

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 622.67

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-95-105

Коняев Андрей Юрьевич*, Кузнецов Константин Вадимович, Черных Илья Викторович

Уральский федеральный университет

* для корреспонденции: a.u.konyaev@urfu.ru

УЛУЧШЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ ДРОБЛЕННОГО ЛОМА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ



Информация о статье

Поступила:

05 июля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

14 ноября 2025 г.

Принята к печати:

15 ноября 2025 г.

Опубликована:

18 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

лом цветных металлов, электродинамическая сепарация, сопоставление конструкций, оценка работоспособности, селективность сепарации, коэффициент селективности, пути повышения селективности

Аннотация.

Одной из современных тенденций в экономике является постоянный рост доли металлов, выплавляемых из вторичного сырья. Одними из постоянно растущих источников вторичного сырья цветных металлов являются отходы электро-технического и электронного оборудования, а также автомобильный лом. Особенностью таких металлосодержащих отходов является их многокомпонентность и наличие сростков материалов. Для раскрытия таких материалов необходимо многостадийное дробление. После этого для выделения отдельных фракций применяются различные методы сепарации (магнитная, электрическая, электродинамическая, виброинергосепарация и т. д.). Для выделения цветных металлов из потока неметаллов наиболее широко применяется электродинамическая сепарация в бегущих или вращающихся магнитных полях. Электродинамические сепараторы могут использоваться также для сортировки дробленого лома цветных металлов по видам и группам сплавов. В статье представлены основные конструкции электродинамических сепараторов, применяемых для решения указанных технологических задач. Показано, что при решении задачи сортировки дробленого лома цветных металлов целесообразно применять электродинамические сепараторы на основе двухсторонних линейных индукторов с подачей материалов по наклонной плоскости. При разработке таких электродинамических сепараторов выбор основных параметров установок необходимо выполнять с учетом критериев работоспособности, энергоэффективности и селективности. В статье приведены примеры такого выбора. Основное внимание уделяется показателям селективности, определяющим качество сортировки металлов и сплавов. На основании теоретических и экспериментальных исследований выявлены факторы, снижающие селективность сепарации. Обоснована необходимость поиска путей повышения селективности для повышения качества сортировки металлов и сплавов. В основу теоретических исследований положено моделирование электромагнитных и электромеханических процессов в рассматриваемых сепараторах. По результатам таких исследований определены возможности повышения селективности сепарации. Полученные рекомендации подтверждены в ходе экспериментальных исследований опытных установок электродинамической сепарации.

Для цитирования: Коняев А.Ю., Кузнецов К.В., Черных И.В. Улучшение селективности электродинамической сепарации дробленого лома цветных металлов // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 6 (182). С. 95-105. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-95-105, EDN: WHTFGD

Благодарность. На данный момент исследование не имело спонсорской поддержки. Авторы признательны рецензентам за внимательное прочтение рукописи и сделанные замечания, а также редакции журнала за внимание к нашей статье.

Введение

В последние годы одной из важных стратегических целей в экономике нашей страны является создание и развитие промышленной переработки отходов производства и потребления [1]. При этом предполагается решение нескольких взаимосвязанных задач: снижение доли отходов, подвергаемых захоронению; максимальное извлечение из отходов отдельных фракций материалов, пригодных для использования в качестве вторичных ресурсов; создание и совершенствование соответствующих технологий и оборудования. Наиболее ценными фракциями твердых отходов являются металлы, извлечение и последующая реализация которых в качестве вторичного сырья позволяет улучшить экономические показатели переработки отходов. При обработке металлосодержащих отходов оказался востребован опыт использования магнитных и электрических методов в технологиях обогащения минерального сырья [2-5]. В частности, магнитные сепараторы (железоотделители) широко применяются для извлечения из отходов ферромагнитных включений на всех стадиях переработки [4-6]. При переработке таких сложных металлосодержащих отходов, как электронный лом, после его многостадийного дробления и магнитной сепарации применяется электрическая сепарация для отделения частиц цветных металлов от неметаллов [6]. К недостаткам электрической сепарации можно отнести получение в качестве целевого продукта коллективного концентрата цветных металлов и невозможность сепарации отходов, содержащих крупные частицы и кусковой лом. Для извлечения цветных металлов при решении указанных задач получили применение электродинамические сепараторы (по принятой за рубежом терминологии: *eddy-current separators* – вихретоковые сепараторы).

Идея электродинамической сепарации известна с конца XIX века [7]. Сепаратор на основе вращающихся электромагнитов, предложенный Т. Эдисоном для сепарации минерального сырья, оказался малоэффективным, и идея развития не получила. Попытки использования электродинамической сепарации для разделения минеральных смесей продолжают и в настоящее время [8-9]. Однако в большинстве случаев частицы обогащаемых материалов имеют малые размеры и обладают низкой электропроводностью, что делает электродинамические сепараторы неработоспособными даже при сильных магнитных полях высокой частоты (до десятков кГц). Можно отметить только успешное применение электродинамической сепарации при извлечении труднообогатимых мелких классов золота из металлосодержащих песков [9]. При этом для питания индукторов используются мощные импульсы тока, создаваемые при разряде конденсаторов.

Вместе с тем электродинамическая сепарация оказалась востребованной в технологиях обработки твердых металлосодержащих отходов. Например, электродинамические сепараторы применяются при извлечении включений цветных металлов из твер-

дых коммунальных отходов и подобных им по морфологическому составу смешанных промышленных отходов [10-13]. При этом основными достоинствами таких сепараторов являются использование воздуха в качестве среды разделения, простота конструкции, легкая встраиваемость в технологические линии и возможность извлечения металлов из отходов без их дробления. При питании индукторов сепараторов от стандартной сети с частотой 50 Гц из потока неметаллов надежно извлекаются куски цветных металлов крупностью более 30-40 мм [12]. При использовании магнитных полей повышенной частоты (от 100 до 600 Гц) удается снизить предел крупности извлекаемых частиц металла до 5 мм [14-15].

В ряде случаев многостадийное дробление является необходимой операцией, позволяющей раскрыть материалы, содержащиеся в отходах. Такой случай характерен при утилизации выведенных из эксплуатации транспортных средств, а также при обработке отходов электрического и электронного лома [16-23]. При этом задача электродинамической сепарации осложняется тем, что на обработку поступают смеси материалов с частицами малой крупности. Например, на механизированную обработку дробленого автомобильного лома отправляются фракции с размерами не более 60 мм, а в случае обработки дробленого электротехнического и электронного лома размеры частиц не превышают 20 мм с тенденцией уменьшения размеров частиц до уровня менее 5-10 мм. Помимо извлечения включений цветных металлов из потока неметаллов при обработке указанных видов дробленых лома и отходов требуется сортировка цветных металлов по видам и группам сплавов, которая также может осуществляться с помощью электродинамических сепараторов. Например, перспективы обработки автомобильного лома связаны с разделением сплавов алюминия на деформируемые и литейные [17-18], при обработке электронного лома – с разделением медных и алюминиевых сплавов [19-21], при обработке кабельного лома – с получением селективных концентратов технически чистых меди и алюминия [22-23].

