

УДК 621.313.17:621.928

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.04

**А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин, Е.О. Лаптева**

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ ЧАСТИЦ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКТОРА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА**

Совершенствование технологий сбора и первичной обработки вторичных цветных металлов является необходимым условием для развития вторичной цветной металлургии и создания предприятий по переработке твердых отходов. Одной из таких технологий является электродинамическая сепарация в бегущем магнитном поле. В статье рассмотрены электродинамические сепараторы на основе линейных индукторов. Такие сепараторы легко вписываются в технологические линии и применяются при извлечении цветных металлов из различных видов твердых отходов (автомобильный лом, смешанные производственные и коммунальные отходы, кабельный и электронный лом и др.), а также при обработке сложного лома цветных металлов при подготовке к металлургическим переделам. Установка состоит из конвейера, перемещающего сепарируемые материалы, и индуктора, располагаемого под лентой конвейера. Моделирование взаимодействия между магнитным полем и проводящими частицами осложнено существованием различных электромагнитных и механических (гравитационных и трения) сил. **Цели исследования:** разработка математической модели с учетом действия на частицы различных сил и оценка путей повышения эффективности электродинамической сепарации. **Результаты:** представлена математическая модель для исследования электродинамического сепаратора на основе линейной индукционной машины. Сепарация является результатом комбинированных действий на проводящие частицы различных сил. Следовательно, важной частью модели сепаратора являются уравнения для комбинированного электромагнитного и механического воздействия. В модели учитывается движение проводящих частиц в двух направлениях: перенос частиц по ленте конвейера и поперечное движение под действием электромагнитных сил. Описаны результаты исследования опытного образца электродинамического сепаратора на основе линейных индукторов, созданного в лаборатории кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета. Показана возможность улучшения показателей сепаратора за счет применения линейных индукционных машин со встречно бегущими магнитными полями. Результаты расчетов соответствуют данным промышленных испытаний.

**Ключевые слова:** электродинамическая сепарация, линейная индукционная машина, сепарация цветных металлов, электромагнитные силы, механические силы, математическая модель, результаты исследований.

**A.Yu. Konyaev, D.N. Bagin, E.O. Lapteva**

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

## **MODELING THE MOTION OF CONDUCTING PARTICLES IN THE ACTIVE ZONE OF A LINEAR INDUCTOR OF EDDY-CURRENT SEPARATOR**

The improvement of technologies for the collection and primary processing of secondary non-ferrous metals is a prerequisite for the development of secondary non-ferrous metallurgy and the becoming of solid waste processing enterprises. One such technology is eddy-current (electrodynamical) separation in a traveling magnetic field. Such separators easily fit into technological lines and are used in the extraction of non-ferrous metals from various types of metal-containing solid waste (automobile scrap, mixed production and municipal waste, cable and electronic scrap, etc.), as well as in the processing of complex non-ferrous scrap in preparation it to metallurgical processes. The article discusses eddy-current separators based on linear inductors. The Installation consists of a conveyor that moves the materials to be separated and an inductor located under the conveyor belt. Modeling the interaction between a magnetic field and conductive particles is complicated by the existence of various electromagnetic and mechanical (gravitational and friction) forces. **Purpose:** Development of a mathematical model taking into account the action of various forces on particles and an assessment of ways to increase the efficiency of eddy-current separation. **Results:** A mathematical model for studying an eddy-current separator based on a linear induction machine is presented. Separation is the result of combined actions of different forces on conductive particles. Consequently, an important part of the separator model is the equations for the combined electromagnetic and mechanical action. The model takes into account the movement of conductive particles in two directions: the transfer of particles along the conveyor belt and lateral movement under the influence of electromagnetic forces. The results of the study of a prototype of an eddy-current separator based on linear inductors, constructed in the laboratory of the Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems of the Ural Federal University, are described. The possibility of improving the performance of the separator due to the use of linear induction machines with opposite direction travelling magnetic fields is shown. Calculation results are consistent with industrial test data.

**Keywords:** eddy-current separation, linear induction machine, separation of non-ferrous metals, electromagnetic forces, mechanical forces, mathematical model, research results.

**Введение.** В последние годы в нашей стране большое внимание уделяется развитию производств по промышленной переработке твердых отходов производства и потребления с целью уменьшения доли полигонного захоронения таких отходов и достижения максимальной степени извлечения из них компонентов, пригодных для использования в качестве вторичного сырья [1–2]. Многие виды таких отходов содержат металлические включения. Извлечение металлов необходимо при любом способе утилизации отходов, поскольку является условием надежной работы технологического оборудования и обеспечивает качество товарных продуктов переработки, а реализация металлов в качестве наиболее ценного вторичного сырья существенно улучшает экономические показатели производств.

