

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу **Филиппова Василия Александровича** «Повышение эффективности электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты

Актуальность темы. Одной из важнейших эколого-экономических задач нашей страны в настоящее время является развитие отрасли промышленной переработки отходов производства и потребления. При этом ставится задача максимального извлечения из отходов отдельных фракций, пригодных для использования в качестве вторичного сырья. Для сепарации твердых отходов, в частности, для извлечения цветных металлов и сортировки их по плотности, могут применяться сепараторы на основе магнитных жидкостей, в которых используются градиентные магнитные поля. Опыт исследований таких сепараторов как в нашей стране, так и за рубежом показывает, что электромагнитные магнитожидкостные сепараторы (ЭМЖС) целесообразно применять при сепарации дробленого автомобильного лома, кабельного лома, лома электротехнического и электронного оборудования. Опыт эксплуатации таких сепараторов имеется в ряде зарубежных стран.

В нашей стране разработки ЭМЖС проводились как для обогащения минерального сырья, так и для сортировки лома цветных металлов. Однако изучению физических процессов и, прежде всего, электромагнитных процессов в таких сепараторах уделялось недостаточное внимание. Недостаточное развитие теории рассматриваемых электромагнитных аппаратов технологического назначения сдерживает их практическое применение. В связи с этим тема диссертации Филиппова Василия Александровича, посвященная разработке уточненных моделей и методик расчетов и проектирования, позволяющих повысить эффективность электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов, а также усовершенствовать их конструкции является **актуальной**.

Соответствие паспорту научной специальности. Электромагнитный магнитожидкостный сепаратор, характеристики которого регулируются за счет параметров градиентного магнитного поля, а эффект сепарации достигается действием электромагнитных сил относится к категории электрических аппаратов. Диссертация содержит «исследования по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии», что определяет ее соответствие формуле специальности 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты, а направления исследований соответствуют областям исследований, указанным в п. 1,4 и 5 паспорта специальности.

Новизна исследований и полученных научных результатов заключается в разработке аналитической модели и методики расчета траекторий движения немагнитных частиц в ЭМЖС; в разработке математической модели сепаратора с использованием метода конечных элементов, позволяющей учесть нелинейные свойства магнитной системы и уточнить распределения неоднородных магнитного поля и поля избыточного давления; в выявлении закономерностей влияния раз-

личных факторов на процесс сепарации немагнитных частиц в ЭМЖС, в разработке рекомендаций по созданию эффективных конструкций ЭМЖС.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- разработаны методики анализа, математические модели ЭМЖС, устанавливающие зависимость сил сепарации от параметров магнитного поля, отличающиеся учетом распределений магнитного поля и поля избыточного давления в сепараторе, плотности, размеров и формы сепарируемых частиц;

- разработаны программы моделирования, регулируемого электромагнитным способом, процесса разделения немагнитных частиц по плотности в ЭМЖС, отличающиеся уточненным расчетом силы сепарации, действующей на частицы в неоднородном магнитном поле ЭМЖС, расчетом траектории движения частиц с учетом вязкости МЖ, начальной скорости и плотности частицы;

- разработаны методики расчета и проектирования ЭМЖС, отличающиеся учетом конфигурации рабочего зазора сепаратора, изменения формы поверхности МЖ, влияния перераспределения магнитного поля вследствие заполнения рабочего зазора сепарируемыми немагнитными частицами.

Существенную практическую значимость имеют следующие результаты работы:

1. Разработанные математические модели и методики анализа физических процессов в ЭМЖС немагнитных материалов, выявленные в результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей влияния различных факторов на процессы сепарации.

2. Предложенные методики, программы расчета и проектирования ЭМЖС позволяют разрабатывать ЭМЖС с повышенной точностью сепарации, имеют практическую ценность при создании систем регулируемой сепарации немагнитных материалов.

3. Разработанная и созданная полномасштабная физическая модель ЭМЖС, результаты экспериментальных исследований процессов сепарации немагнитных материалов в ЭМЖС, подтвердившие достоверность теоретических выводов и адекватность разработанных математических моделей.

4. Рекомендации по совершенствованию конструкций ЭМЖС и новое техническое решение, защищенное патентом РФ на изобретение.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность полученных результатов обеспечена строгим выполнением математических преобразований, принятием признанных и обоснованных допущений, использованием современных математических моделей и лицензионного программного обеспечения, известных компьютерных систем моделирования. Адекватность результатов и выводов подтверждается согласованностью с известными результатами других авторов, хорошим совпадением экспериментальных результатов с результатами расчетов.

Структура диссертации и основные результаты разделов. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и приложений, содержит список использованной литературы из 124 наименований. Структура и оформление диссертации и автореферата соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации».

