

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»**

Комсомольский проспект, д.29, г. Пермь, 614990

Тел.: (342) 219-80-67, 212-39-27. Факс: (342) 212-11-47. E-mail: rector@pstu.ru

№ _____
На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»

д.т.н., профессор

Коротаев Владимир Николаевич

« 05 » октября 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Багина Дмитрия Николаевича «Электродинамические сепараторы на основе линейных индукционных машин для обработки мелких фракций лома цветных металлов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.09.01 – электромеханика и электрические аппараты

Одной из проблем вторичной цветной металлургии в нашей стране является отсутствие отечественного оборудования для сбора и обработки лома и отходов вторичных цветных металлов. За рубежом для выполнения таких операций широкое применение находят электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем на основе линейных индукционных машин (ЛИМ). Разработке таких сепараторов и посвящена рассматриваемая диссертационная работа. При этом в качестве объекта исследования автор выбрал электродинамический сепаратор для обработки дробленого лома цветных металлов (лом электро- и радиотехнических устройств, кабельный лом, автомобильный лом и др.). В таком сепараторе

частицы цветных металлов, играющие роль вторичного элемента ЛИМ, имеют размеры, значительно меньшие, чем полюсное деление индуктора, что обуславливает снижение эффективности сепарации. В то же время индукционная сортировка указанных видов дробленого лома цветных металлов практически не имеет альтернатив. По названным причинам тема диссертации Багина Д.Н., связанная с исследованием и разработкой электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов для обработки мелких фракций лома цветных металлов, **является актуальной.**

На первом этапе (раздел 1) автор выполнил анализ литературных источников (109 наименований, в том числе 14 зарубежных публикаций) для оценки современного состояния разработки электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем, применяемых для обработки мелких фракций лома цветных металлов. На основе сопоставления вариантов конструкций электродинамических сепараторов для решения рассматриваемых технологических задач и дальнейших исследований выбран электродинамический сепаратор на основе линейных индукторов с подачей сепарируемых материалов по наклонной плоскости.

В разделе 2, посвященном моделированию ЛИМ со вторичным элементом малых размеров, автором показаны особенности физических процессов в рассматриваемых ЛИМ и сепараторах. Наиболее значимыми из них являются: увеличение влияния неравномерности распределения магнитного поля в ЛИМ с уменьшением размеров вторичного элемента; преимущественно одноконтурное распределение вторичных токов в проводящих частицах при размерах, меньших половины полюсного деления; появление боковых электромагнитных сил при входе частиц в поле и выходе из него; соизмеримость электромагнитных и механических сил, действующих на частицы. Показано, что известные математические модели линейных индукционных машин, применяемые при расчетах сепараторов, указанные особенности не учитывают. Автором предложено усовершенствование методики расчета ЛИМ, в основу которых положены двумерная аналитическая модель машины, разработанная в УрФУ.

Предложенный алгоритм расчета электромагнитных сил позволяет учесть одновременно и неравномерность поля в линейном индукторе и перераспределение токов в частице малых размеров. Кроме этого описан алгоритм расчета рассматриваемых ЛИМ, позволяющий использовать моделирование машины в математическом пакете Elcut. Выполнены сопоставительные расчеты, показавшие хорошее совпадение результатов по двум вариантам методик в случаях, когда размер вторичного элемента не превышает половины полюсного деления.

В разделе 2 описаны также оригинальные модели и методики расчета боковых электромагнитных сил, возникающих при входе частиц в поле индуктора и выходе из него, основанные на том же допущении об одноконтурном распределении вторичных токов и учитывающие реальное распределение магнитного поля у края индуктора. В целом можно отметить, что математические модели и методики расчета электромагнитных усилий ЛИМ со вторичным элементом малых размеров, выносимые на защиту обладают **научной новизной** и представляют **практическую ценность** для исследования рассматриваемых машин.

Вторая часть теоретических исследований (раздел 3) посвящена моделированию рассматриваемого варианта сепаратора в целом с учетом совместного действия на извлекаемые проводящие частицы электромагнитных и механических сил (прежде всего, гравитации и трения). При построении модели автор записывает уравнения движения частиц с учетом действия электромагнитных и механических сил для различных участков зоны сепарации. С учетом изменения величины и направления сил при движении частиц такие уравнения получаются нелинейными. Для их решения предложено деление зон сепарации на участки малой длины, в пределах которых коэффициенты уравнений остаются постоянными. При этом параметры модели на различных участках уточняются на каждом шаге расчетов. Такой подход сводит описание сепаратора к системе линейных уравнений и позволяет выполнять многовариантные итерационные расчеты траекторий движения извлекаемых частиц металла. Предложенные

математические модели и методики расчета электродинамического сепаратора в целом **достаточно обоснованы и обладают научной новизной.**

В разделе 4 на основе предложенных математических моделей и методик расчета выполнены исследования ЛИМ и сепараторов на их основе, предназначенных для индукционной сортировки лома цветных металлов (в частности сплавов меди или сплавов алюминия), а также для разделения металлов в электронном ломе. Рассчитаны характеристики ЛИМ при различных параметрах (полюсное деление и частота магнитного индуктора, размеры и удельная электропроводность вторичного элемента). Показаны возможности выбора полюсного деления и частоты при заданных параметрах вторичного элемента. При расчетах сепаратора в целом особое внимание обращалось на оценку влияния механических параметров установки электродинамической сепарации (размеры и наклон плоскости подачи, коэффициенты трения, скорость подачи материала) на характеристики сепаратора. Показаны возможности увеличения итоговых отклонений сепарируемых металлических частиц от линии подачи за счет рационального выбора механических параметров.