Таким образом, с развитием производств по механизированной переработке твердых металлосодержащих отходов возрастает роль устройств электродинамической сепарации, что делает их разработку и исследования актуальными. При этом особое внимание следует обращать на обработку дробленого лома цветных металлов, для которой характерны малые размеры сепарируемых частиц и необходима видовая сортировка металлов и сплавов. В течение ряда лет исследования в указанном направлении ведутся в Уральском федеральном университете [12, 18, 21, 23]. В данной статье приводятся некоторые результаты таких исследований, связанные с сепарацией дробленого лома цветных металлов.

Объект и задачи исследований

Электродинамическая сепарация представляет собой метод разделения немагнитных материалов по электропроводности, в основе которого силовое

взаимодействие магнитного поля индуктора с вихревыми токами, наведенными этим полем в проводящих телах. Физические процессы в таких сепараторах аналогичны процессам в линейных индукционных машинах с коротким вторичным элементом (асинхронных двигателях). При этом роль вторичного элемента («ротора») исполняют извлекаемые немагнитные проводящие тела или частицы. В результате взаимодействия с магнитным полем проводящие частицы выделяются из потока неметаллов, на которые магнитное поле не действует. Конструкции электродинамических сепараторов в первую очередь зависят от вида создаваемых переменных магнитных полей. Наибольшее распространение на практике получили сепараторы на основе вращающихся или бегущих магнитных полей. Основные конструкции таких сепараторов представлены на Рис. 1.

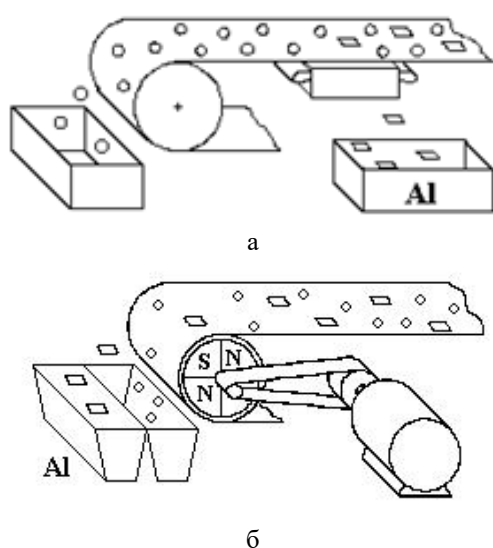


Рис. 1. Конструктивные схемы электродинамических сепараторов с трехфазным линейным индуктором (а) и с вращающимся индуктором на основе постоянных магнитов (б)

Fig. 1. Structural diagrams of eddy-current separators with a three-phase linear inductor (a) and with a rotating inductor based on permanent magnets (b)

Сепараторы на основе трехфазных линейных индукторов просты по конструкции, не имеют вращающихся частей, легко вписываются в готовые технологические линии. Как правило, линейные индукторы таких сепараторов питаются от стандартной электрической сети (380 в, 50 Гц). Однако, как уже отмечалось, при частоте поля 50 Гц сепараторы с односторонним индуктором способны извлекать из потока отходов только крупные включения цветных металлов (крупностью более 40 мм в расчете на алюминий).

Достоинствами сепараторов с вращающимися индукторами на основе постоянных магнитов является возможность создания магнитного поля повышенной частоты (до 500-600 Гц) за счет изменения скорости приводного двигателя. Это позволяет сепарировать частицы металла малой крупности (3-5 мм). Другой особенностью таких сепараторов является отсутствие затрат электроэнергии на возбуж-

дение магнитного поля, но в то же время в таких установках электрическая энергия расходуется в приводах конвейера и самого индуктора. К недостаткам этих сепараторов можно отнести также необходимость подачи обрабатываемого материала монослоем, что ограничивает производительность установок.

Сепараторы с открытой магнитной системой, показанные на Рис. 1, применяются преимущественно для извлечения цветных металлов из потока неметаллов.

При обработке дробленых металлосодержащих отходов с малой крупностью частиц цветных металлов (менее 60 мм в случае автомобильного лома и менее 10-20 мм в случае электронного и кабельного лома) появляется возможность использования

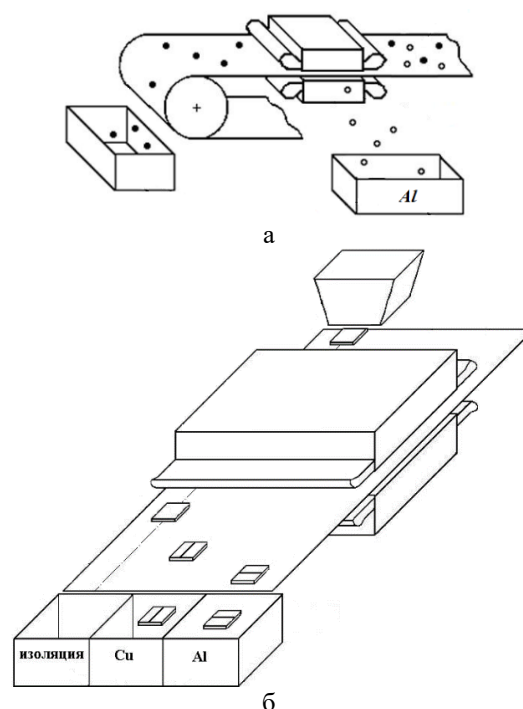


Рис. 2. Сепараторы на основе двухсторонних линейных индукторов с подачей материалов по ленте конвейера (а) и по наклонной плоскости (б)

Fig. 2. Separators based on double-sided linear inductors with material feed along a conveyor belt (a) and along an inclined plane (b)

сепараторов с двухсторонним линейным индуктором, показанных на Рис. 2. В таких сепараторах рабочий зазор между сторонами индуктора может составлять 40 мм (в случае автомобильного лома) или 20 мм и менее (в случае электронного или кабельного лома). Уменьшение зазора и усиление магнитного поля обеспечивают увеличение электромагнитных усилий. В сепараторах с двухсторонним индуктором удастся снизить размер сепарируемых частиц цветных металлов до тех же 3-5 мм на частоте магнитного поля 50 Гц. Отметим, что использование двухстороннего варианта в сепараторах с вращающимися индукторами нецелесообразно из-за существенного усложнения конструкции установок и существенной неравномерности немагнитного зазора, приводящей к ослаблению

магнитного поля и уменьшению электромагнитных усилий.