Для извлечения металлических включений из потоков сыпучих материалов чаще всего применяются электромагнитные методы: магнитная сепарация для удаления черных (ферромагнитных) металлов и электродинамическая сепарация для сбора цветных металлов [3–7]. Можно отметить, что магнитные сепараторы – железоотделители применяются во многих отраслях промышленности, поэтому хорошо изучены и выпускаются серийно [5–6]. В то же время электродинамические сепараторы (по принятой за рубежом терминологии: *eddy-current separators* – вихретоковые сепараторы), хотя и известны давно [7–8], свое применение получили только в конце XX в. в связи с развитием отрасли переработки отходов [7, 9–14].

Существует несколько конструктивных исполнений электродинамических сепараторов, отличающихся способом возбуждения магнитного поля (импульсные, вращающиеся, бегущие и др.) и способами подачи обрабатываемых материалов. Наибольшее распространение в последние годы получили сепараторы с вращающимися индукторами на основе постоянных магнитов, встроенными в шкив конвейера, перемещающего отходы [10–12]. Сепараторы такого типа отличаются малым энергопотреблением. В ряде случаев конкуренцию им могут составить сепараторы на основе трехфазных линейных индукторов, устанавливаемых под лентой конвейера. Эти сепараторы отличаются высокой производительностью и хорошо встраиваются в готовые технологические линии. Исследованием и разработкой таких сепараторов совместно с заинтересованными предприятиями занимается кафедра электротехники УрФУ [13–20]. Один из подходов, используемых при исследованиях, обсуждается в данной статье.

**Содержание и результаты исследований.** Устройство рассматриваемого электродинамического сепаратора схематично показано на рис. 1. Обрабатываемые сыпучие материалы, перемещаясь по конвейеру, попадают в активную зону линейного индуктора, установленного под лентой. Бегущее магнитное поле, создаваемое обмоткой индуктора, воздействует на проводящие немагнитные частицы, заставляя их перемещаться в поперечном по отношению к движению ленты направлении (по оси  $y$ ). Такие частицы выносятся из потока материалов и собираются сбоку от конвейера. При высокой производительности сепараторов (большие ширина ленты и скорость конвейера) целесообразно использовать двухсторонний выход металлов, применяя линейные

индукторы с разбегающимися магнитными полями [13, 19]. По сути, электродинамический сепаратор представляет собой линейную индукционную машину (ЛИМ), работающую по принципу асинхронного двигателя. При этом извлекаемая проводящая частица выполняет роль вторичного элемента такого двигателя.

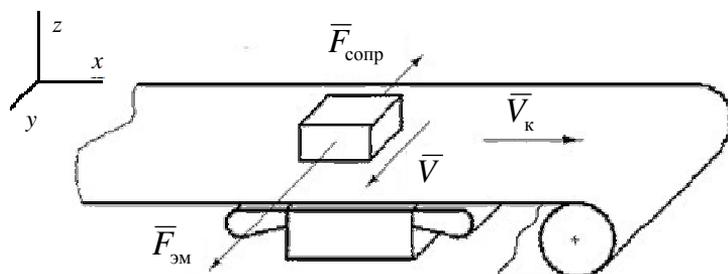


Рис. 1. Схема электродинамического сепаратора на основе линейного индуктора с подачей материалов по ленте конвейера

Конечный результат сепарации зависит от значений как электромагнитных сил  $F_{эм}$ , так и механических сил сопротивления движению  $F_{сопр}$ . В простейшем случае при подаче материала разреженным потоком сила сопротивления близка к силе трения, определяемой по известному выражению:

$$F_{тр} = k_{тр} \cdot m \cdot g. \quad (1)$$

Коэффициент трения в (1) зависит от типа ленты конвейера. Например, в случае резиноканевой ленты  $k_{тр} = 0,35 \dots 0,40$ . В установках большой производительности сепарируемый материал подается толстым слоем и к силе трения добавляется сила сопротивления среды, зависящая от физических свойств материала, от плотности потока, от скорости движения извлекаемых частиц. Указанные механические силы направлены в одну сторону, поэтому эффект сопротивления среды можно учесть за счет увеличения в (1) величины  $k_{тр}$ . Конкретные значения  $k_{тр}$  для реальных сред целесообразно определять экспериментально. Например, при разработке сепараторов для обработки твердых коммунальных отходов в ходе экспериментов были получены значения коэффициента на уровне 0,6–0,8 [13].