Приведены примеры расчета конкретных установок для индукционной сортировки сплавов алюминия. Показано, что при их проектировании следует учитывать целый ряд критериев, определяющих работоспособность и энергоэффективность установок, а также селективность сепарации. Даны рекомендации по выбору параметров сепараторов для рассматриваемых технологических задач. Рассмотрено влияние на показатели сепарации формы и размеров частиц, а также ориентации их в поле ЛИМ. По результатам таких расчетов определены требования к подготовке сепарируемого материала. Расчеты дополнены экспериментальными исследованиями, выполненными на лабораторных электродинамических сепараторах, позволяющих регулировать как параметры ЛИМ, так и механические параметры установок. Одной из основных задач экспериментальных исследований являлась проверка теоретических

положений, выдвигаемых в работе. Хорошее качественное и количественное совпадение результатов расчетов и опыта позволяет считать **результаты исследований вполне достоверными.**

Важной задачей экспериментальных исследований на указанных установках была апробация различных технологий сепарации. При этом автором использовались материалы, предоставленные предприятиями - заказчиками. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также опытные образцы сепараторов переданы предприятиям.

С учетом того, что выполнен большой объем целенаправленных теоретических и экспериментальных исследований, содержащих много новых результатов, к которым проявлен интерес промышленных предприятий, можно сделать вывод, что результаты исследований, представленные в диссертации **представляют практическую ценность.**

В целом, диссертационная работа обладает внутренним единством, поскольку исследования автора идут от моделирования и расчетов линейных индукционных машин и электродинамических сепараторов в целом до создания опытных образцов и внедрения их в реальное производство.

Результаты исследований автора достаточно полно отражены в 18 публикациях, в том числе 5 статьях, опубликованных в научных журналах, входящих в Перечень ВАК. Результаты диссертационной работы обсуждались на ряде представительных научных конференций, в том числе были доложены на II международной научно-технической конференции «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике», проведенной в апреле 2016г. на базе ПНИПУ. Содержание автореферата диссертации Д.Н. Багина соответствует основному содержанию работы.

Замечания и вопросы по диссертации:

1. Почему для решения поставленных технологических задач не рассматривался вариант электродинамического сепаратора на основе вращающихся постоянных магнитов?

2. Один из выводов, полученных по результатам расчетов в разделе 4, касается уточнения требований к подготовке сепарируемого материала. Это положение нуждается в пояснении.

3. Почему при расчете боковых электромагнитных усилий в разделе 2.3 рассматривается вход частицы в пульсирующее магнитное поле (выражение 2.13), а не в трехмерное бегущее?

4. Проводилась ли оценка экономической целесообразности применения электродинамических сепараторов для рассмотренных технологий (раздел 5.3)?

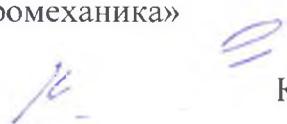
5. Можно отметить ряд неточностей и опечаток в тексте диссертации и автореферата. Например, в автореферате нарушена нумерация рисунков (с 22 по 25), отсутствует табл. 3, на стр. 45 диссертации выражение (2.11) определяет поверхностную плотность тока, а не объемную.

Общее заключение

В целом диссертационная работа Д.Н. Багина написана грамотным техническим языком. Задачи работы, связанные с разработкой электродинамических сепараторов на основе линейных индукционных машин для обработки мелких фракций лома и отходов цветных металлов, достигнуты. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, в ней изложены новые научно-обоснованные методические разработки и технические решения в направлении создания специальных электромеханических устройств, в частности, электродинамических сепараторов для технологий сбора и обработки вторичных цветных металлов. По объему научных исследований, их научной и практической значимости диссертация Д.Н. Багина удовлетворяет требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук согласно п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Багин Дмитрий Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета «29» сентября 2016 года (протокол № 3).

Заведующий кафедрой
«Электротехника и электромеханика»
ПНИПУ, доцент,
доктор технических наук

 Кавалеров Борис Владимирович

Подпись Кавалерова Бориса Владимировича удостоверяю

Ученый секретарь ПНИПУ


В.И. Макаревич

Адрес организации: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29

Тел./факс: +7 (342) 219-86-61

E-mail: kbv@pstu.ru