

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
УССР**

**КИЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

УДК 621.928.8

А. Д. Омельченко, И. И. Сторижко, А. З. Паламаренко, С. М. Мироненко

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СМЕСИ ЧУГУННО-
БРОНЗОВОЙ СТРУЖКИ**

К И Е В 1984

Наряду с развитием физических методов разделения смесей грузов (разделение в поле центробежной силы, магнитно-гидродинамическая и радиоизотопная сепарации, сепарация в кипящем слое и другие методы), находит широкое применение магнитное обогащение.

Большинство магнитных сепараторов работает на постоянном токе. Однако они мало эффективны при получении концентратов даже из тонкоизмельченного сепарируемого груза. При применении постоянного магнитного поля достаточной интенсивности магнитные частицы притягиваются не только к магнитному полю, но и друг к другу и способны захватить некоторое количество неферромагнитных частиц (отходов).

Магнитные сепараторы, использующие ряд чередующихся положительных и отрицательных полюсов, также не эффективны, так как скорость прохождения частиц смеси через такие чередующиеся поля будет недостаточна для обеспечения удовлетворительного притяжения и отталкивания. При прохождении мимо полюсов с противоположными знаками частицы просто соединяются в группы, в которых находятся и попавшие туда неферромагнитные частицы. Отталкивания как такового не наблюдается.

При применении магнитных сепараторов, использующих наклонную поверхность, по которой под действием собственного веса перемещаются активные или активированные частицы, чистого разделения частиц достичь также нельзя. Благодаря интенсивному движению магнитных частиц по наклонной плоскости перемешивается и значительное количество промежуточного неферромагнитного продукта, увлекаемого частицами.

Были попытки применить магнитное поле переменного тока,

как отталкивающий магнит. Его располагали под потоком частиц сепарируемой смеси так, чтобы сила была направлена снизу. В этом случае магнитный материал и отходы располагаются слоями, причем магнитный материал накапливается в верхней части слоя. Отделение концентрата происходит после прохождения сепарируемого материала мимо магнитного поля постоянного тока. Основным недостатком этого типа разделения является то, что не удается добиться четкого расслоения, так как отходы и некоторое количество сепарируемого груза попадает в концентрат в результате слишком интенсивного перемешивания, особенно когда материал осаждается вниз при выходе из магнитного поля переменного тока. Таким образом, расслоение частиц до некоторой степени нарушается за то время, пока они достигнут магнитного поля постоянного тока.

Пробовали применять в сепараторах комбинированные магниты постоянного и переменного тока, где сепарация производилась под водой. Однако вода уменьшает активность частиц в магнитном поле переменного тока. Частицы сепарируемого материала испытывали сопротивление не только воды, но и от/ходов, в результате снижались качество, чистота концентрата и производительность сепаратора.

Установлено, что применение переменного тока для притяжения магнитных частиц на открытом воздухе почти полностью исключает попадание отходов в концентрат. При этом в[^] течение первой половины цикла магнитные частицы отталкиваются в магнитном поле переменного тока, но сразу же после наступления второй половины цикла притягиваются, в результате - частицы все время находятся в движении.

Реакция частоты в любой данный момент является результатом различных условий, таких, как ориентация магнитных полюсов частицы, ее форма, ее взаимное расположение по отношению к другим частицам, наличие примеси в виде отходов, направление магнитного поля в данный момент и т.п. Таким образом, совокупность ряда факторов создает притяжение частицы в течение одной половины цикла и отталкивание - в течение другой.

В настоящее время является актуальной задача разделения смеси из стружек различных металлов. Так, например, в Киевском технологическом институте пищевой промышленности проводятся исследования процесса сепарации смеси чугунно-бронзовой стружки, получаемой при изготовлении червячных колес, магнитным методом. Эта проблема весьма актуальна в связи с тем, что на заводах, производящих червячные редукторы, большое количество бронзы идет в отходы с чугунной стружкой.

При разработке методики исследования и подбора оборудования для реализации процесса магнитной сепарации чугунно-бронзовой стружки особое внимание уделяется авторами определению оптимальных параметров, которые позволяют эффективно осуществить следующие этапы магнитной сепарации.

I. Магнитная флокуляция - начальный момент, соответствующий подаче материала в поле сепаратора. Эта стадия связана с перераспределением материала в объеме. Изучению магнитной флокуляции посвящен ряд работ [6,4,6,7] .

Разделение чугунно-бронзовой стружки идет наилучшим образом, если сrostки стружки чугуна не попадают в обогащенный продукт.