Очевидно, что извлекаемая из потока проводящая частица начинает свое движение при условии  $F_{эм} > F_{сопр}$ . При этом частица участвует в двух движениях: переносится лентой конвейера со скоростью  $V_k$

в направлении оси  $x$  и движется ускоренно под действием результирующей силы ( $F_{эм} - F_{сопр}$ ) в направлении оси  $y$ . В результате формируются криволинейные траектории движения частиц, как показано на рис. 2. Время пребывания частиц в зоне сепарации  $t_i$  определяется шириной индуктора  $L_{и}$  и скоростью конвейера  $V_k$ . За это время высокопроводящие частицы успевают переместиться за пределы ленты (траектория 1), частицы металлов с малой электропроводностью или частицы малых размеров могут не достичь края ленты (траектория 2) и не извлекаются из потока. Частицы неметаллов в зоне сепарации не отклоняются от линии движения на конвейере (траектория 3).

Параметры движения извлекаемой проводящей частицы в зоне сепарации (ускорение под действием электромагнитной силы, скорость, перемещение), определяющие ее траекторию, можно найти из решения уравнения движения, которое определяется выражением:

$$F_{эм}(V) - F_{сопр}(V) = m \frac{dV}{dt}. \quad (2)$$

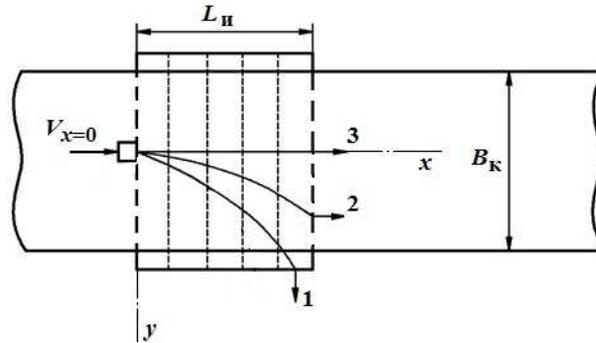


Рис. 2. Модель сепаратора для расчета траекторий движения извлекаемых частиц

В общем случае сила сопротивления и электромагнитная сила зависят от скорости движения частицы, что делает уравнение (2) нелинейным. При малых скоростях движения частиц (менее 1–2 м/с) силы сопротивления не зависят от скорости, и можно принимать  $k_{тр} = const$ . В ряде случаев можно принять допущение о постоянстве электромагнитной силы, развиваемой в сепараторе. Такое допущение приемлемо, когда скорость частицы  $V$  существенно уступает скорости бегущего магнитного поля  $V_0$  (ЛИМ работает в режиме, близком к режиму пуска, при скольжении, близком к  $s = 1$ ). Как показано в [17], при таких

допущениях удается связать отклонения извлекаемой частицы от линии подачи  $B$  с действующим на нее электромагнитным усилием простым аналитическим выражением, которое удобно использовать при многовариантных поисковых расчетах (например, при сопоставлении вариантов конструкции сепаратора по величине требуемых для извлечения усилий):

$$B = \frac{L_u^2}{2V_\kappa^2} (F_m - k_{\text{тр}} \cdot g), \quad (3)$$

где  $F_m$  – удельное электромагнитное усилие (усилие, отнесенное к массе частицы), Н/кг или м/с<sup>3</sup>,  $F_m = F_{\text{ЭМ}}/m$ .

В то же время указанное допущение сужает область использования методики. Для уточнения траекторий движения частиц при расчетах следует учитывать зависимость электромагнитного усилия от скорости движения частиц в направлении бегущего поля (по оси  $y$ ). Такая зависимость определяется видом механической характеристики ЛИМ. При больших немагнитных зазорах, характерных для электродинамических сепараторов, и малом размере частиц ЛИМ имеет мягкую механическую характеристику, приближающуюся к прямолинейной. При этом изменение усилия можно приближенно определять по выражению:

$$F_{\text{ЭМ}}(V) = F_{\text{ЭМ}0} \left(1 - \frac{V_y}{V_0}\right), \quad (4)$$

где  $F_{\text{ЭМ}0}$  – пусковое усилие,  $V_0$  – скорость бегущего магнитного поля,  $V_0 = 2\tau f$ ,  $\tau$  – полюсное деление индуктора,  $V_y$  – текущая скорость частицы в направлении движения поля.

В случае ЛИМ с малым количеством полюсов ( $2p = 2, 4, 6$ ) распределение магнитного поля и электромагнитных усилий по длине ЛИМ существенно неравномерно, поэтому необходимо дополнительно учитывать изменение электромагнитных сил по длине индуктора с учетом положения частиц над ним. Указанная зависимость электромагнитного усилия от скорости и положения частицы делает уравнение (2) нелинейным, что затрудняет его аналитическое решение.

