноконтурном распределении вторичных токов для случая  $b < 0,5\tau$  позволяет использовать для учета поперечного краевого эффекта коэффициент  $k_{\text{поп}}$ , зависящий только от размеров частицы, что существенно упрощает расчеты:

$$k_{\text{поп}} = 1 - \frac{2b}{\pi a} \cdot \text{th} \frac{\pi a}{2b} \quad (1)$$

2. Другой особенностью ЛИМ с ВЭ малых размеров является смещение экстремумов зависимостей удельного электромагнитного усилия  $F_m$  (Н/кг) от частоты  $f$  в сторону повышенных частот. На рисунке 5 показаны характеристики одной из опытных ЛИМ. В качестве ВЭ использованы пластины ( $40 \times 40 \times 2$  мм) из разных алюминиевых сплавов с удельными электропроводностями  $\gamma = 35, 28, 20, 15$  МСм/м (соответствуют цифрам 1-4 на графиках). Нетрудно видеть, что для извлечения алюминия из отходов (задачи 1-го типа) предпочтительно

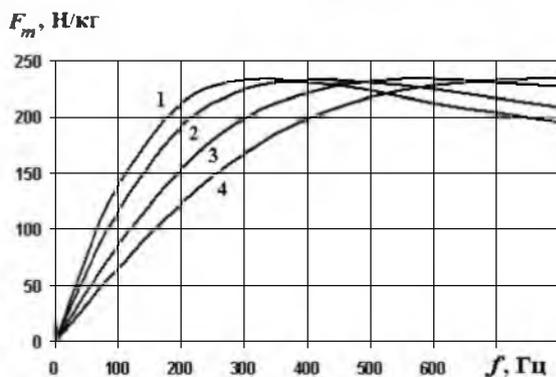


Рисунок 5 – Зависимости удельного электромагнитного усилия от частоты

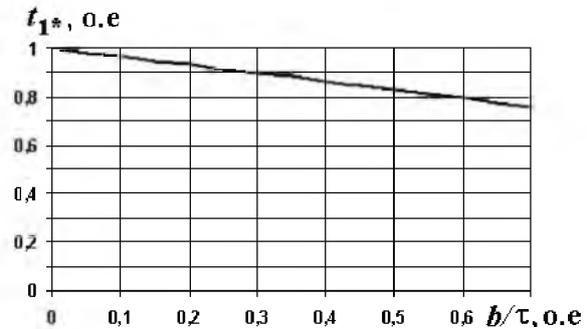


Рисунок 4 – Оценка доли времени существования одноконтурного распределения вторичных токов

использовать частоту поля  $f \approx 500$  Гц, при которой для всех групп сплавов развиваются усилия, близкие к максимальным. Для решения технологических задач второго типа, связанных с сортировкой цветных металлов, увеличение частоты поля нежелательно (при пересечении характеристик сортировка сплавов невозможна). В данном случае для достижения требуемой селективности сепарации целесообразно работать

на линейном участке характеристик, где различия удельных усилий максимальны. В приведённом примере предпочтительна частота 50 Гц.

3. Можно отметить, что вид механической характеристики ЛИМ с ВЭ малых размеров близок к прямолинейной зависимости, как видно на рисунке 6.

Расчеты выполнены для ЛИМ с двухсторонним индуктором ( $\tau = 75$  мм и  $\delta = 12$  мм). Варианты размеров медных пластин в плоскости ( $a = b$ ) соответствуют цифрам на графиках: 1 –  $2\tau$ , 2 –  $\tau$ , 3 –  $0,5\tau$ , 4 –  $0,4\tau$ , 5 –  $0,2\tau$ . Линейность механической характеристики ЛИМ с малым ВЭ может быть использована для облегчения многовариантных расчетов рассматриваемых сепараторов.

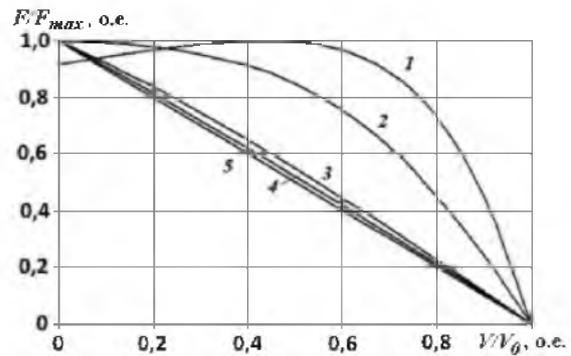


Рисунок 6 – Механические характеристики ЛИМ при разных размерах ВЭ

4. Показана необходимость учета неравномерности распределения бегущего магнитного поля в активной зоне ЛИМ, влияние которой на развиваемые

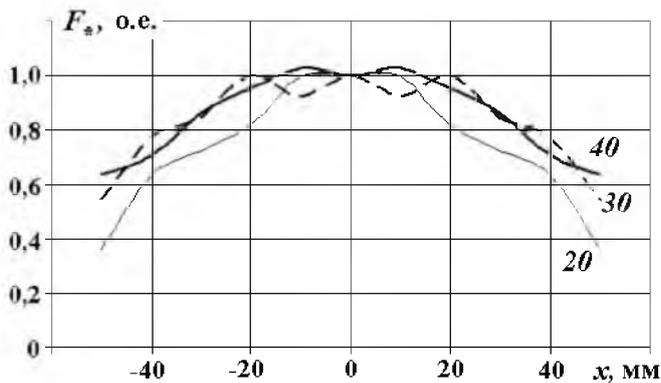


Рисунок 7 – Распределение усилия по длине ЛИМ при разном размере ВЭ (цифры на графиках, мм)

5. Снижение электромагнитных усилий с уменьшением размеров ВЭ делает их соизмеримыми с механическими силами, действующими на частицу в сепараторе. Это обуславливает необходимость расчета параметров движения частиц с учетом совместного действия электромагнитных и механических сил и необходимость учета боковых электромагнитных сил и сил отталкивания, которые ранее при расчетах сепараторов не учитывались.

Указанные особенности физических процессов были учтены при выборе и построении расчетных моделей и методик расчета как ЛИМ с ВЭ малых размеров, так и сепаратора на их основе. В частности, получили развитие аналитическая модель и методика расчета ЛИМ электродинамического сепаратора, разработанная ранее в УрФУ. Такая модель в двумерной постановке позволяла корректно учесть распределение токов, наводимых в ВЭ ограниченных размеров, и получить аналитическое выражение для электромагнитного усилия. Основным недостатком модели являлось допущение о бесконечной протяженности линейного индуктора, не позволяющее учесть неравномерность распреде-

электромагнитные усилия возрастает с уменьшением размеров ВЭ. Сказанное иллюстрируется кривыми распределения усилий, действующих на квадратные алюминиевые пластины, по длине индуктора одной из двухполюсных ЛИМ полученными опытным путем и приведенными на рисунке 7. Для удобства сравнения электромагнитные усилия приведены в относительных единицах.

ления магнитного поля в ЛИМ. Предлагаемые изменения методики для расчета ЛИМ с ВЭ малых размеров с учетом неравномерности распределения магнитного поля сводятся к следующему:

1. Выполняется расчет магнитного поля ЛИМ любым из численных методов, либо аналитически. Рассчитывается среднее (эквивалентное) значение магнитной индукции в месте расположения ВЭ малых размеров  $B_{mэ}$ :

$$B_{mэ} = \frac{\int_0^b B_m(x) \cdot dx}{b} . \quad (2)$$

2. Определяется амплитуда эквивалентной плотности тока индуктора  $J_{1mэ}$ , при которой достигается значение индукции  $B_{mэ}$

$$J_{1mэ} = \frac{\pi}{\mu_0 \tau} \cdot B_{mэ} . \quad (3)$$

3. По значениям  $J_{1mэ}$  рассчитывается электромагнитное усилие по полученному ранее аналитическому выражению. Изменяя месторасположение ВЭ в неравномерном поле индуктора, по указанному алгоритму получаем кривую распределения электромагнитных усилий в активной зоне ЛИМ.