Сепараторы на основе двухсторонних линейных индукторов с подачей материалов по ленте конвейера (Рис. 2, а) используются для извлечения металлических включений из потока неметаллов. С помощью сепараторов, в которых подача материалов осуществляется по наклонной плоскости (вдоль линии подачи), можно не только отделять металлы от неметаллов, но и выполнять сортировку цветных металлов по видам и группам сплавов, как показано на Рис. 2, б).

Электродинамические сепараторы на основе двухсторонних линейных индукторов являются объектами исследований, результаты которых приводятся в данной работе. Основными задачами исследований являются оценки работоспособности сепараторов (прежде всего с целью уменьшения крупности сепарируемых частиц) и селективности сортировки металлов и сплавов (с целью повышения качества сепарации).

Методы и результаты исследований

Теоретические исследования сепараторов базируются на методах моделирования сепараторов, разработанных в Уральском федеральном университете (УрФУ). Следует отметить целый ряд особенностей линейных индукционных машин, составляющих основу электродинамических сепараторов. Такие машины характеризуются существенной неравномерностью распределения магнитного поля в активной зоне, что связано с разомкнутостью магнитопровода и ограниченностью длины обмотки, а также с затуханием поля при удалении от индуктора. Другая особенность определяется ограниченностью размеров сепарируемых частиц цветных металлов, что приводит к существенному перераспределению вторичных токов по сравнению со случаем длинного вторичного элемента. Указанные особенности требуют решения полевых задач в трехмерной постановке с использованием численных методов (например, метода конечных элементов). Решение такой задачи требует существенных вычислительных ресурсов и нецелесообразно при многовариантных поисковых расчетах. Поэтому в УрФУ для электромагнитных расчетов сепаратора предложено использовать «квазитрехмерный» подход [24]. На первом этапе решается задача расчета вторичных токов и создаваемых электромагнитных сил в проводящей пластине, находящейся в бегущем магнитном поле. Аналитическое решение задачи упрощается с учетом того, что определяющим работу сепаратора является пусковой режим линейной индукционной машины (в момент входа частицы в активную зону индуктора ее скорость в направлении движения поля равна нулю). На этом этапе предварительно определяются электромагнитные усилия и рассчитывается коэффициент поперечного краевого эффекта, учитывающий перераспределения токов в массивном вторичном элементе ограниченных размеров. На втором этапе расчетов полевая задача решается методом конечных элементов в двумерной постановке. При этом электрические параметры вторичного элемента

корректируются с помощью полученного ранее коэффициента поперечного краевого эффекта. Результатом решения являются уточненные значения электромагнитных усилий с учетом неравномерности распределения магнитного поля в активной зоне и с учетом перераспределения токов во вторичном элементе ограниченных размеров.

По описанной методике выполнены расчеты электромагнитных усилий, действующих на сепарируемые частицы цветных металлов в активной зоне двухстороннего линейного индуктора. В УрФУ подобный сепаратор был разработан для обработки дробленого электронного лома [21]. Опытный образец сепаратора, переданный в эксплуатацию, имел следующие основные параметры: полюсное деление $\tau = 66$ мм, немагнитный рабочий зазор $\delta = 18$ мм, амплитуда линейной плотности тока (на две стороны индуктора) $J_{lm} = 180$ кА/м, потребляемая активная мощность $P = 760$ Вт, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,121$. Сепаратор предназначался для разделения алюминиевых и медных сплавов и отделения их от изоляции при обработке фракции дробленого электронного лома крупностью от 10 до 20 мм. При выполнении расчетов данный сепаратор использован в качестве прототипа. В ходе исследований изменялись основные размеры: полюсное деление – 66, 132, 198, 264 мм (значения заданы имеющимся у изготовителя штампом) и немагнитный зазор – 18 и 12 мм. В качестве вторичных элементов при расчетах использовались квадратные частицы (стороны $a = b = \text{var}$, толщина $d = 3$ мм) из сплавов цветных металлов, характерных для электронного лома: 1 – деформируемые сплавы алюминия; 2 – литейные сплавы алюминия; 3 – медь технически чистая; 4 – латунь Л90. Физические свойства выбранных сплавов приведены в Таблице 1 (ρ – плотность металла, γ – удельная электропроводность, γ/ρ – разделительный признак).

Примеры результатов расчета электромагнитных усилий для двух вариантов линейных индукторов показаны на Рис. 3. Черными линиями показаны характеристики сепаратора-прототипа (полюсное деление $\tau = 66$ мм, немагнитный рабочий зазор $\delta = 18$ мм), красными линиями – характеристики

Таблица 1. Физические свойства металлов и сплавов в электронном ломе
Table 1. Physical properties of metals and alloys in electronic scrap

№	Сплав	ρ , кг/м ³	γ , МСм/м	$10^3 \times \gamma/\rho$, МСм·м ² /кг
1	Al (деформируемые)	2710	27	9,96
2	Al (литейные)	2680	21,0	7,84
3	Cu (технически чистая)	8900	56	6,29
4	Латунь (Л90)	8850	25	2,82

улучшенного варианта ($\tau = 132$ мм, $\delta = 12$ мм). На Рис. 3 приводятся зависимости удельных электромагнитных усилий ($F_m = F/m$ – отношение электромагнитного усилия к массе частицы, Н/кг или м/с²) от крупности частиц. Такой показатель целесообразен для оценки работоспособности сепараторов. Например, для извлечения частиц, движущихся по ленте конвейера, необходимо преодолевать силу трения в паре металл – резиноканевая лента. При коэффициенте трения $k_{тр} = 0,4$ минимальное требуемое удельное усилие составляет $k_{тр} \cdot g = 4$ Н/кг. С учетом сопротивления среды, а также малого времени пребывания частиц в активной зоне сепаратора требуемое удельное усилие может возрастать до 10 Н/кг и более.