С учетом изложенного для расчета траектории движения проводящих частиц в рассматриваемых сепараторах предлагается разбить активную зону ЛИМ на участки шириной  $\Delta L = L_n/n$  (на рис. 2 число таких участков разбиения  $n = 5$ , на практике целесообразно иметь  $n \geq 10$ ) и полагать, что электромагнитное усилие в пределах каждого участка остается постоянным. При таком подходе на каждом шаге ре-

шается линейное уравнение с определением параметров движения (составляющие скорости и перемещения) в конце участка. По этим параметрам, являющимися начальными для следующего участка, корректируется электромагнитное усилие, и решение повторяется.

Для первого участка начальными условиями являются следующие параметры:

– положение частицы:  $x = 0, y = 0$ ;

– начальная скорость частицы  $V_{x=0} = V_k$  и проекции скорости  $V_x = V_k; V_y = 0$ );

– пусковое электромагнитное усилие  $F_{эм0}$ , соответствующее положению частицы над линейным индуктором.

С учетом изложенного для первого участка получаем следующий порядок расчета:

– время прохождения участка  $\Delta L$  при движении ленты конвейера:

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{V_k}, \quad (5)$$

– ускорение частицы в направлении бегущего магнитного поля:

$$a_1 = F_{m0} - k_{тр}g, \quad (6)$$

– составляющие скорости в конце 1-го участка:

$$V_{1x} = V_k, V_{1y} = V_{0y} + a_1\Delta t, \quad (7)$$

– перемещение частицы (по осям  $x$  и  $y$ ):

$$B_{x1} = \Delta L, B_{y1} = V_{0y}\Delta t + \frac{a_1 \cdot (\Delta t)^2}{2}. \quad (8)$$

С учетом полученных параметров корректируется значение электромагнитного усилия по (4). При этом с учетом нового положения частицы над индуктором уточняется значение  $F_{эм0}$ . Новое значение усилия вместе со значениями скорости и перемещения, определенных по (7) и (8), составляют начальные условия для второго участка.

Аналогично определяются параметры движения частицы на втором участке:

– ускорение частицы на 2-м участке:

$$a_2 = F_{m1} - k_{тр}g, \quad (9)$$

– составляющие скорости в конце 2-го участка:

$$V_{2x} = V_k, V_{2y} = V_{1y} + a_2\Delta t, \quad (10)$$

– перемещение частицы от исходного положения

$$B_{x2} = 2\Delta L, \quad B_{y2} = B_{y1} + V_{1y}\Delta t + \frac{a_2(\Delta t)^2}{2}. \quad (11)$$

С учетом новых параметров движения частицы снова уточняется значение электромагнитного усилия. Далее расчеты повторяются для последующих участков индуктора до выхода частицы за пределы ленты или индуктора.

Представленная методика расчета траекторий сепарируемых частиц была использована при исследовании характеристик опытно-промышленного образца электродинамического сепаратора, разработанного и созданного в УрФУ совместно с АО «Уралэнергоцветмет» [13, 18]. Односторонний линейный индуктор, составляющий основу сепаратора, имеет следующие основные параметры: количество полюсов  $2p = 8$  (крайние полюсы – укороченные); полюсное деление  $\tau = 0,186$  м; питание от стандартной сети (напряжение  $U_{л} = 380$  В, частота  $f = 50$  Гц); удаление извлекаемой частицы от поверхности индуктора  $h = 0,01$  м; скольжение  $s = 1$ ; амплитуда линейной плотности тока  $J_{\text{пм}} = 110$  кА/м.

Расчету траекторий движения сепарируемых частиц предшествуют электромагнитные расчеты ЛИМ сепаратора, выполняемые по методике, разработанной в УрФУ и учитывающей ограниченность размеров вторичного элемента (сепарируемой частицы) [15]. В ходе исследований определялись удельные электромагнитные усилия, действующие на частицы алюминиевых сплавов: деформируемых (средняя удельная электропроводность  $\gamma = 27$  МСм/м, плотность  $\rho = 2,71$  г/см<sup>3</sup>) и литейных ( $\gamma = 21$  МСм/м,  $\rho = 2,68$  г/см<sup>3</sup>), наиболее часто встречающихся в таких видах отходов, как автомобильный лом или коммунальные отходы. Оценка усилий выполнена для плоских квадратных частиц со стороной  $b$ . Толщина частиц изменялась от 1 до 10 мм (для деформируемых сплавов) и от 3 до 30 мм (для литейных сплавов). Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Как видно на рис. 3, электромагнитные усилия в ЛИМ электродинамического сепаратора существенно зависят от размера частиц. Как показывает опыт, извлечение из потока отходов алюминиевых включений крупностью более 60 мм трудности не вызывает. Поэтому исследования выполнены для частиц меньших размеров. В целом элек-

тромагнитные расчеты позволили определить диапазон удельных электромагнитных усилий  $F_m = 0 \dots 50$  Н/кг, характерных для рассматриваемой установки.