Наиболее полный учет особенностей рассматриваемых ЛИМ с ВЭ малых размеров возможен при использовании численных методов расчета в трехмерной постановке. Такое решение требует больших вычислительных и временных ресурсов и малоприспособно для решения исследовательских задач и инженерной практики. В то же время возможно решение задачи в двухмерной (квазитрехмерной) постановке. При использовании пакета Elcut расчет магнитного поля на основе метода конечных элементов в рамках двухмерного подхода дополняется возможностью учета распределения вторичных токов с помощью цепной электрической схемы замещения. При этом, используя допущение об одноконтурном распределении токов в ВЭ малых размеров, можно рассчитать сопротивления элементов цепной схемы замещения с учетом коэффициента поперечного краевого эффекта  $k_{\text{поп}}$  по (1). В этом случае удастся учесть неравномерность распределения магнитного поля по длине линейного индуктора, его двухмерный характер, а также уточнить характер распределения токов во ВЭ малых размеров, что не допускалось в базовых версиях программы.

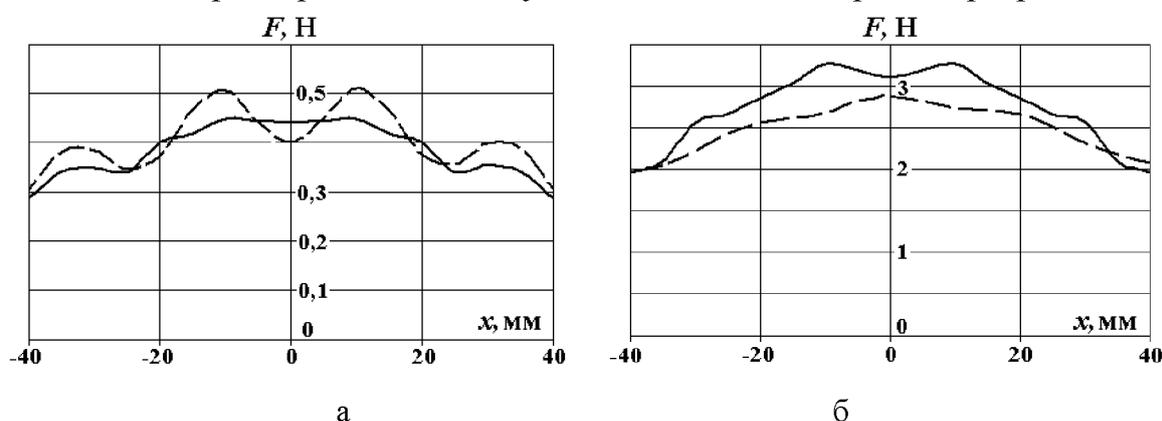


Рисунок 8 – Распределение электромагнитных усилий по длине ЛИМ: аналитический (сплошные линии) и численный (пунктир) методы

Можно отметить (рис. 8,а) хорошее совпадение результатов расчета по численной и аналитической модели при малых размерах ВЭ ( $a = b = 24 \text{ мм} = 0,36\tau$ ). В то же время с ростом относительного размера ВЭ ( $a = b = 40 \text{ мм} > 0,5\tau$ ) погрешности расчетов по разным моделям возрастают (рис. 8,б), что объясняется нарушением допущения о одноконтурном распределении вторичных токов.

В электродинамических сепараторах проводящие частицы, выполняющие роль ВЭ, входят в активную зону машины в поперечном направлении с боковых сторон индуктора. Возникающие в процессах «входа-выхода» частиц боковые электромагнитные усилия могут влиять на характер движения частиц в направлении поперечной оси  $y$ . При этом боковые усилия соизмеримы с механическими силами, участвующими в формировании траекторий движения частиц (гравитации, трения). Это обусловило необходимость разработки математической модели и методики расчета боковых электромагнитных сил. Такая модель была создана на основе допущения об одноконтурном распределении вторичных токов и с учетом малости размеров ВЭ по сравнению с  $\tau$  (рис. 9). Для аналитического решения задачи сложный характер распределения магнитного поля вблизи края индуктора (сплошная линия на рисунке 9) предложено заменить двумя участками, на которых поле описывается простыми зависимостями (пунктир): в центре активной зоны индуктора ЛИМ слева от оси  $y$  (на удалении от края, превышающем  $\delta/2$ ) – выражением:

$$B(y) = B_m \cdot \sin \omega t, \quad (4)$$

а справа от оси  $y$  – выражением:

$$B_{\text{пр}}(y) = B_m \cdot e^{-y/c\delta} \cdot \sin \omega t. \quad (5)$$

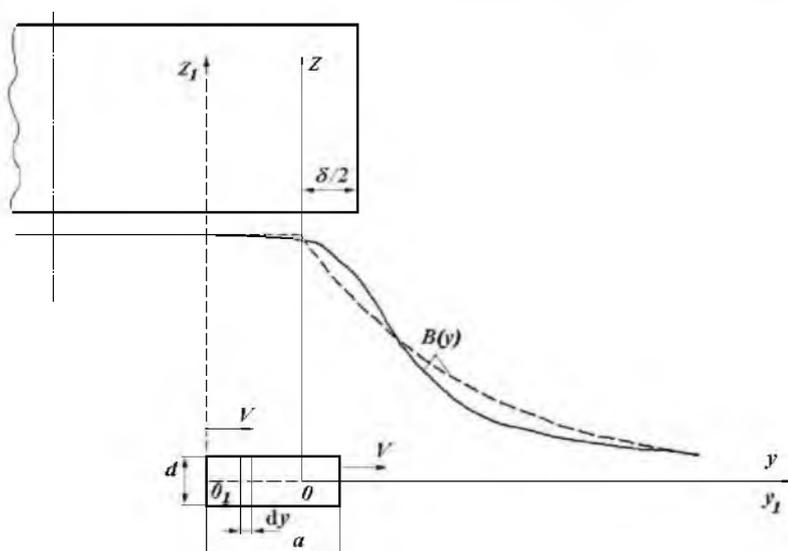


Рисунок 9 – К расчету боковых усилий: распределение поля вблизи края ЛИМ и выход ВЭ из него

С учетом (4) и (5) определяются потокосцепления элементарных проводников ВЭ сечением  $d \cdot dy$ , определяются наводимые в ВЭ ЭДС и токи с учетом условия непрерывности вторичных токов. В итоге получено аналитическое выражение для расчета бокового электромагнитного усилия в переходной зоне на краю индуктора в виде:

$$F_{\bar{\delta}} = B_m^2 \cdot \frac{\gamma \cdot d \cdot c\delta \cdot b}{2a} \cdot \cos \varphi_2 \cdot [(A_{\text{л1}} + A_{\text{пр1}}) \cdot \omega \cdot \sin \varphi_2 - (A_{\text{л2}} + A_{\text{пр2}}) \cdot V \cdot \cos \varphi_2], \quad (6)$$

где

$$A_{л1} = \left[ \frac{a \cdot y}{2c\delta} - \frac{y^2}{2c\delta} + y - c\delta \cdot (1 - e^{-y/c\delta}) \right] \cdot (y - a);$$

$$A_{л2} = \left[ \frac{y}{c\delta} - (1 - e^{-y/c\delta}) \right] \cdot (y - a);$$

$$A_{пр1} = \frac{a \cdot c\delta}{2} \cdot (e^{-2y/c\delta} - 1) + \left[ \frac{a^2}{2} - a \cdot y + \frac{y^2}{2} + a \cdot c\delta - c\delta \cdot y + c^2\delta^2 \cdot (1 - e^{-y/c\delta}) \right] \cdot (1 - e^{-y/c\delta});$$

$$A_{пр2} = \frac{a}{2} \cdot (e^{-2y/c\delta} - 1) + [a - y + c\delta \cdot (1 - e^{-y/c\delta})] \cdot (1 - e^{-y/c\delta}).$$

Боковое электромагнитное усилие удобно представить в виде двух слагаемых:

$$F_{\text{б}} = F_{\text{б}\omega} + F_{\text{б}v}, \quad (7)$$

где  $F_{\text{б}\omega}$  – составляющая бокового усилия, определяемая вторичными токами, создаваемыми ЭДС трансформации;  $F_{\text{б}v}$  – составляющая бокового усилия, определяемая вторичными токами, создаваемыми ЭДС движения.