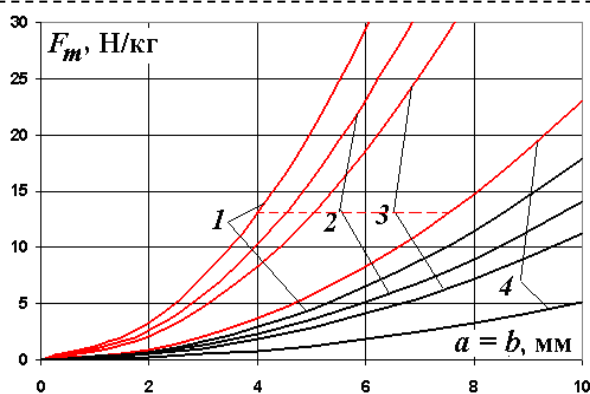


Рис. 3. Зависимости удельных электромагнитных усилий от крупности частиц разных сплавов (номера кривых соответствуют позициям сплавов в Таблице 1)

Fig. 3. Dependences of specific electromagnetic forces on the particle size of different alloys (curve numbers correspond to the positions of alloys in Table 1)

На Рис. 3 нетрудно видеть, что удельные электромагнитные усилия снижаются с уменьшением размеров сепарируемых частиц и их удельной электропроводности. Это может приводить к потере работоспособности электродинамических сепараторов. Например, в случае сепаратора-прототипа (черные линии) надежно извлекаются частицы алюминиевых сплавов крупностью более 10 мм, что соответствует назначению установки и подтверждается результатами промышленных испытаний. В то же время при крупности частиц менее 8 мм такой сепаратор не обеспечивает извлечение даже алюминиевых частиц. Для обеспечения работоспособности сепаратора при крупности частиц менее 10 мм предложено уменьшить рабочий зазор до значения $\delta = 12$ мм, что соответствует уменьшению размера частиц, а также увеличить полюсное деление до $\tau = 132$ мм. Как видно на Рис. 3, предложенный вариант сепаратора позволяет уменьшить нижнюю границу крупности сепарируемых частиц до 4 мм.

При решении задачи сортировки цветных металлов и сплавов оценки работоспособности становятся недостаточно. Более значимой характеристикой сепаратора становится селективность сортировки, поэтому основное внимание в выполненных исследованиях уделялось анализу факторов, влияющих на селективность, и оценке путей ее повышения.

Такие исследования выполнены для сепаратора с подачей материалов по наклонной плоскости (Рис. 2, б).

На стадии электромагнитных расчетов селективность сепарации оценивается по величине ожидаемого коэффициента селективности. Такой коэффициент селективности может быть определен как отношение разделительных признаков различных пар металлов и сплавов. Например, в случае улучшенного варианта сепаратора для пар сплавов, представленных в Таблице 1, получаем значения ожидаемых коэффициентов селективности, показанные в Таблице 2.

Таблица 2. Ожидаемые коэффициенты селективности для пар разных сплавов
Table 2. Expected selectivity coefficients for pairs of different alloys

Номера сплавов Alloy numbers	1	2	3	4
1	1,00	-	-	-
2	1,27	1,00	-	-
3	1,58	1,24	1,00	-
4	3,53	2,78	2,23	1,00

После электромагнитных расчетов сепараторов на стадии проектирования ожидаемые коэффициенты селективности можно рассчитывать как отношение удельных электромагнитных усилий для соответствующих сплавов. Например, в паре литейный сплав алюминия – медь получаем:

$$k_{c0(2-3)} = \frac{F_{m2}}{F_{m3}} = 1,24. \quad (1)$$

Расчеты показывают, что при малых размерах частиц дробленого лома значения ожидаемых коэффициентов селективности по Таблице 2 и по представленному выражению (1) практически совпадают.

Кажущиеся значительными величины ожидаемого коэффициента селективности в условиях реального производства уменьшаются и стремятся к значению $k_{c0} = 1,0$ (при этом сортировка металлов прекращается). Одним из наиболее существенных факторов, ухудшающих селективность, является разброс размеров частиц в потоке. При существенной разнице в размерах сепарируемых частиц мелкие частицы алюминиевых сплавов будут смешиваться с крупными частицами медных сплавов. Например, в паре деформируемый сплав алюминия – латунь Л90 ожидаемый коэффициент селективности равен 3,53. При этом на алюминиевую частицу крупностью 4 мм действует удельное электромагнитное усилие 13,07 Н/кг. Такое же удельное усилие действует на латунную частицу крупностью 7,5 мм (красная пунктирная линия на Рис. 3). Следовательно, обе эти частицы направятся в один приемник. Отметим, что снижению селективности сепарации, в меньшей степени, но способствуют изменение формы частиц и ориентации их в магнитном поле. Очевидным решением указанной проблемы является сужение классов крупности частиц при

сортировке по крупности. Например, для частиц электронного лома с размерами менее 10 мм такими классами могут быть: $-10+7$ мм и $-7+4$ мм.

Одним из факторов, влияющих на качество сортировки, является механическое взаимодействие частиц между собой. Для оценки влияния такого взаимодействия на селективность сепарации была выполнена серия экспериментов с частицами крупностью 5 мм ($5 \times 5 \times 2$ мм) из разных материалов (электротехнические медь (М1) и алюминий (АД31Е), сплав алюминия АМГ3 и текстолит). Эксперименты проводились на опытном сепараторе с двухсторонним индуктором, близком к прототипу ($\tau = 66$ мм, $\delta = 18$ мм, угол наклона плоскости $\alpha = 30^\circ$, расстояние до приемников $L_{\Pi} = 500$ мм). Результаты экспериментов представлены на Рис. 4 (m^* – массовая доля частиц, Y – отклонение частиц от линии подачи на уровне приемников).

При поштучной подаче частиц повторяемость результатов была высокой, что позволило определить ожидаемые средние отклонения частиц разных материалов по оси Y . После этого опыты повторялись для каждого материала в отдельности

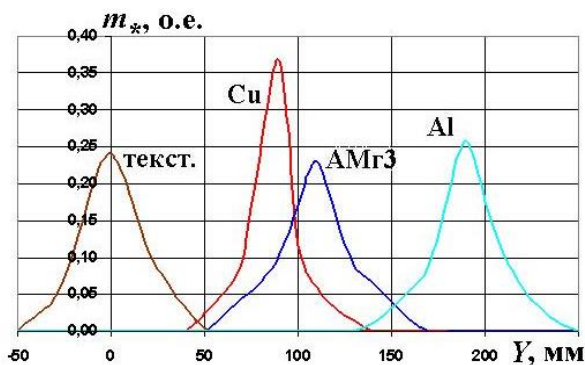


Рис. 4. Распределение частиц различных материалов в конце рабочей плоскости сепаратора

Fig. 4. Distribution of particles of different materials at the end of the working plane of the separator