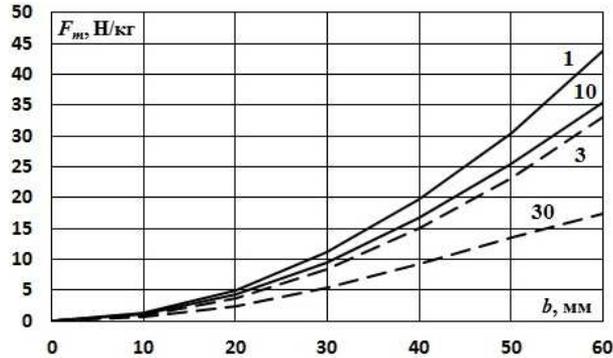


Рис. 3. Зависимость удельного электромагнитного усилия от крупности частиц из деформируемых (сплошные линии) и литейных (пунктир) алюминиевых сплавов при разной их толщине (цифры на графиках, мм)

Расчеты траекторий движения частиц и отклонений их от линии подачи по методике, приведенной выше, выполнены для варианта сепаратора, имеющего следующие параметры: ширина индуктора  $L_{и} = 0,35$  м, скорость конвейера  $V_{к} = 1$  м/с, ширина ленты конвейера  $B_{к} = 1$  м, коэффициент трения  $k_{тр} = 0,4$  [13, 18]. Для сравнения отклонения частиц при заданных удельных электромагнитных усилиях определены также без учета нелинейности уравнения (2) по выражению (3). Сравнение результатов расчетов показано на рис. 4.

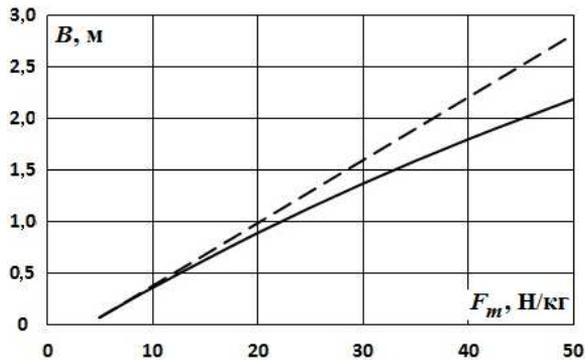


Рис. 4. Расчетные отклонения частиц от линии подачи без корректировки (пунктир) и с корректировкой усилия (сплошная линия)

Как видно на рис. 4, ошибка в оценке отклонений частиц без корректировки усилия нарастает с увеличением удельного электромагнитного усилия. В данном случае при  $F_m = 50$  Н/кг она составляет 30 %. Расчеты показывают, что подобная ошибка увеличивается с уменьшением полюсного деления ЛИМ, т.е. с уменьшением скорости бегущего магнитного поля. Это означает, что оценка отклонений сепарируемых частиц по выражению (3) не всегда корректна.

Расчеты траекторий частиц по предлагаемой методике выполнены для двух вариантов сепаратора: с односторонним выходом металла и с двухсторонним выходом, достигаемым за счет использования линейных индукторов с разбегающимися магнитными полями. На рис. 5 представлены траектории частиц для сепаратора с односторонним выходом металла.

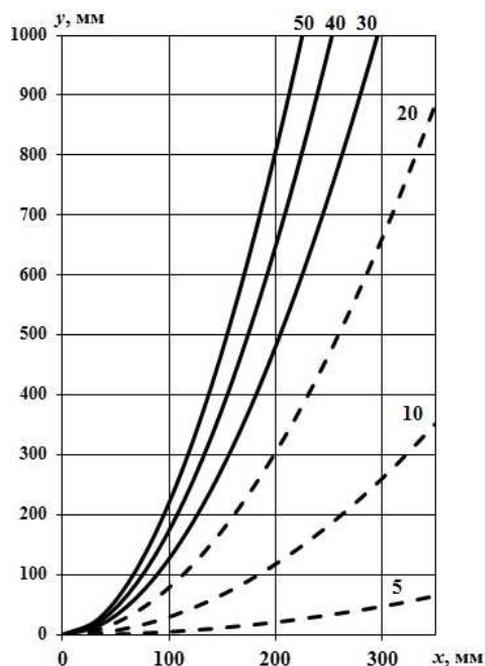


Рис. 5. Траектории движения частиц в сепараторе с односторонним выходом металла при ширине индуктора 0,35 м, скорости ленты конвейера 1 м/с, ширине ленты 1 м и коэффициенте трения 0,4 (цифрами показаны значения  $F_m$ )

