

В.Н. ЛАПИЦКИЙ, канд. техн. наук,

П.И. ПИЛОВ, д-р техн. наук,

А.В. ГОРБ, канд. техн. наук,

С.В. ГЕРАЩЕНКО

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СЕПАРАЦИЯ

Электродинамическая сепарация осуществляется по различию в способности материалов проводить электрический ток и применяется для извлечения немагнитных металлов из различных смесей. Из известных в настоящее время способов электродинамической сепарации в отдельный подкласс могут быть выделены устройства с импульсным возбуждением электромагнитного поля (ЭМП) в зоне разделения материалов [1]. Импульсным возбуждением следует считать создание ЭМП в зоне сепарации на короткий промежуток времени, начало которого совпадает с моментом попадания электропроводных объектов в область наиболее высоких значений электродинамических усилий, и прерывание ЭМП в момент выхода объекта из этой области. По результатам практических исследований установлено, что длительность импульса для задач извлечения цветных металлов целесообразно устанавливать в пределах 1-10 мс.

Для управления работой импульсного сепаратора желателен применение датчика наличия металла в зоне сепарации (металлоискателя), который позволит правильно организовать процесс извлечения.

В целях наиболее полной реализации преимуществ импульсной электродинамической (ИЭД) сепарации здесь используется неподвижное (стационарное) переменное неоднородное ЭМП. Использование стационарного поля позволяет реализовать конструкцию электродинамического сепаратора с извлечением электропроводных частиц перпендикулярно плоскости транспортирования исходной смеси. Основными характеристиками генерируемого поля, определяющими количественно и качественно процесс сепарации, являются: интенсивность ЭМП (величина магнитной индукции), изменение ЭМП во времени (частота переменного поля), распределение ЭМП в пространстве (степень неоднородности поля в объеме частицы).

В качестве источников поля при ИЭД-сепарации применяются электромагниты переменного тока.

Использование ферромагнитных сердечников здесь не приводит к значительному увеличению поля в силу разомкнутости магнитной цепи – признака, принципиально необходимого для ЭД-сепараторов. Известно, что наличие железа в статоре ЛАД дает увеличение индукции лишь в 2 раза [2] (для сравнения – в замкнутой магнитной системе индукция возрастает на несколько порядков). В то же время применение магнитопровода влечет за собой появление потерь в материале, а также приводит к ограничению величины магнитной ин-

Спеціальні та комбіновані методи

дукции в зоне сепарации, обусловленному насыщением магнитопровода. Влияние названных негативных факторов резко возрастает с увеличением частоты переменного тока и приводит к необходимости применения ферритов, индукция насыщения которых не превышает 0,2-0,25 Тл. Таким образом, область применения индукторов ЭМП с сердечниками сильно ограничена, особенно для сепараторов с высокой рабочей частотой.

Рассмотрим наиболее существенный недостаток устройств ЭД-сепарации с непрерывным стационарным переменным ЭМП. Качественная картина распределения потенциального магнитного давления, которая в принципе сохраняется независимо от способа создания поля, представлена на рис. 1. Здесь же показаны линии, обозначающие плоскости равного магнитного давления, направление которого перпендикулярно плоскости в каждой точке. Плотность линий отражает величину энергии поля в объеме пространства и градиент магнитного давления. Нетрудно видеть, что при подаче материала к источнику поля электропроводные частицы не попадают в зону наиболее интенсивного ЭМП, а отклоняются на подходе к этой зоне. Сепарация осуществляется усилиями более слабыми, чем те, которые возможны в этой же зоне сепарации. При этом увеличение магнитной индукции не приводит к увеличению извлекающего усилия, а лишь отдаляет от источника поля область силового воздействия. При ближайшем рассмотрении становится ясным, что данный недостаток обусловлен непрерывностью возбуждения ЭМП, а наиболее эффективный путь его устранения – применение импульсного возбуждения поля.