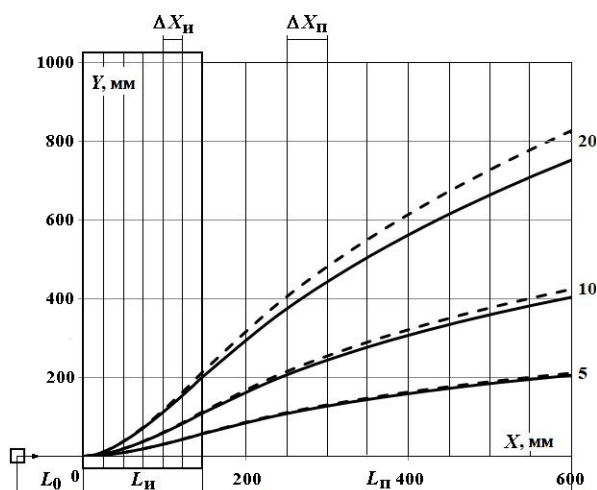


Рис. 5. Траектории движения частиц в сепараторах при разных значениях пускового удельного усилия $F_{m0} = 5, 10$ и 20 Н/кг (цифры на графиках)

Fig. 5. Particle motion trajectories in separators at different values of the starting specific force $F_{m0} = 5, 10$ and 20 N/kg (numbers on graphs)

при подаче порций частиц (по 20 частиц в порции). В конце плоскости оценивалось распределение частиц по Y . Представленные на Рис. 4 кривые распределения получены в результате статистической обработки результатов многократно проделанных опытов. Полученные кривые вполне соответствуют закону нормального распределения. При этом центры распределений совпадают с определенными ранее ожидаемыми отклонениями отдельных частиц материалов. Можно отметить, что более тяжелые медные частицы располагаются более компактно. Очевидно, что механическое взаимодействие частиц является одним из факторов, снижающих селективность сепарации. В данном эксперименте разброс положения частиц от центров распределения составил около ± 50 мм. Для того, чтобы уменьшить влияние этого фактора, необходимо, чтобы реальные отклонения частиц по оси Y значительно превышали 50 мм.

Таким образом, в реальных технологических процессах существует целый ряд факторов, снижающих селективность сортировки цветных металлов и сплавов. Поэтому важной задачей исследований являлся поиск путей, повышающих селективность сепарации. При этом следует учитывать, что реальная селективность разделения частиц разных металлов и сплавов будет определяться траекториями их движения и попаданием в разные приемники. Поскольку траектории движения частиц определяются не только электромагнитными силами, но и конкурирующими с ними механическими, то необходима оценка влияния на селективность сепарации таких сил.

Для расчета траекторий движения проводящих частиц в рабочей зоне сепаратора с подачей материалов по наклонной плоскости в УрФУ разработана методика, основанная на решении нелинейных уравнений движения частиц в зоне сепарации [25]. В предлагаемой методике решение нелинейных уравнений заменяется пошаговым решением системы линейных уравнений. При этом на каждом шаге расчета корректируются значения и направление действующих на частицу электромагнитных и механических сил. В начале расчета рабочая зона сепарации разбивается на участки в направлении линии подачи (ось X), как показано на Рис. 5. Шаги разбиения плоскости под индуктором ΔX_{Π} и после индуктора ΔX_{Π} могут быть разными. Такой подход соответствует кусочно-линейной интерполяции траекторий движения. Методика расчета, реализованная в программном пакете Mathcad, позволяет определять траектории движения частиц исходя из заданных удельных электромагнитных усилий и по заданным основным параметрам установки.

Проводящая частица начинает движение по наклонной плоскости от точки подачи (на расстоянии L_0 до индуктора) под действием скатывающей силы. После входа частицы в индуктор на нее помимо механических сил (силы сопротивления движению (в простейшем случае силы трения) и скатывающей силы) начинает действовать электромагнитная сила. За время пребывания частицы в активной зоне индуктора она получает отклонение

от линии подачи в направлении оси Y . После выхода частицы из индуктора на нее действуют только механические силы. При этом в направлении оси Y частица движется равнозамедленно, что и определяет характер траекторий. Можно отметить, что при равных начальных удельных усилиях (5, либо 10, либо 20 Н/кг) большие отклонения частица получает в сепараторе с полюсным делением $\tau = 132$ мм.

Полученные траектории движения частиц позволяют определить уточненные значения коэффициентов селективности, как отношение отклонений разных частиц. Например, коэффициент селективности для пары частиц, на которые действуют удельные усилия 20 и 5 Н/кг соответственно, для случая $\tau = 132$ мм и $L_n = 450$ мм определяется по выражению:

$$k_c = \frac{y_{20}}{y_5} = 3,91. \quad (2)$$

Следует отметить, что полученное по (2) для данного случая значение коэффициента селективности k_c оказывается меньше ожидаемого коэффициента $k_{c0} = 4,0$.

Рассчитанные указанным способом зависимости

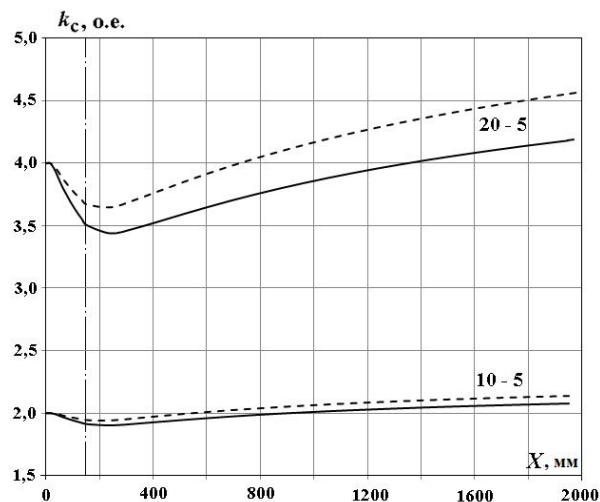


Рис. 6. Зависимости коэффициентов селективности от координаты X для пар частиц с удельными усилиями 20 – 5 Н/кг и 10 – 5 Н/кг (цифры на графиках)

Fig. 6. Dependences of selectivity coefficients on the X coordinate for pairs of particles with specific forces of 20 – 5 N/kg and 10 – 5 N/kg (numbers on graphs)

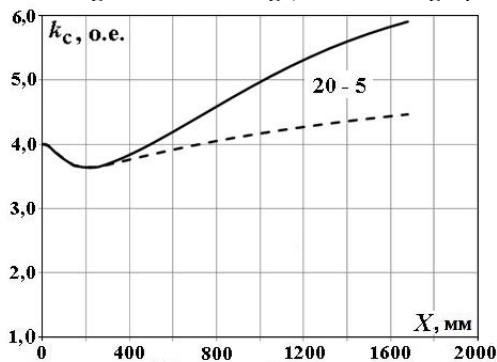


Рис. 7. Пример повышения коэффициента селективности

Fig. 7. Example of increasing the selectivity coefficient

коэффициентов селективности от координаты X для нескольких случаев представлены на Рис. 6. Как и ранее, сплошные линии соответствуют сепаратору-прототипу ($\tau = 66$ мм), а пунктирные – варианту с $\tau = 132$ мм. Нетрудно видеть, что и по уровню селективности предлагаемый вариант сепаратора (с $\tau = 132$ мм) является предпочтительным, поскольку увеличение коэффициента k_c соответствует повышению вероятности попадания сепарируемых частиц в разные приемники.