В худшем случае в таком сепараторе частица должна преодолеть расстояние, равное ширине ленты конвейера  $B_k = 1$  м. Сплошными линиями показаны траектории движения частиц, которые извлекаются

при указанных параметрах сепаратора, а пунктирными линиями – траектории частиц, которые не извлекаются. Как видно на рис. 4, при расположении частиц на краю ленты (на входном краю индуктора) расстояние  $B_k = 1$  м способны преодолеть только те из них, на которые воздействует усилие, большее  $F_m = 23$  Н/кг. Такому условию соответствует только часть частиц алюминиевых сплавов крупностью более 50 мм (см. рис. 3). Очевидно, что при расположении частиц ближе к центру ленты и ближе к выходному краю индуктора граничное значение удельного электромагнитного усилия будет уменьшаться. Например, для извлечения частиц, расположенных в 100 мм от противоположного края ленты, достаточно усилия  $F_m = 7$  Н/кг. Из такого положения на ленте могут извлекаться алюминиевые частицы крупностью более 30 мм. В целом выполненные исследования показывают, что рассматриваемый вариант сепаратора не позволяет извлекать мелкие фракции металлов.

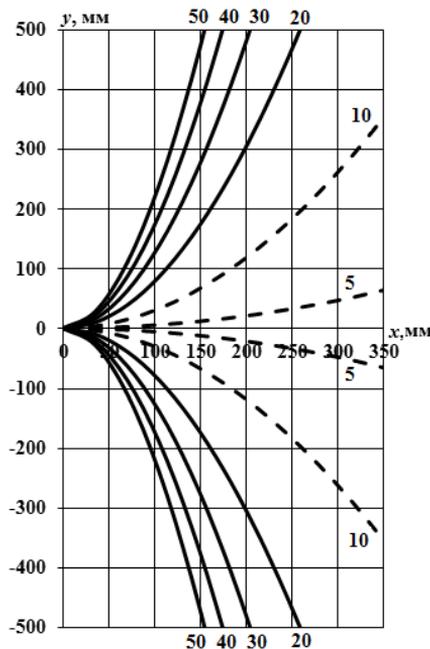


Рис. 6. Траектории движения частиц в сепараторе с двухсторонним выходом металла

Одним из способов улучшения технологических показателей рассматриваемых сепараторов является использование линейных индукторов, создающих разбегающиеся магнитные поля [13, 19]. В этом

случае обеспечивается выход металла в обе стороны от конвейера, а сепарируемым частицам в худшем случае необходимо преодолеть расстояние, равное  $0,5B_k$ . Результаты расчетов траекторий частиц для такого случая при сохранении остальных параметров установки показаны на рис. 6. Нетрудно видеть, что количество частиц, извлекаемых за пределы ленты, увеличивается, а граничное значение удельного электромагнитного усилия, при котором прекращается сепарация частиц, снижается до  $F_m = 13$  Н/кг. Это означает, что алюминиевые частицы, расположенные у центра ленты, будут извлекаться только при крупности более 40 мм. Как и ранее, при расположении частиц ближе к краю ленты требуемое удельное усилие снижается, и могут сепарироваться частицы крупностью более 30 мм.

**Выводы.** Таким образом, выполненные исследования показали, что предложенная методика расчета электродинамических сепараторов позволяет рассчитывать траектории движения сепарируемых частиц и оценивать работоспособность установок. Оценки, полученные при расчетах опытно-промышленного сепаратора, совпадают с результатами заводских испытаний [13, 19]: надежно извлекаются алюминиевые частицы крупностью более 50 мм (при одностороннем выходе металла) и более 40 мм (при двухстороннем выходе). Такой результат позволяет рекомендовать предложенную методику расчета сепараторов для практического использования.

### Библиографический список

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) [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_289114/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/)
2. Колычев Н.А. Оптимизация обращения с твердыми бытовыми и близкими к ним по составу промышленными отходами в крупных и средних населенных пунктах России // Биосфера: междисциплинарный науч. и прикладной журнал. – 2013. – Т. 5, № 4. – С. 393–418.
3. Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Олейник А.В. Технология отходов. – М.: Альфа-М: Инфра-М, 2011. – 352 с.
4. Колобов Г.А., Бредихин В.Н., Чернобаев В.М. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. – М.: Металлургия, 1993. – 288 с.