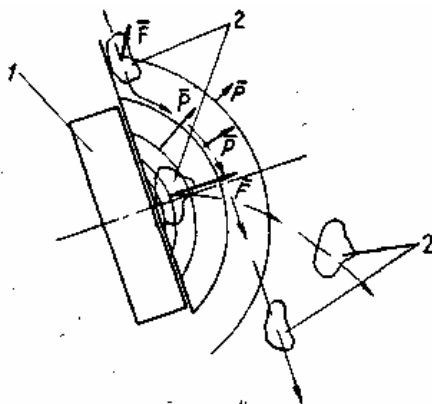


Рис. 1. Процесс сепарации в неоднородном стационарном поле:
1 – индуктор ЭМП; 2 – электропроводная частица

ИЭД-сепарация предполагает возбуждение переменного ЭМП, в момент, когда объект извлечения находится в зоне наиболее интенсивных усилий и прерывание поля при выходе частицы из этой зоны. При этом осуществляется сепарация частиц в зоне максимальных усилий независимо от интенсивности поля, что обуславливает высокую достоверность извлечения и наиболее полное использование энергии магнитного поля индуктора (траектории движения электропроводных частиц при непрерывном и импульсном возбуждении ЭМП показаны на рис. 1).

Збагачення корисних копалин, 2011. – Вип. 47(88)

Спеціальні та комбіновані методи

Применение импульсного поля делает возможным достижение весьма высоких значений напряженности ЭМП и, следовательно, электродинамических усилий, недоступных при непрерывном возбуждении поля.

Сказанное позволяет сделать вывод о более широких технологических возможностях импульсной сепарации (в частности, применение для защиты технологического оборудования от попадания немагнитных металлов и извлечения самородков из надрешеточного продукта на драгах).

Кратковременность силового воздействия при импульсной сепарации определяет высокую скорость процесса разделения и открывает возможности для увеличения производительности сепараторов по исходному сырью. Время необходимого присутствия объекта извлечения в зоне сепарации ограничивается лишь длительностью импульса ЭМП.

При непрерывном возбуждении поля в ЭД-сепараторах весьма желательно обеспечить полное обезжелезивание исходного продукта или предусмотреть специальные меры для удаления черных металлов из зоны сепарации, где они залипают и нагреваются, препятствуя нормальной работе устройства. Импульсные сепараторы лишены этих недостатков. Применение селективного металлоискателя для управления работой импульсного сепаратора вообще исключает возбуждение поля при прохождении черного металла, если же при возбуждении поля кусок железа все же оказался в зоне сепарации, то он притянется к поверхности индуктора, а после окончания импульса попадет в бункер для немаллов.

Технико-экономические преимущества импульсной сепарации связаны с кратковременностью возбуждения поля, что позволяет, применяя накопитель электрической энергии, достигать высоких значений энергии в импульсе при незначительном постоянном потреблении ее от питающей сети.

К недостаткам ЭД-сепараторов с импульсным ЭМП можно отнести сложность достижения высокой производительности по извлеченным цветным металлам при сохранении всех указанных выше преимуществ. Поэтому, в первую очередь, импульсные сепараторы должны найти применение при извлечении цветных металлов из небогатых смесей и при тяжелых условиях извлечения частицы.

При выборе технологической схемы сепарации преследовалась цель такой организации процесса извлечения, при которой электропроводная частица извлекалась бы из потока в направлении, перпендикулярном плоскости транспортирования исходной смеси. При таком извлечении частица испытывала бы минимальное сопротивление от соударения с соседними неэлектропроводными частицами, что способствовало бы достоверному ее извлечению и низкой засоренности концентрата. Еще одной предпосылкой при выборе технологической схемы было снижение негативного влияния сил тяжести на процесс извлечения.

Предлагаемая технологическая схема импульсной сепарации представлена на рис. 2. Исходная смесь питателем подается на наклонную плоскость 1, в нижней части которой установлены последовательно датчик наличия цветных металлов 2 и индуктор импульсного ЭМП 3, питаемый силовым блоком 4. При на-

личии в потоке частицы цветного металла датчик вырабатывает управляющий сигнал для силового блока и, в момент попадания частицы в оптимальную зону, генерируется интенсивный импульс ЭМП, что приводит к отклонению электропроводной частицы из потока с последующим сбором в отдельный бункер 5.