Как видно на Рис. 6, в активной зоне индуктора (на отрезке $L_n = 150$ мм) наблюдается падение коэффициентов селективности. Такое явление объясняется зависимостью электромагнитного усилия, действующего на проводящую частицу от ее скорости. При малых размерах вторичного элемента ($a = b \ll \tau$) механическая характеристика линейной индукционной машины $F(V/V_0)$ является мягкой. При этом пусковое усилие такой машины при $V/V_0 = 0$ (здесь V – скорость частицы, $V_0 = 2\tau f$ – скорость бегущего магнитного поля, f – частота поля) является максимальным. С ростом относительной скорости V/V_0 электромагнитное усилие уменьшается и при $V/V_0 = 1,0$ усилие становится равным нулю. Из этого следует, что при больших удельных электромагнитных усилиях (например, $F_m = 20$ Н/кг) и соответственно больших ускорениях относительная скорость частицы будет выше, чем при $F_m = 5$ Н/кг. Следовательно, в случае $F_m = 20$ Н/кг будет более значительная потеря электромагнитного усилия, чем при $F_m = 5$ Н/кг, и, как следствие, коэффициент селективности будет уменьшаться. Нетрудно заметить, что указанное снижение электромагнитного усилия, действующего на частицу при ее разгоне в поле индуктора, будет меньше в сепараторе с большим полюсным делением. При увеличении скорости поля $V_0 = 2\tau f$ изменение относительной скорости V/V_0 и соответствующие потери усилия уменьшаются, что обуславливает меньшее снижение коэффициента селективности. Это нетрудно видеть на Рис. 6 – при $\tau = 132$ мм (пунктирные линии) коэффициенты селективности выше.

Рассмотренный пример показывает, что значения коэффициента селективности, определенные в результате расчета траекторий движения частиц, могут существенно отличаться от ожидаемого коэффициента, рассчитанного по значениям электромагнитных усилий или определенного через физические свойства металлов (по разделительному признаку). Вместе с тем показана возможность повышения селективности за счет изменений конструктивных размеров установки. Поэтому были продолжены поиски путей увеличения коэффициента селективности, прежде всего за счет корректировки свойств плоскости подачи (ее размеров и угла наклона, а также коэффициента трения). Выполненные исследования показали влияние указанных параметров на траектории движения частиц и возможность дальнейшего повышения селективности. Один из результатов поиска представлен на Рис. 7.

Пунктирными линиями на Рис. 7 показана характеристика одного из базовых вариантов сепара-

тора: линейный индуктор с полюсным делением $\tau = 132$ мм и шириной $L_{\text{и}} = 150$ мм, текстолитовая плоскость подачи ($k_{\text{тр}} = 0,35$) с углом наклона $\alpha = 30^\circ$ и размерами $L_0 = 130$ мм и $L_{\text{п}} = 1800$ мм. Сплошной линией показана характеристика предлагаемого варианта сепаратора. Этот вариант отличается тем, что плоскость подачи сделана составной. Изменения касаются части плоскости между индуктором и приемниками на отрезке $L_{\text{п}}$. У этой части плоскости изменен угол наклона ($\alpha = 25^\circ$) и коэффициент трения ($k_{\text{тр}} = 0,5$). Указанные изменения обуславливают более быстрое торможение частиц в направлении оси Y . В результате частицы, на которые действовало малое начальное усилие (5 Н/кг), достигают предельного отклонения по оси Y , в то время как частицы с большим начальным усилием (20 Н/кг) продолжают движение в направлении этой оси, что ведет к увеличению коэффициента селективности k_c . Предложенное решение позволило увеличить коэффициент селективности в 1,5 раза.

Рекомендации, полученные при теоретических исследованиях, нашли подтверждение в ходе экспериментов, результаты которых из-за большого объема здесь не приводятся.

Обсуждение результатов

Развитие производств по переработке металло-содержащих отходов требует совершенствования соответствующего технологического оборудования. В частности, для обработки дробленого автомобильного лома, а также лома электронного и электротехнического оборудования могут быть востребованы электродинамические сепараторы. Такие сепараторы могут отделять цветные металлы от неметаллов, а также сортировать цветные металлы по видам и сортам сплавов. При решении второй задачи наиболее важным показателем технологического процесса является селективность сепарации. В статье для оценки качества сепарации введено понятие коэффициента селективности и рассмотрено влияние различных факторов на величину такого коэффициента. Показана возможность существенного повышения селективности.

Выводы. Качество и эффективность электродинамической сепарации дробленого лома цветных металлов зависят от большого количества факторов, определяющих параметры как электрической, так и механической части установок. Поэтому исследования следует продолжать, акцентировав внимание на экспериментальной проверке теоретических положений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г. (утв. Распоряжением Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-п). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/. (дата обращения 15.01.2025).
2. Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. В 2 томах. Т. 1. Маг-

нитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. М. : Горная книга, 2012. 672 с.