Сопоставление результатов расчетов боковых электромагнитных усилий с данными эксперимента показало возможность использования выражения (6) для практических расчетов. Пример такого сопоставления для двухсторонней ЛИМ с  $\tau = 75$  мм,  $\delta = 12$  мм и алюминиевым ВЭ с размерами  $20 \times 20 \times 4$  мм приведен на рисунке 10. Пример оценки влияния различных факторов на величину боковых электромагнитных сил показан на рисунке 11. Расчеты выполнены для той же ЛИМ при  $b = 40$  мм и  $\delta = 10$  мм.

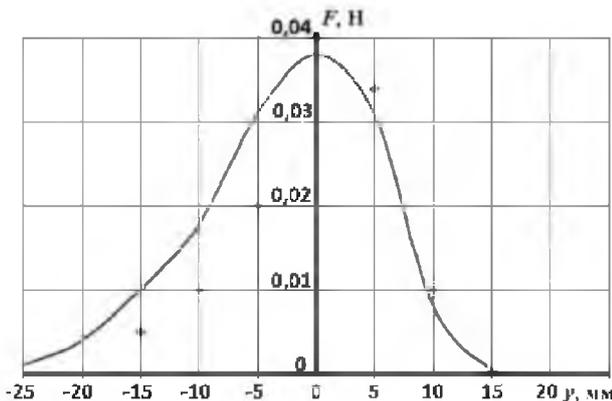


Рисунок 10 – Сравнение расчетных (линии) и экспериментальных усилий (точки) на краю линейного индуктора

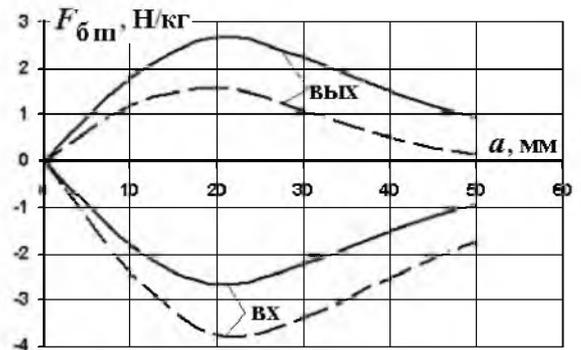


Рисунок 11 – Зависимости удельных боковых усилий от ширины ВЭ при скоростях их подачи  $V_y = 0$  (сплошные линии) и  $0,1$  м/с (пунктирные)

Расчеты боковых сил дополнялась экспериментальными исследованиями. Примеры распределения боковых усилий, действующих на краю ЛИМ на алюминиевые пластины, для разных значений  $a = b = 20, 30$  и  $40$  мм (показаны цифрами на графиках), приведены на рисунке 12.

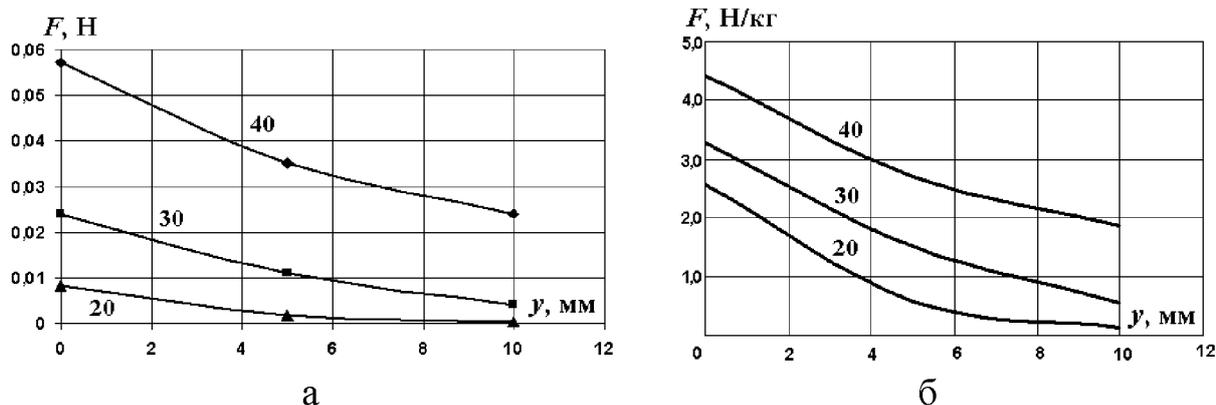


Рисунок 12 – Экспериментальная оценка боковых электромагнитных усилий в ЛИМ сепаратора: абсолютные (а) и удельные (б) значения

Полученные оценки значений боковых электромагнитных сил показывают соизмеримость их с механическими усилиями в сепараторе (например, при угле наклона плоскости подачи  $\alpha = 30^\circ$  удельное значение скатывающей силы  $F_{ск}/m$  равно 4,9 Н/кг, при  $\alpha = 45^\circ$  – 6,9 Н/кг) и подтверждают необходимость их учета при расчете траекторий движения сепарируемых частиц.

Помимо боковых сил на результаты сепарации могут влиять нормальные электромагнитные силы  $F_z$  (силы отталкивания), возникающие при несимметричном расположении ВЭ в зазоре ЛИМ. При приближении к поверхности индуктора  $F_z$  достигает максимального значения. Удельные величины усилий отталкивания рассчитывались численным методом. Можно отметить, что такие усилия падают с уменьшением размеров ВЭ. В области размеров  $b < 20$  мм, характерной для электронного лома, такие усилия пренебрежимо малы, и их можно не учитывать. В то же время при больших размерах ВЭ усилия отталкивания возрастают и становятся соизмеримыми с механическими силами, действующими на сепарируемые частицы. Показана возможность учета сил отталкивания уменьшением расчетного коэффициента трения частиц о плоскость подачи.

В **третьей главе** описана математическая модель и методика расчета электродинамического сепаратора как электромеханической системы, позволяющие учесть совместное действие электромагнитных и механических сил при расчёте траектории движения частиц.

На рисунке 13 схематично показана конструкция сепаратора и силы, действующие на извлекаемую проводящую частицу при ее движении (электромагнитные, гравитации, трения). Очевидно, что соотношение таких сил и формируемые траектории движения частиц будут зависеть от многих факторов: начальной скорости движения частиц (скорости конвейера)  $V_k$ , размеров плоскости подачи (от точки подачи материала до индуктора  $L_0$ , под индуктором  $L_{и}$ , от индуктора до приемников продуктов разделения  $L_{п}$ ), угла наклона плоскости подачи  $\alpha$ , коэффициента трения  $k_{тр}$ . В общем случае силы являются переменными во времени. Электромагнитная сила  $F_{эм}$  в активной зоне индуктора, неизменна по направлению, но зависит от скорости движения частицы и ее положения в индукторе (при неравномерном распределении поля). В то же время сила трения  $F_{тр}$ , оставаясь неизменной по величине, меняет направление вслед за изменением траектории частицы.

Для расчета траекторий движения проводящих частиц и отклонения их от линии подачи предлагается математическая модель сепаратора, показанная на рисунке 14. Расчетные зоны отличаются набором сил, действующих на частицы, и характером движения частиц. В зоне I частица совершает прямолинейное равноускоренное движение под действием только механических сил. В зоне II к механическим силам добавляется боковая электромагнитная сила, но характер движения не меняется. В зоне III на частицу действуют механические силы и основная электромагнитная сила, направленная в направлении движения магнитного поля. Движение в этой зоне становится криволинейным. В зоне IV учитывается действие на частицу механических сил и боковой электромагнитной силы. В зоне V частицы движутся по инерции с учетом корректирующего действия механических сил. Для каждой из зон записаны уравнения движения частиц, связывающие параметры движения (ускорения, скорости, отклонение от линии подачи) с действующими на частицу силами. В общем случае движение частиц в сепараторе описывается системой нелинейных уравнений. Например, в активной зоне индуктора (зона III) движение проводящей частицы определяется совместным действием трех сил  $F_{ЭМ}$ ,  $F_{СК}$  и  $F_{ТР}$ , две из которых ( $F_{ЭМ}$  и  $F_{ТР}$ ) изменяются во время движения.