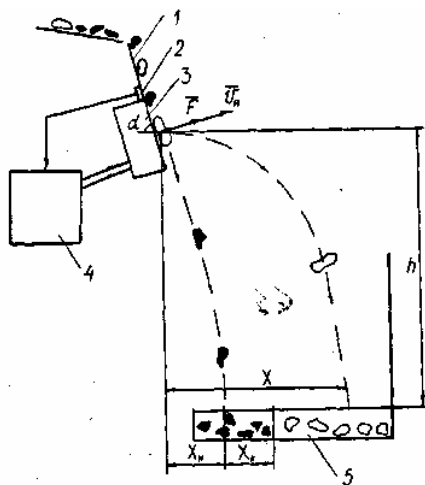


Рис. 2. Расчетная схема импульсного электродинамического сепаратора:
1 – наклонная плоскость; 2 – датчик; 3 – индуктор ЭМП;
4 – силовой блок питания; 5 – бункер

В качестве транспортирующего органа выбрана наклонная плоскость, поскольку в этом случае удастся обеспечить минимальную величину зазора между сепарируемой смесью и источником поля их кроме того, в значительной степени устраняется негативное влияние сил тяжести на извлечение частиц из смеси. Отметим, что сепарация частиц в свободном падении, когда угол наклона плоскости равен 90° нецелесообразна, поскольку в этом случае частицы ориентированы хаотически, вращаются, теряют контакт с индуктором, отдаляются от него, то есть ухудшаются условия электромагнитного взаимодействия наведенных вихревых токов с внешним ЭМП.

Длина наклонной плоскости может быть выбрана из условия обеспечения монослойной подачи материала к индуктору, которое достигается в результате рассредоточения сырья при движении с ускорением.

Приведем основные положения расчета параметров технологической схемы сепарации, для чего воспользуемся рис. 2.

Поскольку наиболее актуальным в настоящее время считается применение ЭД-сепарации в существующих технологических линиях, а также в силу ограниченности габаритных размеров разрабатываемого оборудования, параметр схемы h (высота свободного пролета частицы) при расчете принимается как заданный. Задаем также величиной минимального, необходимого для извлечения, отброса частицы из потока x_0 , которая может быть определена как сумма координаты точки падения неэлектропроводных частиц x_n и значения верхней границы класса крупности исходного сырья x_k . Величина x_0 определяет место установки разделительного ножа в приемном бункере.

Спеціальні та комбіновані методи

Расчетным параметром является величина начальной скорости, которая должна быть сообщена объекту в зоне сепарации за счет воздействия электродинамического усилия F в течение импульса длительностью Δt :

$$v_n = F m^{-1} \Delta t.$$

Уравнение скорости дискретно, поскольку за время длительности импульса расположение частицы относительно источника поля изменяется незначительно и в этом интервале можно считать $F = \text{const}$.

Оптимизируемым параметром считаем угол наклона плоскости к горизонту α .

Выражение для дальности отброса частицы имеет вид

$$x = v_n^2 g^{-1} \sin \alpha \cos \alpha + v_n^2 g^{-1} \sin \alpha (2ghv_n^{-2} + \cos^2 \alpha)^{0.5} \quad (1)$$

и записано с учетом допущения, что в момент импульса частица находится в состоянии покоя, что правомерно, поскольку скорость скольжения частицы в зоне сепарации значительно меньше скорости той же частицы при попадании в приемный бункер и, кроме того, при воздействии ЭМП электропроводная частица тормозится над индуктором и тангенциальная составляющая ее скорости уменьшается. В выражении (1) соблюдается условие о направлении извлекающего усилия строго перпендикулярно плоскости индуктора, что достигается конструкцией электромагнитной системы.

Оптимизация (1) по α известными методами дает максимальное значение для величины отброса

$$x = v_n^2 g^{-1} (2ghv_n^{-2} + 1)^{0.5}, \quad (2)$$

при

$$\alpha = \arccos(2ghv_n^{-2} + 2)^{0.5}. \quad (3)$$

Из формулы (2) определяют величину необходимой начальной скорости для заданной величины x_0

$$v_n = (gh((x_0^2 h^{-2} + 1)^{0.5} - 1))^{0.5}. \quad (4)$$

которая и является исходным параметром для расчета индуктора и силового блока сепаратора с тем, чтобы обеспечить необходимую величину усилия F и длительность импульса Δt . При этом расчет усилия должен производиться для наиболее неблагоприятных объектов с точки зрения их извлечения из смеси.

Реализацию импульсного сепаратора предлагается выполнять в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 3. Конструктивно устройство выполняется из двух блоков. Первый представляет собой генератор интен-

сивных импульсов тока с системой управления работой сепаратора, а второй – индуктор ЭМП с параметрическим датчиком наличия металла. Блок питания (БП) предназначен для согласования собственного напряжения генератора с напряжением питающей сети, а также выпрямления тока для зарядки накопителя электрической энергии (Н). Коммутатор (К) выполняет функции дозированной подачи электрической энергии к индуктору ЭМП. Блок управления (БУ) обрабатывает измерительный сигнал вихретокового датчика и генерирует сигнал, управляющий коммутатором.