3. Пелевин А. Е. Магнитные и электрические методы обогащения. Магнитные методы обогащения. Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2018. 296 с.
4. Wilson R. J., Veasey T. J., Squires D. M. Application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes // *Minerals Engineering*. 1994. № 7. Pp. 975–984.
5. Вайсберг Л. А., Михайлова Н. В. О понятии «обогащение» применительно к твердым коммунальным отходам // *Обогащение руд*. 2016. № 5. С. 43–47. DOI: 10.17580/or.2016.05.08
6. Михайлова Н. В., Ясинская А. В. Технологии извлечения металлов из современного электронного лома. Обогащение руд. 2018. № 5 (377). С. 57–64. DOI: 10.17580/or.201805.10.
7. Pat. 400317 US. Ore separator / T. A. Edison. Patented 26.03.1889.
8. Пелевин А. Е. Оценка возможности применения вихрековых сепараторов для разделения немагнитных минералов // *Обогащение руд*. 2023. № 3. С. 23–28. DOI: 10.17580/or.2023.03.04 .
9. Дядин В.И. Электродинамическая сепарация тонких частиц в импульсном бегущем магнитном поле // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2020. № 1. С. 124–130.
10. Smith Y. R., Nagel J. R., Rajamani R. K. Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review // *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 133. Pp. 149–159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025
11. Fenercioglu A., Barutcu H. Performance Determination of Novel Design Eddy Current Separator for Recycling of Non-Ferrous Metal Particles // *Journal of Magnetism*. 2016. №21(4). Pp. 635–643. DOI: 10.4283/JMAG.2016.21.4.635
12. Коняев А. Ю., Абдуллаев Ж. О., Коняев И. А. Сепараторы для извлечения цветных металлов из ТКО // *Твердые бытовые отходы*. 2017. № 3. С. 36–39.
13. Афанасьев Ю. В., Демин А. Ю., Пашали Д. Ю. [и др.] Способ электродинамической сепарации электропроводящих материалов с использованием индукторов с переменным числом пар полюсов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2023. Т. 23. № 1. С. 82–88. DOI: 10.14529/power230108.
14. Rem P. C., Zhang S., Forssberg E., de Jong T. P. R. The Investigation of Separability of Particles Smaller Than 5mm by Eddy-Current Separation Technology – Novel Design Concepts. *Magnetic and Electrical Separation*. 2000. No 10(2). Pp. 85–105. DOI:10.1155/2000/71758 .
15. Lungu M. Separation of small nonferrous particles using a two successive steps eddy-current separator with permanent magnets // *International Journal of Mineral Processing*, 2009. №93(2). Pp. 172–178. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.07.012
16. Arowosola A., Gaustad G., Brooks, L. Aluminum Alloys in Autobodies: Sources and Sinks // *JOP: Minerals, Metals and Materials Series*. 2019. Vol. 4.

Рр. 1381–1383. DOI: 10.1007/978-3-030-05864-7_171.

17. Sakai S., Yoshida H., Passarini F. [et al.] An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2014. Vol. 16. Issue 1. Pp. 2–20. DOI: 10.1007/s10163-013-0173-2.

18. Абдуллаев Ж. О., Багин Д. Н., Фоминых С. И. [и др.] Исследование электродинамических сепараторов для индукционной сортировки автомобильного лома // Вопросы электротехнологии. 2020. № 2 (27). С. 38–47.

19. Ruan J. [et al.] Key factors of eddy current separation for recovering aluminum from crushed e-waste // Waste Management. 2017. № 60. Pp. 84–90. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.08.018

20. Gulliani S. [et al.] Recovery of metals and valuable chemicals from waste electric and electronic materials: a critical review of existing technologies // Society of Chemistry: RSC Sustainability. 2023. № 1. Pp. 1085–1108. DOI: 10.1039/d3su00034f.

21. Воскобойников В. В. [и др.] Переработка электронного лома: применение электродинамиче-

ских сепараторов // Твердые бытовые отходы. 2014. № 2. С. 26–30.

22. Wedrychowicz M., Kurowiak J., Skrzekut T., Noga P. Recycling of Electrical Cables – Current Challenges and Future Prospects. Materials. 2023. № 16. Article 6632. DOI: 10.3390/ma16206632 .

23. Абдуллаев Ж. О. [и др.] Модернизация электродинамических сепараторов для переработки кабельного лома // Цветные металлы. 2020. № 1. С. 7–13. DOI: 10.17580/tsm.2020.01.01.

24. Коняев А. Ю., Зязев М. Е., Кузнецов К. В. Оценка поперечного краевого эффекта при расчетах линейных индукционных машин технологического назначения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2024. № 50. С. 104–125. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.06 .

25. Bagin D. N., Konyaev A. Y. Modeling an Electrodynamics Separator Based on a Linear Inductor // Russian Electrical Engineering. 2018. Т. 89. № 3. С. 168–173.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Коняев Андрей Юрьевич, профессор кафедры электротехники. Уральский федеральный университет, (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7169-7800>, a.u.konyaev@urfu.ru

Кузнецов Константин Вадимович, старший преподаватель кафедры электротехники. Уральский федеральный университет, (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19).

Черных Илья Викторович, профессор кафедры электротехники. Уральский федеральный университет, (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8144-1726>

Заявленный вклад авторов:

Коняев Андрей Юрьевич – постановка задачи исследования, создание расчетных моделей и экспериментальных установок, выполнение расчетов и экспериментов, обсуждение результатов, подготовка иллюстраций и текста статьи.

Кузнецов Константин Вадимович – создание расчетных моделей и экспериментальных установок, выполнение расчетов и экспериментов, обсуждение результатов, подготовка иллюстраций и текста статьи.

Черных Илья Викторович – создание расчетных моделей и экспериментальных установок, выполнение расчетов и экспериментов, обсуждение результатов, подготовка иллюстраций и текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-95-105

Andrey Yu. Konyaev, Konstantin V. Kuznetsov, Ilya V. Chernykh

Ural Federal University

* for correspondence: a.u.konyaev@urfu.ru

IMPROVEMENT OF SELECTIVENESS OF EDDY-CURRENT SEPARATION OF CRUSHED NON-FERROUS SCRAP METALS



Article info

Received:

05 July 2025

Accepted for publication:

14 November 2025

Accepted:

15 November 2025

Published:

18 December 2025

Keywords: non-ferrous scrap metal; eddy-current separation; comparison of designs; performance evaluation; separation selectivity; selectivity coefficient; ways to improve selectivity.

Abstract.

One of the modern trends in the economy is the constant growth of the share of metals smelted from secondary raw materials. One of the constantly growing sources of secondary raw materials of non-ferrous metals is waste from electrical and electronic equipment, as well as automobile scrap. The peculiarity of such metal-containing waste is their multicomponent nature and the presence of intergrowths of materials. Multistage crushing is necessary to open such materials. After that, various separation methods (magnetic, electrical, eddy-current, vibropneumatic separation, etc.) are used to separate individual fractions. Eddy-current separation in traveling or rotating magnetic fields is most widely used to separate non-ferrous metals from a flow of non-metals. Eddy-current separators can also be used to sort crushed non-ferrous scrap metal by types and groups of alloys. The article presents the main designs of eddy-current separators used to solve the above technological problems. It is shown that when solving the problem of sorting crushed scrap non-ferrous metals, it is advisable to use eddy-current separators based on double-sided linear inductors with material feed along an inclined plane. When developing such eddy-current separators, the main parameters of the units must be selected taking into account the criteria of performance, energy efficiency and selectivity. The article provides examples of such a choice. The main attention is paid to the selectivity indicators that determine the quality of sorting metals and alloys. Based on theoretical and experimental studies, factors reducing the selectivity of separation are identified. The need to search for ways to increase selectivity in order to improve the quality of sorting metals and alloys is substantiated. Theoretical studies are based on modeling of electromagnetic and electromechanical processes in the separators under consideration. Based on the results of such studies, the possibilities of increasing the selectivity of separation are determined. The obtained recommendations are confirmed in the course of experimental studies of pilot eddy-current separation units