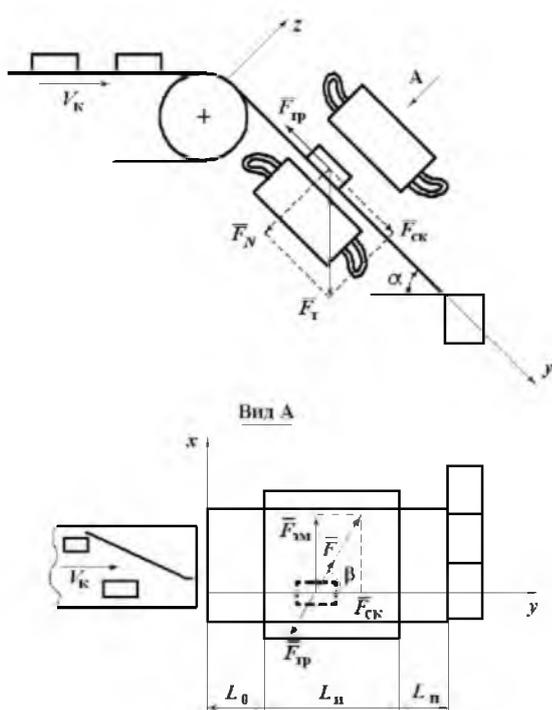


Рисунок 13 – Схема сепаратора и силы, действующие на частицы

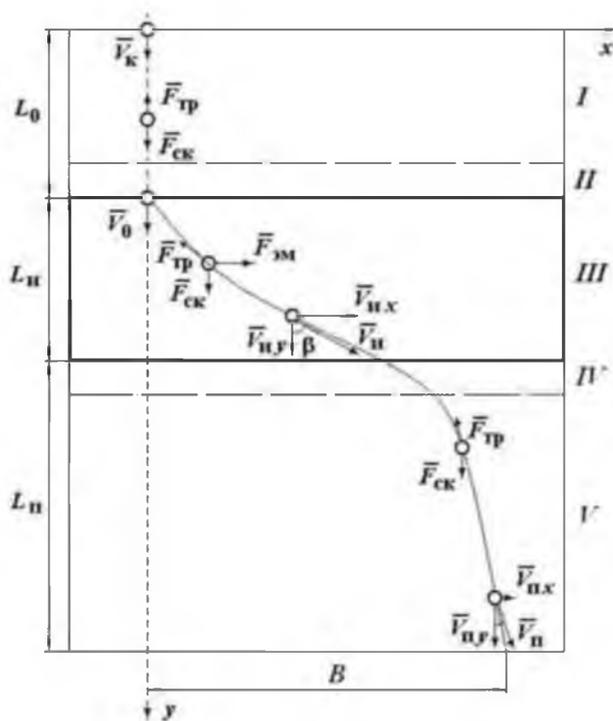


Рисунок 14 – Расчетная модель сепаратора на основе ЛИМ с подачей материалов по наклонной плоскости

С учетом этого движение частицы в активной зоне удобно описывать через проекции сил, ускорения и скорости на оси  $x$  и  $y$ , определяемые в каждой точке траектории через угол  $\beta$ , как показано на рисунках 13-14. Модуль и угол вектора (по отношению к оси  $y$ ) результирующей силы  $F$ , изменяющиеся во времени, находятся из выражений:

$$F(t) = \sqrt{F_{\text{СК}}^2 + F_{\text{ЭМ}}(t)^2} - F_{\text{ТР}} ; \quad \beta(t) = \arctg\left(\frac{F_{\text{ЭМ}}(t)}{F_{\text{СК}}}\right) . \quad (8)$$

Уравнения, связывающее ширину индуктора  $L_{\text{и}}$  и отклонение частицы от линии подачи под индуктором  $B_{\text{и}}$  с параметрами движения частицы в активной зоне, получаются в виде:

$$L_{\text{и}} = \int_0^{t_{\text{и}}} (V_{\text{и}0} + a_{\text{и}y} \cdot t) dt = \int_0^{t_{\text{и}}} [V_{\text{и}0} + g \cdot t \cdot (\sin \alpha - k_{\text{ТР}} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta(t))] \cdot dt , \quad (9)$$

$$B_{\text{и}} = \int_0^{t_{\text{и}}} a_{\text{и}x} \cdot t \cdot dt = \int_0^{t_{\text{и}}} [F_m(t) - k_{\text{ТР}} \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta(t)] \cdot t \cdot dt , \quad (10)$$

где  $t_{\text{и}}$  - время пребывания частицы в активной зоне;  $F_m = F_{\text{ЭМ}}/m$  - удельное электромагнитное усилие;  $m$  - масса частицы.

Решение нелинейных уравнений вида (9)-(10) затруднительно. Поэтому в работе предложена методика расчета, предполагающая переход от решения нелинейных уравнений к решению линейных уравнений за счет разбиения расчетных зон на участки малой длины, в пределах которых коэффициенты уравнений считаются постоянными. Практически такой подход предполагает кусочно-линейную аппроксимацию реальной траектории движения частиц.

Важно отметить, что угол  $\beta_{\text{и}i}$  на  $i$ -м участке уточняется в ходе решения методом последовательных приближений с использованием выражения

$$\beta_{\text{и}i} = \frac{\beta_{\text{и}i\text{ВХ}} + \beta_{\text{и}i\text{ВЫХ}}}{2} . \quad (11)$$

На каждом шаге решения уточняются и значения удельной электромагнитной силы  $F_m$  с учетом неравномерного распределения ее по длине индуктора и с учетом изменения скорости движения ее в направлении поля. Как отмечалось ранее, механическая характеристика ЛИМ с ВЭ малых размеров близка к линейной, что позволяет корректировать удельное электромагнитное усилие с помощью простой зависимости:

$$F_{mi} = F_{m0} \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{и}xi}}{V_0}\right) , \quad (12)$$

где  $F_{m0}$  - пусковое удельное электромагнитное усилие;  $V_0 = 2\tau f$  - скорость бегущего магнитного поля ЛИМ.

Результатом решения уравнений являются значения отклонения частицы от линии подачи на  $i$ -м участке, проекции скорости частицы на выходе из  $i$ -го участка  $V_{\text{и}ix}$  и  $V_{\text{и}iy}$  и угол  $\beta$ :

$$\beta_{\text{и}i\text{ВЫХ}} = \arctg\left(\frac{V_{\text{и}xi}}{V_{\text{и}yi}}\right) . \quad (13)$$

Полученные результаты становятся начальными условиями для расчета параметров движения частицы под индуктором на следующем участке.

Такой же подход использован при решении уравнений в зонах IV и V. По результатам расчетов в каждой зоне определяются траектория движения частицы и отклонение ее от линии подачи суммированием частичных отклонений по расчетным участкам разбиения. Результирующее отклонение частицы от линии подачи в конце наклонной плоскости  $B$  складывается из отклонений, получаемых в зонах III, IV и V сепаратора

$$B = B_{и} + B_{и0} + B_{п}. \quad (14)$$

Для оценки достоверности предложенных моделей и методик расчета сепараторов выполнялись сопоставления расчетных характеристик с данными экспериментов. Примеры таких сопоставлений приведены на рисунках 15-16.