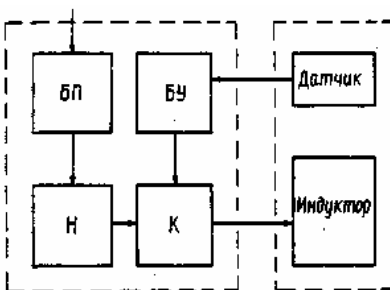


Рис. 3. Структурная схема импульсного сепаратора

БП представляет собой преобразовательное устройство, трансформирующее сетевое напряжение промышленной частоты в высокое постоянное напряжение зарядки накопителя. Преобразование может быть выполнено на промышленной частоте 50 Гц с последующим выпрямлением и введением токоограничивающих элементов (индуктивных или активных). Более перспективным является применение импульсного высокочастотного преобразования энергии с реализацией оптимального режима зарядки с постоянной мощностью. Устройства с высокочастотным преобразованием по сравнению с преобразователями на промышленной частоте имеют значительно меньшие габаритные размеры и массу, а также более высокий КПД [3].

В качестве накопителя целесообразно использование емкостных элементов-конденсаторов, которые способны длительное время сохранять заряд и позволяют оперативно управлять разрядом.

Коммутатор предпочтительно выполнять на основе полупроводниковых элементов – тиристоров и вентилях, которые по сравнению с газоразрядными приборами обладают более высоким быстродействием, небольшим временем восстановления и лучшими массогабаритными показателями.

Блок управления состоит из схемы обработки сигнала параметрического датчика и заторможенного блокинг-генератора, управляющего силовыми тиристорами коммутатора. Блок снабжен элементами индикации состояния его узлов и позволяет осуществлять ручное управление сепаратором, что может понадобиться при отладке и экспериментальных исследованиях.

Индуктор ЭМП выполняется в соответствии с [4] и представляет собой совокупность расположенных в одной плоскости электрических катушек (рис. 4). Соседние катушки подключаются к источнику электроэнергии встречно, что

Спеціальні та комбіновані методи

позволяет создать в зоне сепарации обширное полиградиентное пространство и обеспечить направление извлекающего усилия, близкое к нормальному. Размер элементарной катушки выбирается таким образом, чтобы один из размеров окна в обмотке был близок к значению нижней границы класса крупности частиц в сепарационной смеси.

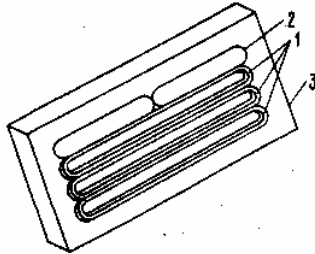


Рис. 4. Конструкция индуктора импульсного электродинамического сепаратора:
1 – обмотка индуктора; 2 – параметрический датчик; 3 – корпус сепаратора

Конструкция параметрического датчика должна обеспечивать защиту измерительной электронной схемы от наведенной в его обмотке ЭДС, которая может иметь весьма высокие значения, поскольку число витков обмотки датчика значительно больше числа витков обмотки индуктора, а расстояние между датчиком и индуктором желательно обеспечить минимальное. С этой целью каждый виток обмотки параметрического датчика выполнен в форме восьмерки, симметричной относительно центральной оси индуктора (рис. 4). Таким образом, ЭДС, наведенные в каждой петле восьмерки, имеют противоположные направления и суммарная величина ЭДС катушки равна нулю.

Рабочая поверхность индуктора покрыта износостойким материалом с низкой электропроводностью (нержавеющая сталь толщиной 1 мм), который одновременно выполняет функции полупроницаемого экрана для селективного металлоискателя.

В соответствии с изложенным, был изготовлен экспериментальный образец импульсного сепаратора.