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены объект

и предмет исследования. Сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

В первой главе на основе обзора литературы показано современное состояние разработок ЭМЖС и обоснован выбор ЭМЖС в качестве объекта исследования. Рассмотрены и сопоставлены некоторые методы сепарации немагнитных материалов, в частности, отдельных видов минерального сырья и многокомпонентных промышленных отходов. Показана целесообразность использования ЭМЖС для разделения немагнитных материалов на фракции по плотности. Такие сепараторы могут обеспечить высокую точность разделения в широком диапазоне плотностей 1,5 - 20 г/см³. Анализ литературных источников позволил выявить вопросы, требующие решения, прежде всего, в части математического моделирования и расчета ЭМЖС.

Во второй главе выполнено математическое моделирование сил и давлений, действующих на немагнитную частицу в магнитной жидкости, находящейся в зазоре ЭМЖС при воздействии градиентного магнитного поля.

Проанализированы силы, действующие на немагнитную частицу в рабочей зоне сепаратора. Выполнено аналитическое математическое моделирование траектории движения немагнитной частицы, поступающей в ЭМЖС, с допущением о постоянстве вязкости магнитной жидкости и силы сепарации. Предложенные модели движения частиц шарообразной формы в ЭМЖС позволяют рассчитывать глубину, время погружения частиц, условия всплытия или погружения с учетом намагниченности, плотности, высоты столба и динамической вязкости магнитной жидкости, диаметра и материала частиц, высоты лотка подачи и начальной скорости подачи частиц, длины и угла наклона полюсов, градиента напряженности магнитного поля.

На основании предложенных аналитических моделей разработана методика проектирования ЭМЖС. Такая методика позволяет определить размеры активной зоны сепаратора с учетом плотности и размеров немагнитных частиц, производительности по легкой и тяжелой фракциям, уточнить конфигурацию полюсов, обеспечивающих постоянство градиента напряженности магнитного поля и силы сепарации немагнитных частиц в зазоре с учетом присутствия магнитной жидкости с нелинейной характеристикой намагничивания.

В третьей главе проведён численный анализ распределений магнитных полей, сил и давлений, действующих на немагнитные частицы в ЭМЖС. Анализ распределений магнитных полей выполнен методом конечных элементов.

На основании моделирования получены поля распределений избыточного давления в магнитной жидкости как при отсутствии сепарируемых частиц, так и в присутствии частиц разных размеров. Отмечено что, присутствие немагнитной частицы в зазоре вызывает перераспределение магнитного поля и изменение распределения избыточного давления. В ходе расчетов сила сепарации определялась по разнице давлений в магнитной жидкости на верхней и нижней границах частицы. Показано что, при увеличении размеров немагнитной частицы при неизменных размерах рабочей зоны происходит снижение градиента напряженности поля и силы сепарации.

В целом, разработанная методика на основе метода конечных элементов

позволяет рассчитывать перераспределение магнитного поля и давлений в зоне сепарации ЭМЖС с учетом нелинейностей магнитных характеристик магнитной системы и магнитной жидкости и уточнить силы сепарации.

В четвёртой главе описаны результаты экспериментальных исследований и возможности совершенствования конструкции ЭМЖС.

Эксперименты проводились на полномасштабной физической модели ЭМЖС. К полюсам электромагнита прикреплены полюсные наконечники расчетанной формы, обеспечивающей постоянство градиента напряженности магнитного поля в магнитной жидкости и силы сепарации по высоте зазора. Применялась магнитная жидкость производства ИГЭУ с нелинейной характеристикой намагничивания и намагниченностью насыщения 17 кА/м. Минимальный зазор между полюсами 19,5 мм, высота столба магнитной жидкости 40 мм. Изменением тока электромагнита регулируются напряженность магнитного поля и сила сепарации. Созданная установка позволяет проводить как лабораторные исследования процессов сепарации, так обеспечивает возможность испытаний с использованием реальных металлосодержащих отходов.

С помощью датчика Холла выполнено исследование распределения магнитного поля в зазоре сепаратора, показано, что значения индукции не более чем на 8 % отличается от рассчитанных методом конечных элементов. Представляет интерес исследование зависимости требуемого для эффективной сепарации (всплытие частиц) тока в обмотке возбуждения электромагнита от размеров немагнитной частицы. Экспериментально подтверждено, что повышение заполнения объема зазора ЭМЖС немагнитными частицами снижает напряженность и градиент напряженности магнитного поля в зазоре и, как следствие, снижает силу сепарации, что требует повышения тока обмотки для всплытия этих частиц.

Для повышения функциональности ЭМЖС при сепарации многокомпонентных отходов с увеличенной производительностью разработана новая конструкция сепаратора. Предложено вместо одной пары полюсных наконечников применять несколько пар симметричных и параллельных наконечников. При этом образуется ступенчатый межполюсный зазор из нескольких участков с расширение к выходному краю. На каждом участке межполюсного зазора создаются свои характеристики магнитного поля, что обеспечивает повышение точности разделения фракций по плотности и позволяет организовать выход в разные приемники нескольких фракций. В целом проведенные экспериментальные исследования процессов сепарации немагнитных материалов по плотности на созданном опытной установке подтвердили адекватность результатов, полученных в ходе теоретических исследований.