5. Сумцов В.Ф. Электромагнитные железоотделители. – М.: Машиностроение, 1981. – 212 с.
6. ГОСТ 10512-93. Сепараторы магнитные и электромагнитные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 27 с.
7. 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, No. 7. – P. 975–984. DOI: 10.1016/0892-6875(94)90027-2/
8. Кармазин В.И., Кармазин В.В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. – М.: Горная книга, 2017. – 672 с.
9. Schloemann E. Eddy current techniques for segregating nonferrous metals from waste // *Resources, Conservation and Recycling*. – 1982, No. 5. – P. 149–162. DOI: 10.1016/0361-3658(82)90024-8
10. Lungu M., Rem P. Eddy-current separation of small nonferrous particles by a single-disk separator with permanent magnets // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2003. – 39(4). – P. 2062–2067. DOI: 10.1109/tmag.2003.812724
11. Settimo F., Belivacqua P., Rem P. Eddy current separation of fine non-ferrous particles from bulk streams // *Physical Separation in Science and Engineering*. – 2004. – Vol. 13, No. 1. – P. 15–23. DOI: 10.1080/00207390410001710726
12. 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. – P. 149–159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025
13. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А.А. Патрик, Н.Н. Мурахин, Т.Н. Дерендяева, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // *Промышленная энергетика*. – 2001. – № 6. – С. 16–19.
14. Features of electrodynamic separation the fine fraction of municipal solid waste / A.Yu. Konyaev, Zh.O. Abdullaev, D.N. Bagin, I.A. Konyaev // *Ecology and Industry of Russia*. – 2017. – Vol. 21, No. 6. – P. 4–9. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-6-4-9
15. Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. – 104 с.

16. Коняев А.Ю., Коняев И.А., Назаров С.Л. Применение электродинамических сепараторов в технологиях вторичной цветной металлургии // Цветные металлы. – 2012. – № 11. – С. 22–26.

17. Электродинамические сепараторы с вращающимся магнитным полем для обработки измельченного электронного лома / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, С.Л. Назаров, Н.С. Якушев // Промышленная энергетика. – 2015. – № 7. – С. 44–47.

18. Коняев А.Ю., Абдуллаев Ж.О., Коняев И.А. Сепараторы для извлечения цветных металлов из твердых коммунальных отходов // Твердые бытовые отходы. – 2017. – № 3. – С. 36–39.

19. Линейные индукционные машины со встречно бегущими магнитными полями для энергоэффективных технологий / А.Ю. Коняев, Б.А. Сокунов, Ж.О. Абдуллаев, Е.Л. Швыдкий // Промышленная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 2–7.

20. Konyayev A.Y., Bagin D.N. Modeling and Electrodynamics Separator Based on a Linear Inductor // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89, No 3. – P. 168–173. DOI: 10.3103/S1068371218030100

### References

1. Strategiiia razvitiia promyshlennosti po obrabotke, utilizatsii i obezvrezhivaniuu otkhodov proizvodstva i potrebleniia na period do 2030 g. (utv. Raspriazheniem Pravitel'stva RF ot 25.01.2018 № 84-r) [The development strategy of the industry for the treatment, utilization and disposal of industrial and consumption waste for the period up to 2030. (Approved by Government RF Decree No. 84-p of 25.01.2018)], available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_289114/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/)

2. Kolychev N.A. Optimizatsiia obrashcheniia s tverdymi bytovymi i blizkimi k nim po sostavu promyshlennymi otkhodami v krupnykh i srednikh naseleennykh punktakh Rossii [Optimization of municipal solid waste and similar industrial waste handling in large and medium urban areas in Russia]. *Biosfera: mezhdistsiplinarnyi nauchnyi i prikladnoi zhurnal*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 393-418.

3. Shubov L.Ia., Stavrovskii M.E., Oleinik A.V. Tekhnologiiia otkhodov [Waste technology]. Moscow: Al'fa-M: Infra-M, 2011, 352 p.

4. Kolobov G.A., Bredikhin V.N., Chernobaev V.M. Sbor i obrabotka vtorichnogo syr'ia tsvetnykh metallov [Collection and processing of secondary raw materials of non-ferrous metals]. Moscow: Metallurgiiia, 1993, 288 p.

5. Sumtsov V.F. Elektromagnitnye zhelezootdeliteli [Electromagnetic separators]. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 212 p.

6. GOST 10512-93. Separatory magnitnye i elektromagnitnye. Obshchie tekhnicheskie usloviia [GOST 10512-93 Magnetic and electromagnetic separators. General technical conditions]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1995, 27 p.