Техническая характеристика импульсного сепаратора

Питающее сетевое напряжение, В	220
Частота преобразования энергии, Гц	50
Установленная мощность силового трансформатора, кВт	4
Напряжение зарядки накопителя, кВ, не более	2,8
Емкость накопителя, мкФ	800
Амплитуда импульса разрядного тока, кА	5
Частота разрядного тока, Гц	500
Размер активной поверхности индуктора, мм	270×800

При определении необходимой величины разрядного тока (предшествовавшем разработке сепаратора) использовалось известное положение о том, что создаваемое электродинамическое усилие равно производной от полной энер-

Спеціальні та комбіновані методи

гии магнитного поля в системе по перемещению элемента, усилие на который требуется определить. Для определения производной энергии поля достаточно определить производную индуктивности электромагнитной системы, что не сложно осуществляется экспериментально с применением физической модели индуктора, образца из электропроводного материала и измерителя индуктивности, например, цифрового автоматического моста E7-8.

Экспериментальные исследования процесса сепарации на изготовленном сепараторе проводились в два этапа. На первом этапе были проведены измерения полезного параметра для образцов в форме диска. Поскольку непосредственное измерение усилия, действующего около 1 мс, весьма затруднительно, в качестве полезного параметра была выбрана высота подлета частицы после воздействия на нее импульса ЭМП при горизонтальном расположении индуктора. От величины подлета несложно перейти к начальной скорости и к величине усилия аналитически. В то же время величина подлета сама по себе весьма наглядная характеристика поведения частицы в процессе сепарации.

Хорошо известна зависимость величины электродинамического усилия от индукции ($F=kB^2$). Нет оснований сомневаться в справедливости такой зависимости и в данном конкретном случае, поэтому экспериментальных исследований зависимости полезного параметра от величины индукции (разрядного тока) не проводилось.

Интерес представляет зависимость величины подлета частицы от ее крупности. Экспериментальная зависимость (рис. 5, а) снята при следующих условиях: в качестве параметра крупности частицы выбран диаметр образца в форме диска; образец расположен на оси симметрии элементарной катушки индуктора; материал образцов – алюминий, толщина образцов 10 мм; в ходе измерений изменялся исходный зазор между нижней плоскостью образца и обмоткой индуктора. Полученные кривые отражают стабильную зависимость полезного параметра от размера частицы (на графике представлен в долевых единицах от внешнего размера элементарной катушки индуктора). Наибольшая высота подлета достигается во всех случаях при вполне определенном размере частицы, определяемом конструкцией индуктора и равном внешнему размеру элементарной катушки. При уменьшении крупности величина полезного параметра круто падает и сепарацию частиц крупностью менее 0,8 следует считать нецелесообразной на выбранном типоразмере индуктора (крупность 0,8 совпадает с размером окна в обмотке элементарной катушки индуктора). Увеличение размера образца приводит к снижению величины полезного параметра до уровня 60% от максимального и, в дальнейшем, к стабилизации на этом уровне при возрастании крупности до величины всей электрической обмотки индуктора.

На рис. 5, б представлена экспериментально полученная зависимость высоты подлета от толщины частицы, представленной в долевых единицах от эквивалентной глубины проникновения поля в материал образца. Здесь достаточно отчетливо виден максимум полезного параметра, наблюдаемый при толщине, равной 0,5-0,8 эквивалентной глубины проникновения. Такой вид кривой не является вполне очевидным, поскольку при уменьшении толщины образца

Спеціальні та комбіновані методи

удельное усилие должно возрастать, что объясняется экспоненциальным законом затухания поля в электропроводной среде (скорость затухания поля снижается по мере увеличения координаты толщины образца). Объяснение экстремального характера зависимости может заключаться в динамике частицы и явлении так называемой "магнитной подушки". ЭМП, проникшее сквозь тонкий образец, препятствует быстрому его перемещению, вследствие закона электромагнитной индукции, т.е. появляется дополнительная сила, направленная противоположно извлекающей. Описанный эффект может проявляться при достаточно высокой скорости перемещения образца небольшой толщины.