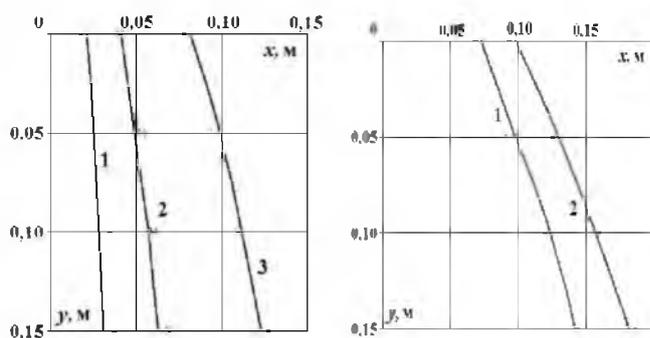


Рисунок 15 – Сопоставление расчетных (линии) и экспериментальных (точки) траекторий движения алюминиевых частиц в сепараторе с  $\tau = 75$  мм

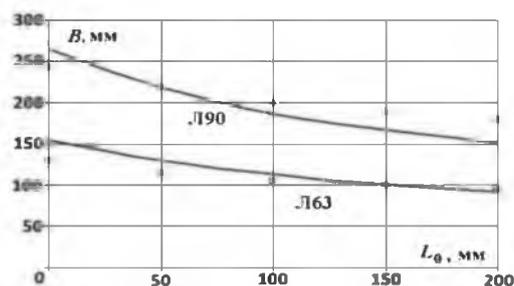


Рисунок 16 – Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) отклонения частиц от линии подачи в зависимости от  $L_0$

Можно отметить хорошее качественное совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей. Погрешности расчетов не превышают 15-20 %. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные математические модели и методики расчета сепараторов на основе ЛИМ, учитывающие совместное действие электромагнитных и механических сил, для исследования и проектирования электродинамических сепараторов.

Примеры расчета траекторий движения частиц в сепараторе показаны на рисунке 17. Расчеты выполнены для опытно-промышленной установки электродинамической сепарации СЭЛД-П при следующих данных: размеры плоскости подачи  $L_0 = 130$  мм и  $L_{п} = 300$  мм; угол наклона плоскости  $\alpha = 30^\circ$ ; удельные электромагнитные усилия  $F_m$  изменялись от 2 до 40 Н/кг; коэффициенты трения частиц о плоскость –  $k_{тр} = 0,2; 0,3$  и  $0,4$ . Сплошными линиями показаны траектории, получаемые при неограниченной длине линейного индуктора. Траектории, показанные пунктиром, соответствуют реальной длине индукторов СЭЛД-П ( $2\tau = 132$  мм) и учитывают выход высокопроводящих частиц не через боковую сторону индуктора, а через торец. Расчеты подтверждают сложный характер траекторий: прямолинейное движение до индуктора переходит в криволинейное с нарастанием угла  $\beta$  в активной зоне, а при выходе из зоны индуктора – в движение по кривой с уменьшением  $\beta$ . Можно отметить, что траектории движения частиц и результирующие их отклонения от линии подачи суще-

ственно зависят от соотношения электромагнитных и механических сил.

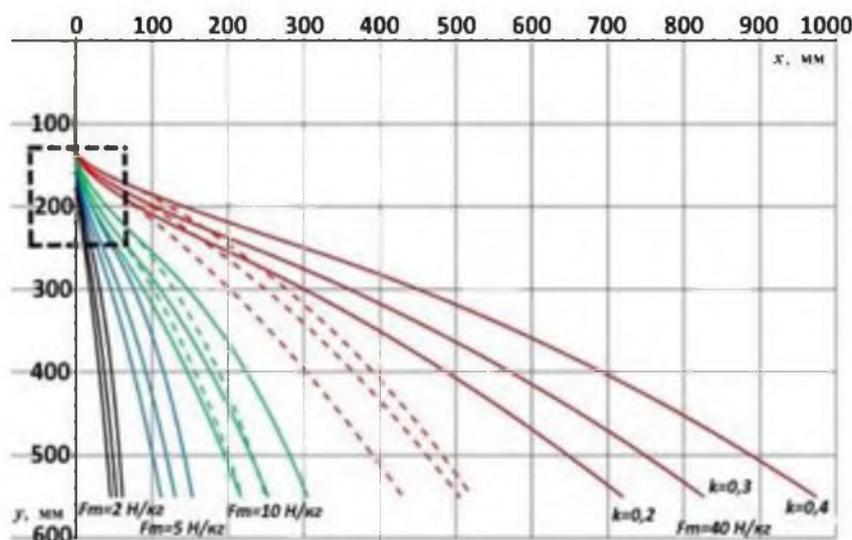


Рисунок 17 – Траектории движения частиц при различных значениях удельных усилий  $F_m$  и коэффициентах трения  $k_{тр} = 0,2; 0,3$  и  $0,4$

Для того же сепаратора выполнена оценка влияния на траектории движения частиц боковых электромагнитных сил. Показано, что при скоростях движения частиц на входе в индуктор  $V_{ивх} = 0,3-0,5$  м/с и на выходе из индуктора  $V_{ивх} = 1,0-1,2$  м/с неучет боковых сил приводит к занижению отклонений частиц на 4-5%. С ростом скорости движения

частиц в сепараторе ошибки расчетов без учета боковых сил увеличиваются.

В четвертой главе с использованием разработанных методик исследовано влияние различных факторов на характеристики сепараторов; проанализированы возможности индукционной сортировки сплавов и сепарации электронного лома; обоснован выбор параметров ЛИМ по критериям энергоэффективности и селективности.

При исследованиях использованы образцы медных и алюминиевых сплавов, предоставленных предприятиями – заказчиками. Физические свойства медных сплавов, показаны в таблице 1, а алюминиевых сплавов – в таблице 2.

Таблица 1 – Физические свойства сортируемых медных сплавов

№ п/п	Металлы и сплавы	Удельная электропроводность $\gamma$ , МСм/м	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\gamma/\rho$ , См <sup>2</sup> /г	№ приемника
1	Медь (технически чистая)	58,0	8,90	6,52	I
2	Медь кадмиевая (Cd < 1%)	48,0	8.89	5,40	I
3	Бронза Бр.Х0,5	35,0	8.90	3,93	II
4	Латунь Л90	25,0	8.85	2,82	III
5	Латунь ЛС59-1	15,4	8.50	1,81	IV
6	Латунь Л63	14,5	8.47	1,71	IV
7	Латунь ОЦС4-4-2,5	11,5	9,02	1,27	V
8	МН19	3,5	8,90	0,39	VI
9	МНЖМц (мельхиор)	2,4	8.90	0,27	VI

Очевидно, что качество сортировки зависит от различий в физических свойствах сплавов. Для его оценки введен коэффициент селективности  $k_{сел}$ , начальное значение которого можно определить как отношение показателей  $\gamma/\rho$  соответствующих сплавов. В ходе экспериментов показано, что надежное разделение медных сплавов достигается при  $k_{сел} > 1,2-1,3$ . Близость физических свойств разделяемых алюминиевых сплавов обуславливает задачу разделения

их при начальных коэффициентах селективности  $k_{\text{сел}} < 1,2-1,3$ .

Таблица 2 – Группы алюминиевых сплавов по их удельной электропроводности

№ п/п	Наименование группы	Удельная электропроводимость $\gamma$ , МСм/м	Средняя удельная электропроводимость $\gamma$ , МСм/м
1	Технически чистый алюминий (А5, А7, А5Е, А8К, А6, А85, АД1, АД0)	32,0 - 38,0	35
2	Деформируемые сплавы (АД31, Д16, АМц, Д1)	24,0 - 32,0	28
3	Алюминисвые ковочные сплавы (АК4, АК7, АК9, АК12, АК12ММгН)	18,0 - 22,0	20
4	Литейные сплавы (АМг5, АЛ1 - АЛ26)	12,0 - 18,0	15

Электродинамические сепараторы относятся к видам непрерывно работающего электрооборудования, поэтому одним из критериев при их создании является обеспечение минимума энергопотребления при заданных технологических характеристиках. При расчетах ЛИМ сепараторов в качестве критериев оптимальности использовались:  $F_m = F_{\text{эм}}/m$  [Н/кг или м/с<sup>2</sup>] (отношение пускового электромагнитного усилия к массе извлекаемой частицы) и  $F_{mS} = F_m/S$  [Н/(кг·кВА)] (отношение удельного усилия к потребляемой ЛИМ мощности). Первый показатель определяет возможность достижения максимальных ускорений при извлечении металла и работоспособность сепаратора, второй – его энергоэффективность. При этом коэффициент селективности сепарации  $k_{\text{сел}}$  выступает в качестве ограничения при выборе вариантов сепаратора.