Это условие выполняется, если флокуляция сильномагнитного продукта (чугунной стружки) протекает селективно. Поскольку процесс захвата бронзовых частиц в чугунную стружку является стохастическим, то в качестве критерия оптимальных параметров сепаратора может служить условие

$$P_{\text{зах}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

по которому вероятность захвата бронзы в чугунную стружку в любой точке должна быть на минимально возможном уровне, определяемом технологическими ограничениям[^]. Для выполнения условия (1) необходимо, чтобы в зоне сепаратора происходило расслоение: магнитные чугунные частицы собирались бы вверху потока, немагнитные (бронзовые) - внизу. При рассмотрении процессов сепарации чугуно-бронзовой стружки особое внимание уделяется магнитной флокуляции.

Стремление ферромагнитных частиц в поле сепаратора к уменьшению общей магнитостатической энергии (энергии свободных полюсов) приводит к образованию агрегатов из этих частиц, называемых флокулами. Флокуляция происходит лавинообразно и практически мгновенно при попадании плотной ферромагнитной массы в интенсивное поле сепаратора.

Явление магнитной флокуляции неизбежно сопровождает любой способ сепарации и непосредственно влияет на эффективность разделения. Так, например, в процессах магнитной сепарации флокуляция повышает производительность сепаратора магнитного концентрата. Следовательно, изучение законов разделения в магнитных сепараторах не должно производиться

в отрыве от основных закономерностей магнитной флокуляции. Не зная взаимосвязей между прочностью, невозможно правильно рассчитать силовой режим разделения в магнитном сепараторе.

В работах [1, 3] подробно описаны экспериментальные и технические данные в зависимостях плотности флокуляции (прочности флокул) от напряженности внешнего поля концентрации ферромагнитных компонентов во флокуле и величины форм фактора λ флокулы ($\lambda = a/v$, где a и v - продольная и поперечная оси флокулы).

Полученные данные в работе [3] подтверждают вывод о том, что прочность флокул следует определять из формулы потокосцепления $|\phi|$ флокуле. В этом случае прочность флокулы

$$F_{\phi} = \frac{\bar{S} * B_a^2}{M_o (1 + \alpha N_a)^2} \quad (2)$$

где $\bar{S}$ - эффективное поперечное сечение флокулы,
 B_a - полная индукция флокулы по продольной оси,
 M_o - магнитная проницаемость окружающей среды
 α - эффективная магнитная восприимчивость флокулы по продольной оси,
 N_a - коэффициент размагничивания флокулы по продольной оси.

В практике магнитной сепарации однородное магнитное поле не встречается, поэтому флокула всегда имеет конечную длину, которая зависит от характера магнитного поля (картины поля). Аналитически длину флокулы можно оценить по формуле (2) для силы осевого сжатия (прочность флокулы F_{ϕ}), подставляя в нее вместо B_a значения индукции в функции от расстояния по длине флокулы $B \frac{B_a}{dx}$. При

уменьшении потока во флоккуле по ее длине сила осевого сжатия стремится к нулю, а длина - к предельному значению, что можно видеть на рис. I.

Суммарная энергия для упорядоченной флоккулы значительно выше, чем для случайного скопления немагнитических частиц.

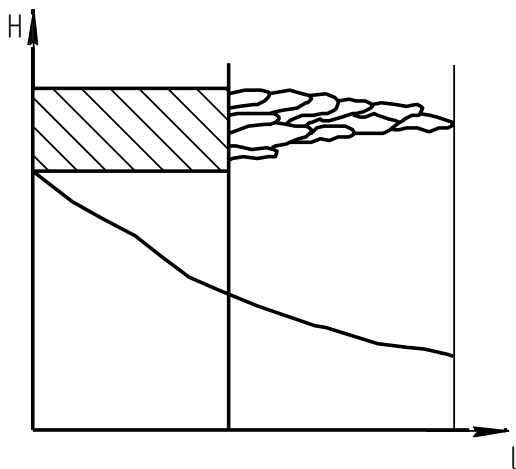


Рис. I. Изменение магнитного потока по длине флоккулы в поле с экспотенциальным распределением напряженности.

Так как движение флоккул происходит в магнитном поле, то в результате столкновений соседних флоккул некоторые из них приобретают ориентацию, обратную направлению магнитного поля (т.е. флоккула направлена к соответствующему полюсу магнитной системы своим одноименным полюсом).

Опыты [3] показывают большие возможности интенсификации процессов магнитной сепарации стружки при оптимальном управлении магнитным состоянием материала и могут внести значительные коррективы в существующие расчеты режимов разделения частиц в магнитных сепараторах. Важно создавать чистые "селективные" флоккулы, что даст большой эффект в улучшении показателей сепарации, чем разрушение флоккул с "захватами".

С повышением толщины слоя отрыв флоккул резко увеличивается и показатели сепарации в этом случае будут крайне низкими.