For citation: Konyaev A.Yu., Kuznetsov K.V., Chernykh I.V. Improving the selectivity of eddy-current separation of crushed non-ferrous scrap metal. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2025; 6(182):95-105 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-95-105, EDN: WHTFGD

REFERENCES

1. Strategy for the development of industry for the processing, recycling and disposal of production and consumption waste for the period until 2030. (Approved by Government RF Decree No. 84-p of 01/25/2018). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/.
2. Karmazin V.V., Karmazin V.I. Magnetic, electrical and special methods of mineral processing. In 2 volumes. Vol. 1. Magnetic and electrical methods of mineral processing. Moscow: Gornaya kniga; 2012. 672 p.
3. Pelevin A.E. Magnetic and electrical enrichment methods. Magnetic enrichment methods. Ekaterinburg: Publishing house of UGMU; 2018. 296 p.
4. Wilson R.J., Veasey T.J., Squires D.M. Application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes. *Minerals Engineering*. 1994; 7:975.
5. Weisberg L.A., Mikhailova N.V. On the concept of "beneficiation" as applied to solid municipal waste. *Ore beneficiation*. 2016; 5:43. DOI: 10.17580/or.2016.05.08

6. Mikhailova N.V., Yasinskaya A.V. Technologies for extracting metals from modern electronic scrap. *Ore beneficiation*. 2018; 5(377):57–64. DOI: 10.17580/or.201805.10.
7. Pat. 400317 US. Ore separator / T.A. Edison. Patented 26.03.1889.
8. Pelevin A.E. Assessment of eddy-current separator applicability for the separation of non-magnetic minerals. *Ore beneficiation*. 2023; 3:23. DOI: 10.17580/or.2023.03.04.
9. Dyadin V.I. Electrodynamics separation of fine particles in a pulsed running magnetic field. *Physical and technical problems of mineral development*. 2020; 1:124.
10. Smith Y.R., Nagel J.R., Rajamani R.K. Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review. *Minerals Engineering*. 2019; 133:149–159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025.
11. Fenercioglu A., Barutcu H. Performance Determination of Novel Design Eddy Current Separator for Recycling of Non-Ferrous Metal Particles. *Journal of Magnetism*. 2016; 21(4):635–643. DOI: 10.4283/JMAG.2016.21.4.635.

12. Konyaev A.Yu., Abdullaev Zh.O., Konyaev I.A. Separators for the extraction of non-ferrous metals from MSW. *Municipal solid waste*. 2017; 3:36–39.
13. Afanasyev Yu.V. [et al.] Method of electrodynamic separation of conductive materials using inductors with a variable number of pole pairs. *Bulletin of SUSU. Series "Power Engineering"*. 2023; 23(1):82–88. DOI: 10.14529/power230108.
14. Rem P.C., Zhang S., Forssberg E., de Jong T.P.R. The Investigation of Separability of Particles Smaller Than 5mm by Eddy-Current Separation Technology – Novel Design Concepts. *Magnetic and Electrical Separation*. 2000; 10(2):85–105. DOI: 10.1155/2000/71758.
15. Lungu M. Separation of small nonferrous particles using a two successive steps eddy-current separator with permanent magnets. *International Journal of Mineral Processing*. 2009; 93(2):172–178. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.07.012.
16. Arowosola A., Gaustad G., Brooks L. Aluminum Alloys in Autobodies: Sources and Sinks. *JOP: Minerals, Metals and Materials Series*. 2019; 4:1381–1383. DOI: 10.1007/978-3-030-05864-7_171.
17. Sakai S. [et al.] An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2014; 16(1):2–20. DOI: 10.1007/s10163-013-0173-2.
18. Abdullaev Zh.O. [et al.] Study of electrodynamic separators for induction sorting of automotive scrap. *Issues of electrical technology*. 2020; 2(27):38–47.

19. Ruan J. [et al.] Key factors of eddy current separation for recovering aluminum from crushed e-waste. *Waste Management*. 2017; 60:84–90. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.08.018.
20. Gulliani S. [et al.] Recovery of metals and valuable chemicals from waste electric and electronic materials: a critical review of existing technologies. *Society of Chemistry: RSC Sustainability*. 2023; 1:1085–1108. DOI: 10.1039/d3su00034f.
21. Voskoboinikov V.V. [et al.] Recycling of electronic scrap: application of electrodynamic separators. *Solid municipal waste*. 2014; 2:26–30.
22. Wedrychowicz M., Kurowiak J., Skrzekut T., Noga P. Recycling of Electrical Cables – Current Challenges and Future Prospects. *Materials*. 2023; 16:6632. DOI: 10.3390/ma16206632.
23. Abdullaev Zh.O. [et al.] Modernization of electrodynamic separators for processing cable scrap. *Non-ferrous metals*. 2020; 1:7–13. DOI: 10.17580/tsm.2020.01.01.
24. Konyaev A.Yu., Zyazev M.E., Kuznetsov K.V. Evaluation of the transverse edge effect in the calculations of linear induction machines for technological purposes. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2024; 50:104–125. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.06.
25. Bagin D.N., Konyaev A.Y. Modeling an Electrodynamic Separator Based on a Linear Inductor. *Russian Electrical Engineering*. 2018; 89(3):168–173.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Andrey Yu. Konyaev, Professor of the Department of Electrical Engineering. Ural Federal University, (620002, Yekaterinburg, Mira Street, 19), Doctor of Engineering Sciences, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7169-7800>, a.u.konyaev@urfu.ru

Konstantin V. Kuznetsov, Graduate student, Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering. Ural Federal University, (620002, Yekaterinburg, Mira Street, 19).

Ilya V. Chernykh, Professor of the Department of Electrical Engineering. Ural Federal University, (620002, Yekaterinburg, Mira Street, 19), Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8144-1726>

Contribution of the authors:

Andrey Yu. Konyaev – research problem statement; creating calculation models and experimental setups; performing calculations and experiments; discussing the results; preparing illustrations and the text of the article.

Konstantin V. Kuznetsov – creating calculation models and experimental setups; performing calculations and experiments; discussing the results; preparing illustrations and the text of the article.

Ilya V. Chernykh – creating calculation models and experimental setups; performing calculations and experiments; discussing the results; preparing illustrations and the text of the article

Authors have read and approved the final manuscript.