Пример расчета показателя энергоэффективности двухсторонней ЛИМ в зависимости от полюсного деления индуктора  $\tau$  для двух воздушных зазоров ( $\delta = 20$  и  $30$  мм – цифры на графиках) показан на рисунке 18. Видно, что значение показателя  $F_{mS}$  снижается с ростом  $\tau$ , тем более заметно, чем меньше воздушный зазор и крупность ВЭ. В то же время сепаратор с малым значением  $\tau$  может не удовлетворять требованиям селективности. Это видно на рисунке 19, где показаны зависимости удельного усилия  $F_m$  от частоты  $f$  для алюминиевых пластин размером  $40 \times 40$  мм при изменении их толщины от 2 до 10 мм (цифры на графиках). Выделенные цветами секторы соответствуют группам алюминиевых сплавов, показанным в таблице 3 (1 – серый, 2 – розовый, 3 – синий, 4 - зеленый).

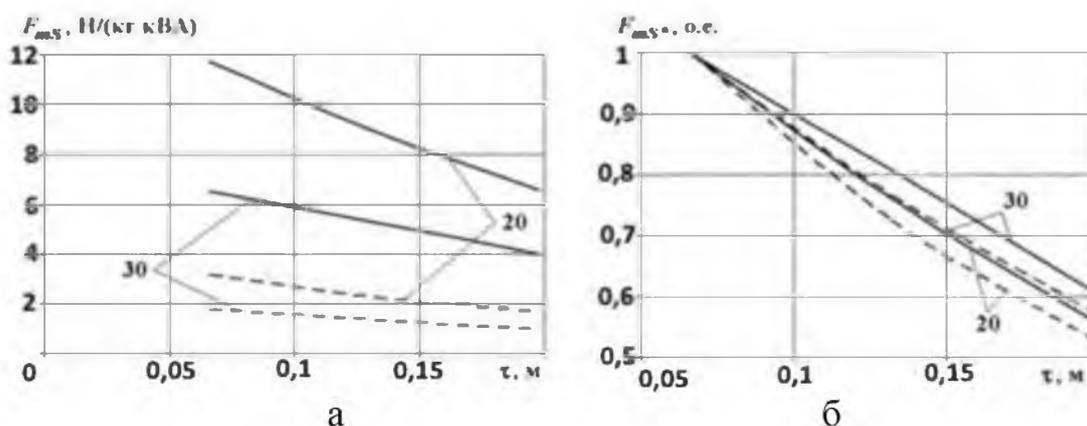


Рисунок 18 – Оценка показателя энергоэффективности  $F_{mS}$  двухсторонней ЛИМ в абсолютных (а) и относительных (б) единицах

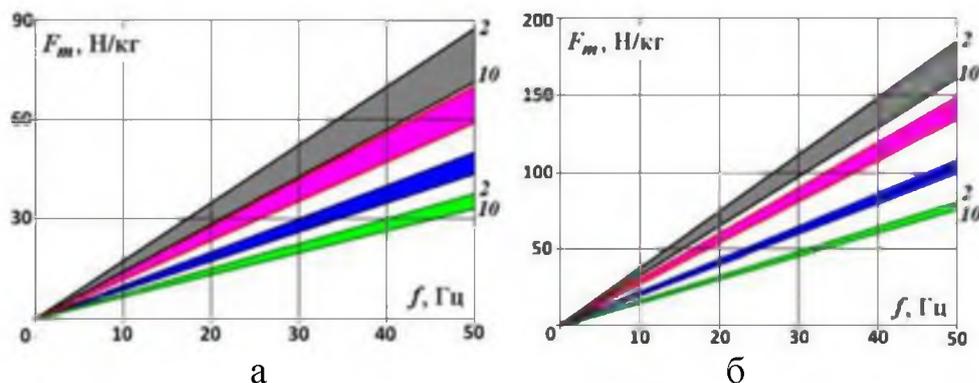


Рисунок 19 – Оценка влияния толщины извлекаемых частиц на характеристики ЛИМ для двух значений полюсного деления: 0,066 м (а) и 0,132 м (б)

Из рисунка 19, а видно, что при  $\tau = 0,066$  м может наблюдаться взаимозасорение сплавов 1 и 2 групп на выходе сепаратора. Сказанное означает, что выбор полюсного деления ЛИМ сепаратора является результатом компромисса между показателями энергоэффективности и селективности.

Коэффициенты селективности  $k_{\text{сел}}$  использовались для оценки влияния различных факторов на характеристики сепараторов при расчетах установок индукционной сортировки сплавов. Например, оценка  $k_{\text{сел}}$  использована при обосновании рабочей частоты ЛИМ и выборе крупности частиц сплавов. Зависимости коэффициента селективности от частоты для ЛИМ с  $\tau = 0,132$  м для рассматриваемых групп алюминиевых сплавов приведены на рисунке 20 (цифры 1-2, 2-3, 3-4 означают сравнение соответствующих групп сплавов). Зависимости для толщины пластин  $d = 2$  мм показаны сплошными линиями, для  $d = 10$  мм – пунктиром. Нетрудно видеть, что с ростом частоты  $f$  коэффициент селективности снижается и при частотах  $f > 150$  Гц сортировка становится невозможной. Очевидно, что в данном случае рациональна частота 50 Гц.

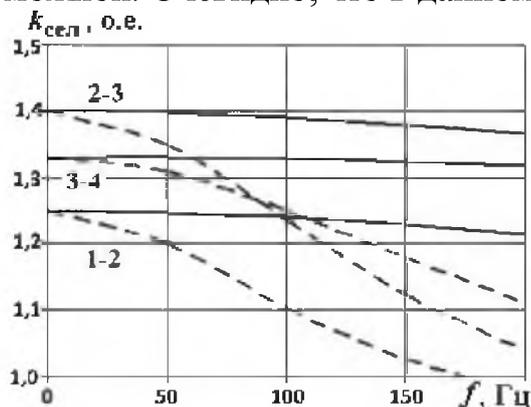


Рисунок 20 – Влияние частоты поля на селективность разделения алюминиевых сплавов

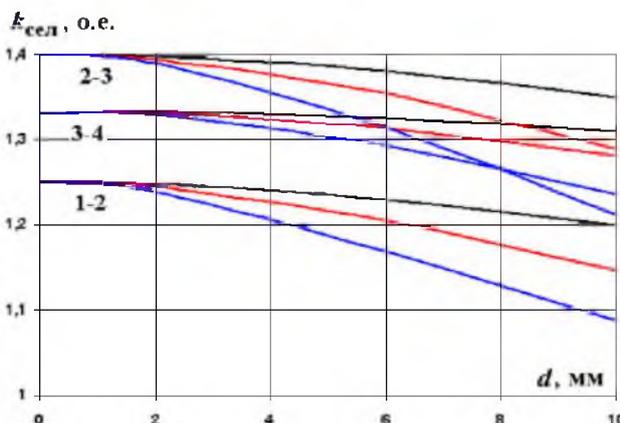


Рисунок 21 – Влияние размеров частиц на селективность разделения сплавов

На рисунке 21 приведены зависимости  $k_{\text{сел}}$  от толщины ВЭ для ЛИМ с  $\tau = 0,132$  м и  $f = 50$  Гц при размерах пластин  $a = b = 40, 50, 60$  мм (цвета линий: черный, красный и синий соответственно). Как видно, коэффициенты селективности существенно снижаются при увеличении размеров и толщины ВЭ, что уменьшает надежность сортировки сплавов. Из этого следует, что для надежной сортировки рассматриваемых алюминиевых сплавов предпочтительно дробление лома и отходов металлов до крупности 40 мм. Практический интерес для индукционной сортировки сплавов цветных металлов представляет оценка

влияния формы ВЭ и ориентации их в бегущем магнитном поле. Результаты расчетов показывают, что существенное отклонение формы ВЭ от базовой квадратной приводит к снижению удельного электромагнитного усилия и обуславливает взаимозасорение фракций разделяемых сплавов. В то же время допустимы незначительные отклонения формы и размеров частиц в пределах 10-15%. Эта оценка определяет выбор оборудования для дробления и сортировки металлолома по крупности при подготовке к электродинамической сепарации.