С одной стороны, сепарация в магнитном поле с чередующейся полярностью приводит к потерям чугунной стружки в смесь, с другой стороны, в случае монополярной системы флоккулы захватывают много немагнитных частиц. Логически в данном случае получение бедных "хвостов" возможно только при сепарации с монополярной магнитной системой и повышенной направленностью поля. Однако чугунная стружка будет в этом случае сильно загрязнена бедными "сростками" и немагнитными частицами (бронзой), причем процент захвата их во флоккулы пропорционален их содержанию в смеси. Перечистка магнитного продукта возможна только после размагничивания, разрушающего флоккулу, и может быть сделана с помощью магнитной сепарации.

Для повышения эффективности сепарации необходимы методы разрушения магнитных флоккул. Разрушение или ослабление магнитных флоккул должно производиться при наличии механических сил. Известными и распространенными методами, проверенными промышленными испытаниями, являются повышение частоты магнитного поля (увеличение числа полюсов $У$, увеличение длины зоны сепарации, установка рыхлителей и др.

2. Магнитное извлечение - притяжение флоккул к полюсу.

Система стремится к снижению общей магнитостатической энергии [2].

Общая энергия ферромагнетика чугунной стружки имеет следующие составляющие [2].

E_k - анизотропия кристалла,

E_δ - механические напряжения,

E_m - энергия магнитных зарядов (магнитостатическая),

E_H -взаимная магнитная энергия поля и стружки в нем,

$\mathcal{E}_\omega$ - энергия областей самопроизвольного намагничивания.

В обогащении используют непосредственно E_m и E_H определяющие магнитную силу:

$$E_m = \int \frac{H^2}{8\pi} dU \quad (3)$$

$$E_H = -HI \cos \varphi \quad (4)$$

где U -объем тела ферромагнетика,

H - напряженность магнитного поля,

φ - угол между векторами H и I ,

I - намагниченность.

Следует отметить, что составляющие, $\mathcal{E}_\omega, E_K, E_\delta$ также существенно влияют на эффективность разделения и определяют величину коэрцитивной силы.

Производная от энергии по направлению поля является силой, с которой последнее действует на стружку. Известно, что все магнитные силы возникают путем взаимодействия магнитных зарядов Кулон

$$F = K \left[\left(\frac{m_1 m_2}{m_0 \tau^2} \right) \right] \cos \varphi \quad (5)$$

где K - коэффициент, уточняющий положение условных точек концентрации магнитных зарядов,

m_1, m_2 - магнитные заряды тел,

τ - расстояние между телами.

Магнитный заряд (магнитную массу) можно определить из

аналитических выражений намагниченности [5]

$$I = \frac{M}{U} = \frac{ma}{U} \quad (6)$$

Где M -магнитный момент,

m - магнитный заряд ферромагнетика,

a - длина ферромагнетика.

Тогда магнитный заряд

$$M = \frac{m}{a} = \frac{IU}{a} = I\bar{S} = \alpha \bar{S}H \quad (7)$$

где S - эффективное сечение полюса,

α - магнитная восприимчивость ферромагнетика.

Выражение (7) можно представить в виде

$$m = \frac{\alpha}{M} \Phi \quad (8)$$

Φ - магнитный поток,

$$\Phi = B\bar{S}$$

B - магнитная индукция,

M -магнитная проницаемость ферромагнетика.

В процессе магнитной сепарации стружки магнитные заряды флокулируют и притягиваются к полюсам; таким образом, система стремится к снижению общей магнитостатической энергии.

При оптимизации энергии магнитного рабочего пространства и повышении эффективности магнитного разделения необходимо в конструкциях сепаратора стремиться к повышению магнитостатической энергии рабочего пространства.

3. Собственно сепарация - очистка магнитной фракции от нетребуемых примесей с использованием механических сил. Этот этап требует понижения магнитной энергии и повышения

частоты поля для облегчения магнитно-гравитационного выталкивания немагнитных фракций из слоя.

4. Разгрузка - удаление материала из поля.

Исследования[1] показали, что эффективность сепарации в основном зависит от величины поверхности, на которой происходит разделение, магнитной силы (напряженность и градиент поля) в рабочем пространстве, относительной скорости движения частиц (чугунной стружки), извлекаемых из потока, удельной работы разделения магнитного сепаратора.

Процесс разделения стружки по магнитным свойствам осуществляется, как правило, в зоне сепарации* на специальных транспортирующих поверхностях. Максимальная эффективность разделения достигается при минимальной толщине слоя стружки на указанной поверхности (вплоть до монослоя).