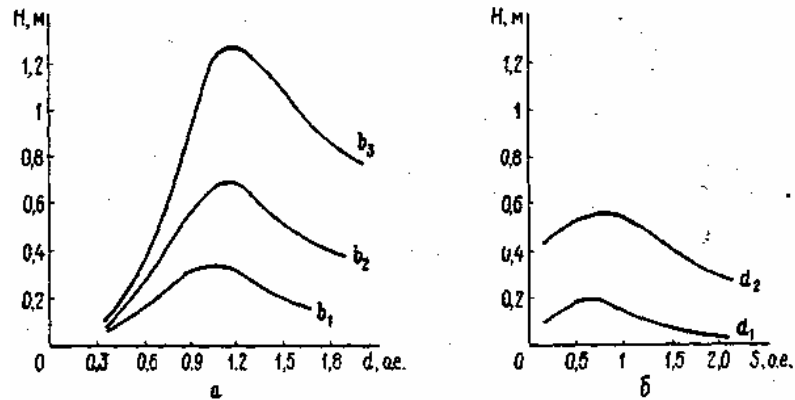


Рис. 5. Экспериментальные графические зависимости:
 H – высота полета частицы над индуктором; b – величина зазора
($b_1 = 10$ мм; $b_2 = 5$ мм; $b_3 = 0$); d – диаметр диска ($d_1 = 30$ мм; $d_2 = 50$ мм);
 s – толщина образца (диска) в относительных единицах

Второй этап экспериментальных исследований проводился на реальном сырье (лом цветных металлов, отобранный на предприятиях "Вторцветмет") в режиме управления работой сепаратора от датчика по технологической схеме (рис. 2).

Все отобранные частицы поочередно подавались на импульсный сепаратор, а затем анализировалось содержание приемных бункеров. Отмечено, что плохо извлекаются длинномерные электропроводные частицы трубчатой формы, мотки медного провода, сильно деформированные куски листового материала.

После обработки результатов сепарации было установлено, что общее извлечение для алюминиевых сплавов составляет 87,2%, для сплавов меди – 64,4%. По фракциям для алюминиевых сплавов: 20-50 мм – 64,1%, 50-100 мм – 81,3%, 100-200 мм – 97,5%, >200 80,6%; для сплавов меди: 100-200 мм – 62,3%.

Размер элементарной катушки индуктора импульсного сепаратора равен 85 мм, размер окна в обмотке 50 мм. Таким образом, полученное распределение степени извлечения металлов по крупности в целом соответствует полученной ранее экспериментальной графической зависимости для идеальных образцов (рис. 5).

Число витков в обмотке элементарной катушки индуктора равно 6, следо-

Спеціальні та комбіновані методи

вательно, экспериментальные исследования проводились при общей токовой нагрузке в импульсе 30 кА (амплитуда импульса тока составляла 5 кА). Следует отметить, что возможно значительное увеличение токовой нагрузки при соответствующих конструктивных доработках индуктора и силового блока импульсного сепаратора. Известно, что токовая нагрузка на индуктор в станках для магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) достигает значений 200 кА и более [5]. Поскольку величина электродинамического усилия пропорциональна индукции в квадрате, а индукция прямопропорциональна токовой нагрузке, очевидны возможности значительного увеличения качественных показателей сепарации.

При исследованиях было установлено, что эффективное извлечение частиц на макете возможно при частоте их следования не чаще, чем два раза в секунду, что определяется мощностью силового трансформатора генератора импульсов. При повышении мощности трансформатора пропорционально возрастают скорость заряда накопителя и частота допустимого следования импульсов (при этом целесообразно осуществить принудительное охлаждение индуктора). В целом же, как было указано ранее, наиболее эффективным следует считать применение импульсной сепарации при уровне содержания металла в исходном сырье 5-10%.

Выводы

1. Импульсная электродинамическая сепарация обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с сепарацией в непрерывном ЭМП.
2. Конструкция индуктора импульсного ЭМП и датчика наличия немагнитного металла позволяют реализовать процесс импульсной сепарации.
3. Предложены формулы для расчета параметров технологической схемы импульсного сепаратора с оптимизацией угла наклона индуктора.

Список литературы

1. Лапицкий В.Н. и др. Извлечение и разделение немагнитных электропроводных материалов в магнитном поле // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2007. – Вип 29(30)-30(71). – С. 107-115.
2. Круминь Ю.К. Основы теории и расчета устройств с бегущим магнитным полем. – Рига: Зинатие, 1983. – 278 с.
3. Костиков В.Г., Никитин И.Е. Источники электропитания высокого напряжения РЭА. – М.: Радио и связь, 1986. – 195 с.
4. А. с. 1282398 СССР. Электродинамический сепаратор / В.А. Бунько, В.Н. Лапицкий, А.В. Горб.
5. Белый И. В., Фертик С.М., Хименко П. Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металла. – Харьков: Высшая школа, 1977. – 205 с.

© Лапицкий В.Н., Пилов П.И., Горб А.В., Герашенко С.В., 2011

*Надійшла до редколегії 24.11.2011 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*