7. 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, no. 7, pp. 975-984. DOI: 10.1016/0892-6875(94)90027-2/

8. Karmazin V.I., Karmazin V.V. Magnitnye, elektricheskie i spetsial'nye metody obogashcheniia poleznykh iskopaemykh. Tom 1. Magnitnye i elektricheskie metody obogashcheniia poleznykh iskopaemykh [Magnetic, electrical and special methods of mineral processing. Volume 1. Magnetic and electrical methods of mineral processing]. Moscow: Gornaia kniga, 2017, 672 p.

9. Schloemann E. Eddy current techniques for segregating nonferrous metals from waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 1982, no. 5, pp. 149-162. DOI: 10.1016/0361-3658(82)90024-8

10. Lungu M., Rem P. Eddy-current separation of small nonferrous particles by a single-disk separator with permanent magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, 39(4), p. 2062-2067. DOI: 10.1109/tmag.2003.812724

11. Settimo F., Belivacqua P., Rem P. Eddy current separation of fine non-ferrous particles from bulk streams. *Physical Separation in Science and Engineering*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 15-23. DOI: 10.1080/00207390410001710726

12. 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, pp. 149-159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025

13. Patrik A.A., Murakhin N.N., Derendiaeva T.N., Konjaev A.Iu., Nazarov S.L. Ustroistva dlia elektrodinamicheskoi separatsii loma i otkhodov tsvetnykh metallov [Devices for electrodynamic separation of non-ferrous metal scrap and waste]. *Promyshlennaia energetika*, 2001, no. 6, pp. 16-19.

14. Konyaev A.Yu., Abdullaev Zh.O., Bagin D.N., Konyaev I.A. Features of electrodynamic separation the fine fraction of municipal solid waste. *Ecology and Industry of Russia*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 4-9. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-6-4-9

15. Koniaev A.Iu., Koniaev I.A., Markin N.E., Nazarov S.L. Elektrodinamicheskie separatory s begushchim magnitnym polem: osnovy teorii i rascheta [Electrodynamic separators with a traveling magnetic field: fundamentals of theory and calculation]. Yekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet, 2012, 104 p.

16. Koniaev A.Iu., Koniaev I.A., Nazarov S.L. Primenenie elektrodinamicheskikh separatorov v tekhnologiiakh vtorichnoi tsvetnoi metallurgii [Electrodynamic separators application in secondary non-ferrous metallurgy]. *Tsvetnye metally*, 2012, no. 11, pp. 22-26.

17. Koniaev A.Iu., Koniaev I.A., Nazarov S.L., Iakushev N.S. Elektrodinamicheskie separatory s vrashchaiushchimsia magnitnym polem dlia obrabotki izmel'chennogo elektronnoogo loma [Electrodynamic separators with a rotating magnetic field for processing crushed electronic scrap]. *Promyshlennaia energetika*, 2015, no. 7, pp. 44-47.

18. Koniaev A.Iu., Abdullaev Zh.O., Koniaev I.A. Separatory dlia izvlecheniia tsvetnykh metallov iz tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Separators for the extraction of non-ferrous metals from municipal solid waste]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2017, no. 3, pp. 36-39.

19. Koniaev A.Iu., Sokunov B.A., Abdullaev Zh.O., Shvydkii E.L. Lineinye induktsionnye mashiny so vstrechno begushchimi magnitnymi poliami dlia energoeffektivnykh tekhnologii [Linear induction machines with counter-running opposite direction travelling magnetic fields for energy-efficient technologies]. *Promyshlennaia energetika*, 2017, no. 4, pp. 2-7.

20. Konyaev A.Y., Bagin D.N. Modeling and Electrodynamic Separator Based on a Linear Inductor. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, no. 3, pp. 168-173. DOI: 10.3103/S1068371218030100

### Сведения об авторах

**Коняев Андрей Юрьевич** (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета (УрФУ) им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: a.u.konyaev@urfu.ru).

**Багин Дмитрий Николаевич** (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета (УрФУ) им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: bagin19@mail.ru).

**Лаптева Екатерина Олеговна** (Екатеринбург, Россия) – магистрант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета (УрФУ) им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: ekaterinamorsyo@yandex.ru).

### **About the authors**

**Konyaev Andrey Yuryevich** (Ekaterinburg, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrotechnological systems of the Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: a.u.konyaev@urfu.ru).

**Bagin Dmitry Nikolaevich** (Ekaterinburg, Russian Federation) is a Candidate of Technical Sciences, Lector of the Department of Electrical Engineering and Electrotechnological systems of the Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: bagin19@mail.ru).

**Lapteva Ekaterina Olegovna** (Ekaterinburg, Russian Federation) is a Master Student Department of «Electrical engineering and electrotechnological systems» Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: ekaterinamorsyo@yandex.ru).

Получено 07.10.2020