Второй технологической задачей, для решения которой выполнялись исследования, являлось извлечение алюминиевых сплавов из дробленого электронного лома. По согласованию с заказчиком на первом этапе рассматривался сепаратор на основе ЛИМ при питании от сети 50 Гц, предназначенный для обработки фракции крупностью 10-20 мм. В таблице 4 показаны свойства некоторых алюминиевых и медных сплавов, содержащихся в электронном ломе, а на рисунке 22 приведены зависимости удельных электромагнитных усилий от размера частиц в интересующем нас диапазоне крупности (номера кривых соответствуют позициям таблице 4). Расчетное усилие, требуемое для выведения частиц за разделитель в конце плоскости подачи, составляет около 12 Н/кг (пунктир на рисунке 22). Видно, что при размерах частиц 10–20 мм за разделитель будут перемещаться практически все частицы алюминиевых сплавов и крупные частицы проводниковой меди (таких в пробах электронного лома было мало).

Таблица 4 – Физические свойства металлов, содержащихся в электронном ломе

№ п/п	Металлы и сплавы	Удельная электропроводность $\gamma$ , МСм/м	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\gamma/\rho$ , См <sup>2</sup> /г
1	Латушь Л63	14,50	8,47	1,71
2	Латушь ЛО90-1	18,50	8,80	2,10
3	Латушь Л90	25,00	8,85	2,82
4	Медь (технически чистая)	56,00	8,90	6,29
5	Сплавы алюминия (литейные)	20,00	2,7	7,41
6	Сплавы алюминия (деформируемые)	28,00	2,7	10,37

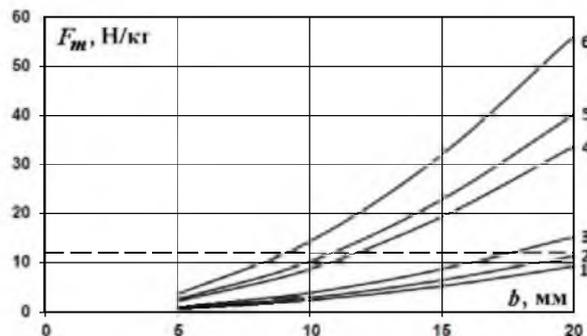


Рисунок 22 – Зависимости удельных электромагнитных усилий от крупности частиц для ряда сплавов

Оценки влияния на характеристики сепарации электронного лома размеров и формы разделяемых частиц, а также их ориентации в бегущем магнитном поле показали, что в рассматриваемом диапазоне размеров (10-20 мм) при работе на частоте 50 Гц существенного снижения коэффициента селективности не наблюдается. Следовательно, не требуется дополнительная подготовка электронного лома к сепарации. Проведенные исследования свидетельствуют о существенном снижении удельных электромагнитных усилий при  $b < 20$  мм. При этом возрастает влияние на движение частиц механических сил, которые в рассматриваемых случаях становятся соизмеримыми с электромагнитными. Возникает необходимость улучшения характеристик сепаратора за счет выбора рациональных параметров механической части установки, влияющих на траектории движения частиц: размеры плоскости подачи  $L_0$  и  $L_{п}$ ; угол ее наклона  $\alpha$ ; скорость конвейера, подающего материалы,  $V_k$ ; коэффициент трения  $k_{тр}$ . Наиболее полную информацию можно получить, построив траектории движения сепарируемых частиц. Один из примеров расчета таких траекторий для сепаратора СЭЛД-П

был показан ранее на рисунке 17. Нетрудно видеть, что различие в удельных усилиях (при  $F_m > 10$  Н/кг) обеспечивает необходимую разницу в итоговых отклонениях частиц разных сплавов от линии подачи. Повышение  $k_{тр}$  позволяет увеличить разницу в итоговых отклонениях. В то же время в области малых электромагнитных усилий (меньших, чем сила скатывания) влияние  $k_{тр}$  неоднозначно. При малых скоростях подачи материала рост  $k_{тр}$  нежелателен.

Анализ траекторий движения частиц показывает, что увеличение размера плоскости за индуктором  $L_{п}$  является самым простым способом повышения отклонений частиц, в то же время ведущим к росту габаритов установки. В то же время желательны уменьшение размера  $L_0$ , скорости подачи материала  $V_k$  и угла наклона плоскости  $\alpha$ . Это приводит к увеличению времени пребывания извлекаемых частиц в зоне сепарации и соответствующему росту отклонений  $B$ .

В **пятой главе** представлены описание опытных установок электродинамической сепарации; результаты их экспериментальных исследований; результаты апробации ряда технологических задач.

На рисунке 25 показаны установки, созданные при участии автора на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ, на которых выполнялись основные исследования. Опытные сепараторы отличаются размерами и мощностью индукторов, допускают изменение параметров ЛИМ и механической части установок.



а

б

в

Рисунок 25 – Опытные установки: а, б – лабораторные; в - промышленная

Исследовано влияние на результаты сепарации неравномерности распределения магнитного поля. На рисунке 26 показаны зависимости итогового отклонения алюминиевых частиц в неравномерном поле ЛИМ от  $L_0$  при прохождении

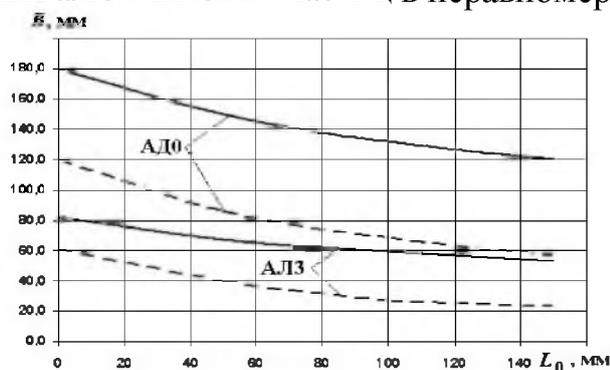
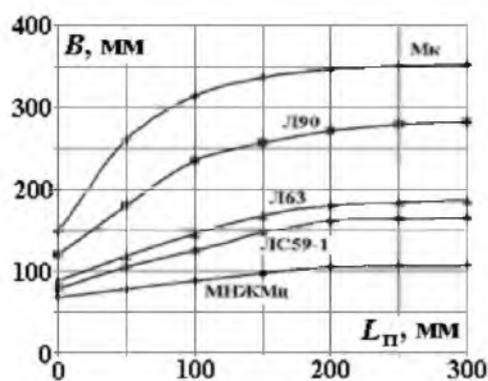
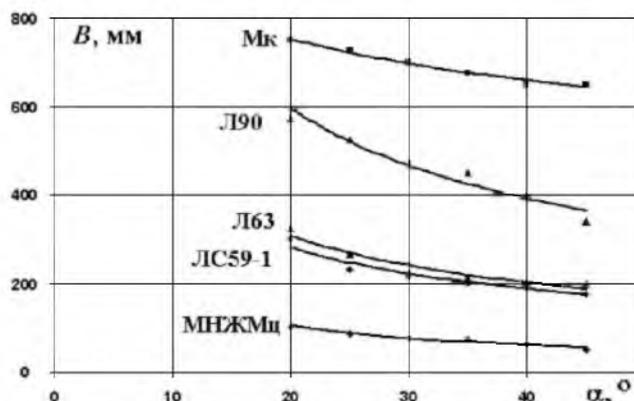


Рисунок 26 – Зависимости  $B$  ( $L_0$ ) при разном расположении линии подачи

линии подачи через максимум (сплошные линии) и минимум индукции (пунктир). Видно, что при прохождении линии подачи через максимум поля отклонения сепарируемых частиц более существенны. Оценивалось также влияние на результаты сепарации параметров механической части установок. Примеры представлены на рисунке 27.