В заключении представлены основные выводы по результатам работы.

Основные результаты диссертационной работы приняты к использованию в учебном процессе на кафедре «Электромеханика» ИГЭУ при подготовке студентов по профилю «Электромеханика» в дисциплине «Электромеханические магнитожидкостные устройства», а также приняты к использованию в ОАО «Вторцветмет» (г. Иваново), что подтверждено соответствующими актами внедрения результатов диссертационной работы.

Полнота отражения результатов диссертации в опубликованных работах. Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 22 печатных работах, включая 4 статьи в изданиях, включенных в список ВАК, и одну статью, индексированную в базе Scopus. Получены два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и патент РФ на изобретение. Основные результаты работы прошли апробацию на ряде международных и всероссийских конференций.

Автореферат отражает содержание диссертации.

По работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В обзоре литературы (раздел 1) недостаточно полно отражены работы в области сепарации материалов в магнитных жидкостях, выполненные как в нашей стране (например, работы Солоденко А.Б., Епугаева Г.А., Губаревича В.Н.), так и за рубежом.

2. При продолжении исследований необходимо уточнить применяемую в диссертации терминологию, согласовав ее с имеющими в технической литературе терминами (в части магнитогравиметрических методов).

3. С учетом существенного влияния на результаты сепарации размеров, формы и ориентации частиц методика расчета траекторий, разработанная для случая шарообразных частиц, имеет ограниченное применение.

4. Чем обусловлено требование постоянства градиента магнитного поля в зоне сепарации при проектировании сепаратора (раздел 2.4)?

5. Помимо сил, учтенных при моделировании сепаратора в разделе 2.2, на частицу действуют также электромагнитная сила, возникающая при входе частицы в магнитное поле, и сила поверхностного натяжения жидкости. Оценивались ли такие силы?

6. Сила сепарации и результат сепарации зависят не только от размеров и формы сепарируемых частиц, но и от ориентации их в рабочей зоне. Оценивался ли этот фактор?

7. Исследования выполнены только для конкретного варианта магнитной жидкости. Отсутствуют оценки влияния свойств разных марок магнитной жидкости на процессы сепарации материалов в ЭМЖС. Отсутствует также оценка изменения свойств магнитной жидкости в процессе эксплуатации за счет попадания в нее примесей.

8. Проводились ли на опытном сепараторе испытания с использованием реальных промышленных отходов с оценкой технологических показателей (степень извлечения целевого продукта в концентрат и содержание его в концентрате)?

9. Текст диссертации содержит отдельные опечатки и неточности:

- в пределах одного раздела изменяется положение осей координат (например, на рис. 2.8 и на рис. 2.12 положение оси X различается);

- в физике намагниченность измеряется в единицах магнитной индукции (T_l), а в работе для намагниченности M используются единицы напряженности (A/m);

- на стр. 42 уравнение 2.14 определяет производительность сепаратора по объему Q ($m^3/\text{ч}$), а на графиках на рис. 2.6-2.7 – по массе Q ($\text{кг}/\text{ч}$);

- рис. 4.21 в тексте диссертации не упомянут;

- непонятна фраза в выводе 3 к разделу 4 «погрешность теоретических исследований не превышает 8%».

Заключение

Отмеченные замечания не снижают значимости диссертационной работы, обобщающей большой объем оригинальных научных исследований. Задачи, поставленные в диссертации, выполнены. В ходе исследований выявлены пути повышения эффективности электромагнитных магнитожидкостных сепараторов с регулируемой электромагнитным способом границей разделения немагнитных материалов по плотности. В целом диссертация Филиппова Василия Александровича «Повышение эффективности электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов» представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения проблемы, имеющей большое значение для развития электромеханики и электрических аппаратов. Диссертация соответствует критериям п.п. 9-11 и 13-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842), предъявляемым к кандидатской диссертации в области технических наук, а Филиппов Василий Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты.

Официальный оппонент,
профессор кафедры «Электротехника
и электротехнологические системы»
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
Университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина», д.т.н., профессор

Дата составления отзыва: 23 ноября 2020 г.

Коняев Андрей Юрьевич

Ф.И.О. оппонента, представившего отзыв: Коняев Андрей Юрьевич.

Почтовый адрес организации: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

E-mail: a.u.konyaev@urfu.ru Тел.: (343)375-45-48

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Электротехника и электротехнологические системы»

Подпись Коняева Андрея Юрьевича заверяю:

ПОДПИСЬ
ЗАВЕРЯЮ.