а



б

Рисунок 27 – Результирующие отклонения сепарируемых частиц от линии подачи в зависимости от расстояния  $L_{\text{П}}$  (а) и угла наклона плоскости (б)

Одной из задач экспериментальных исследований была оценка зависимости результатов сепарации от размеров, формы и ориентации частиц сепарируемых сплавов. Результаты экспериментов подтверждают существенное снижение эффективности сепарации с уменьшением крупности частиц. Искажение формы частиц и их размеров на уровне 10-15 % приводит к уменьшению дальности отклонения частиц на те же 10-15%. Это подтверждает, что надежная сортировка сплавов достигается при коэффициентах селективности  $k_{\text{сел}} > 1,2-1,30$ , и определяет требования к оборудованию для дробления и сортировки лома.

На опытных установках с использованием материалов, предоставленных заинтересованными предприятиями, выполнена апробация технологий сортировки лома медных или алюминиевых сплавов, а также извлечения алюминия из дробленого электронного лома. Например, возможность сортировки медных сплавов хорошо видна на рисунке 27. Полученные результаты позволили взять лабораторные сепараторы в качестве прототипов промышленных установок.

В **заключении** приведены основные выводы по результатам работы.

1. Показана актуальность применения электродинамических сепараторов в технологиях сбора и обработки вторичных цветных металлов. В рассматриваемых задачах сепарируемые частицы, выполняющие роль ВЭ ЛИМ, имеют малые размеры (менее 40 мм). При этом определяющей характеристикой сепарации становится селективность разделения металлов и сплавов, для обеспечения которой целесообразен сепаратор на основе ЛИМ с двухсторонним индуктором при подаче сепарируемых материалов по наклонной плоскости.

2. Выявлены особенности физических процессов в ЛИМ с малыми размерами вторичного элемента ( $b < 0,5\tau$ ) и сепараторов на их основе. Разработаны алгоритмы и методики расчета ЛИМ с ВЭ малых размеров на основе аналитической и численной моделей, позволяющие учесть специфику физических процессов в рассматриваемых устройствах.

3. Разработаны математическая модель и методика расчета боковых электромагнитных сил, возникающих при входе сепарируемых проводящих частиц в магнитное поле ЛИМ и выходе из него.

4. Разработана математическая модель сепаратора на основе ЛИМ с подачей материалов по наклонной плоскости как сложной электромеханиче-

ской системы, предполагающая разбиение области сепарации на отдельные зоны, отличающиеся набором сил, действующих на проводящие частицы.

5. Выполнены исследования ЛИМ для индукционной сортировки сплавов цветных металлов и сепарации электронного лома. Введено понятие коэффициента селективности  $k_{\text{сеп}}$ .

6. На основании расчета траекторий сепарируемых частиц выполнена оценка влияния параметров механической части установок на итоговые отклонения проводящих частиц от линии подачи.

7. Созданы лабораторные установки электродинамической сепарации на основе двухсторонних ЛИМ с подачей материалов по наклонной плоскости.

8. Результаты исследований и полученные рекомендации переданы предприятиям-заказчикам; созданные лабораторные установки и методики расчета используются в учебном процессе кафедр «Электротехника и электротехнологические системы» и «Электрические машины» УрФУ.

### **Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:**

#### **Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Багин, Д.Н. Опыт разработки электродинамических сепараторов для технологий утилизации твердых отходов / А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин, И.А. Коняев, С.Л. Назаров, Н.С. Якушев // Экология промышленного производства. 2014. № 2 (86). С.17-21 (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

2. Багин, Д.Н. Показатели эффективности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов / Д.Н. Багин, А.Ю. Коняев // Промышленная энергетика. 2015. № 4. С. 20-24 (0,5 п.л. / 0,25 п.л.).

3. Багин, Д.Н. Исследование процессов электродинамической сепарации электронного лома / А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин, Н.С. Якушев // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 4. С. 15-19 (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

4. Багин, Д.Н. Анализ электромеханических процессов, определяющих эффективность работы электродинамического сепаратора / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин, С.Л. Назаров // Промышленная энергетика. 2015. № 7. С. 48-53 (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

5. Багин, Д.Н. Моделирование боковых усилий в линейной индукционной машине для электродинамической сепарации / А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин // Электричество. 2016. № 6. С. 34-40 (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

#### **Другие публикации:**

6. Багин, Д.Н. О эффективности электродинамической сепарации в технологиях вторичной цветной металлургии / Д.Н. Багин, Н.Е. Маркин, А.Ю. Коняев // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий: сб. научн. трудов. - Екатеринбург: УрФУ, 2011. С. 193-196 (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).

7. Багин, Д.Н. Возможности повышения эффективности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов / Д.Н. Багин, Р.О. Казанцев, А.Ю. Коняев // Проблемы и достижения в промышленной энергетике: сб. докладов X международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УМЦ-УПИ, 2011. С. 67-70 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

8. Багин, Д.Н. Место электродинамической сепарации в технологиях переработки твердых металлосодержащих отходов / Д.Н. Багин, Р.О. Казанцев, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Там же. С. 71-73 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

9. Багин, Д.Н. Пути повышения показателей электродинамических сепараторов на базе линейных асинхронных двигателей / Д.Н. Багин, Р.О. Казанцев, А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, О.В. Ильшева // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докл. 2-й международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: ЗАО

«Уральские выставки», 2012. С. 168-171 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

10. Багин, Д.Н. О электродинамической сепарации мелких фракций металлосодержащих отходов / Д.Н. Багин, Р.О. Казанцев, А.Ю. Коняев, И.А. Коняев // Проблемы и достижения в промышленной энергетике: сб. докладов XI международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: «Уральские выставки», 2012. С. 122-124 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

11. Багин, Д.Н. Вопросы переработки лома и отходов электро- и радиотехники / Д.Н. Багин, А.Н. Уколов, М.В. Шуматов, А.Ю. Коняев // Система управления экологической безопасностью: сб. докл. 7-й международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 152-157 (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).

12. Багин, Д.Н. Расчет электродинамических сепараторов как электромеханических систем / Д.Н. Багин, А.Ю. Коняев // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий: сб. науч. трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 156-159 (0,3 п.л. / 0,15 п.л.).

13. Багин, Д.Н. Подготовка отходов и лома цветных металлов к металлургическому переделу с помощью электродинамической сепарации / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, С.Л. Назаров, Н.С. Якушев // Система управления экологической безопасностью: сб. докладов 8-й международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 197-202 (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).

14. Багин, Д.Н. Показатели эффективности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов / А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин // Федоровские чтения – 2014: материалы XLIV международной научно-практической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2014. С. 69-71 (0,1 п.л. / 0,05 п.л.).

15. Багин, Д.Н. Повышение эффективности переработки электронного лома / Д.Н. Багин, Е.Ю. Обвинцева, Н.С. Якушев, А.Ю. Коняев // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2014. С. 274-277 (0,15 п.л. / 0,05 п.л.).

16. Багин, Д.Н. Индукционная сортировка лома цветных металлов при подготовке к металлургическому переделу / Д.Н. Багин, А.В. Макаров, И.А. Коняев // Там же. С. 277-279 (0,15 п.л. / 0,05 п.л.).

17. Багин, Д.Н. Влияние боковых электромагнитных сил на работу электродинамических сепараторов с линейными индукторами // Д.Н. Багин, А.Ю. Коняев // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии / Сб. докладов 4-й международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2015. С. 76-79 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

18. Багин, Д.Н. Особенности расчета линейных индукционных машин для сепарации измельченных отходов / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, С.Л. Назаров // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы I международной научно-технической конференции. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. С. 196-202 (0,35 п.л. / 0,15 п.л.).

Подписано в печать  
Офсетная печать

Формат 60×84 1/16  
Тираж 100

Бумага писчая  
Заказ №