Проектирование магнитного сепаратора в КТИПП осуществлялось экспериментальным подбором его конструктивных элементов, при этом критерием служило качество концентрата (чугунной стружки). Первоначальные конструктивные параметры брались на основании опытно-статистических данных. ?_г

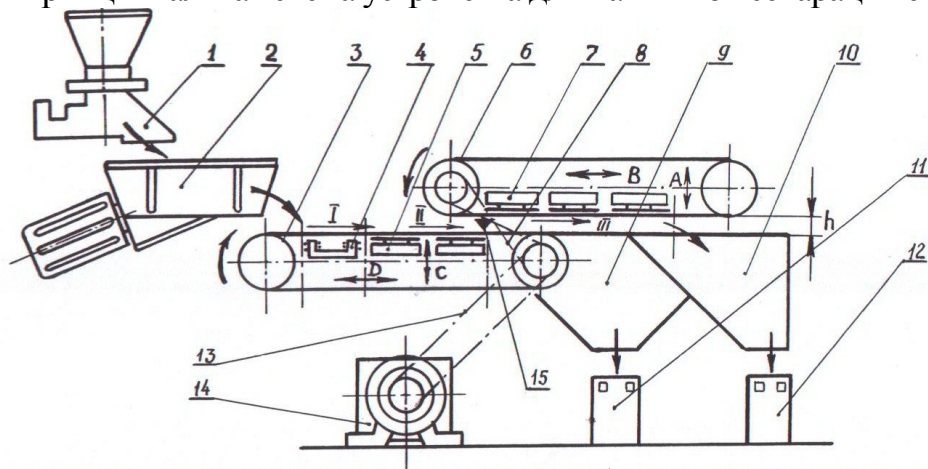
Принципиальная схема магнитного сепаратора смеси чугуно-бронзовой стружки представлена на рис. 2. Ее особенностью является наличие 3-х зон 2 I - для намагничивания смеси чугунной стружки полем постоянного тока электромагнита 4, II - для активизации чугунной стружки в поле переменного тока электромагнитов 5, III- для движения чугунной стружки во взвешенном состоянии с помощью подмагничивающей системы электромагнитов переменного тока 7. Сепаратор работает следующим образом. Дробленая чугуно-бронзовая

стружка из дробилки I типа ТСД (трехстадийное дробление) или СК-2М попадает на регулируемый в широком диапазоне вибропитатель 2, который подает стружку тонким слоем на нижний ленточный конвейер 3. Чугунная стружка, проходя зоны намагничивания I и активизации II (конвейера 3), отделяется от бронзовой стружки, затем движется во взвешенном состоянии в зоне III (конвейера 6) и попадает в бункер 10. Активизация чугунной стружки в зоне II происходит за счет смены магнитных полей: с постоянного на переменное под действием коэрцитивной силы. Бронзовая стружка, проходя зоны намагничивания I и активизации II (конвейера 3), отделяется от чугунной стружки и попадает в бункер 9.

Основные параметры магнитного сепаратора регулируются следующим образом: параметры дробилки I и вибропитателя 2 - с пульта управления; скорость транспортирования ленточных конвейеров 3 и 6 - вариатором 9; зазор δ между лентами конвейеров - перемещением конвейера 6 по направлению А; смещение зон II и III - перемещением конвейера 6 по направлению Д; перемещение потока смеси стружки рыхлителем 15 и перемещением групп электромагнитов 7 в плоскости, перпендикулярной плоскости транспортирования; напряженность электромагнитов 4, 5, 7 - величиной напряжения в системе электропитания; магнитная сила $F_{\text{МВ}}$ в зонах I, II, III - перемещением электромагнитов 4, 5, 7 по направлениям А, С.

В однородном поле (зона намагничивания), вдали от магнитных зарядов на магнитный диполь (чугунно-содержащую флоккулу) действует пара сил P , выравнивающая его вектор намагничивания по направлению вектора напряженности H . При малых

Принципиальная схема устройства для магнитной сепарации смеси



1-дробилка, 2-вибропитатель, 3-нижний ленточный конвейер, 4- электромагнит постоянного тока, 5-электромагнит переменного тока, 6-верхний подающий ленточный конвейер, 7-электромагнит переменного тока, 8-цепная передача, 9,10-бункеры для бронзовой и чугунной стружки, 11,12-контейнеры для бронзовой и чугунной стружки, 13-цепной контур, 14-привод вариаторныйЗД-2, 15-рыхлитель, 1,2,3-зоны намагничивания, активизации и движения чугунной стружки во взвешенном состоянии.

Рис. 2

значениях α она равна [2].

$$P = UH^2(\alpha_a - \alpha_b)\alpha \quad (9)$$

где α - эффективная магнитная восприимчивость флюкулы по поперечной оси, α - угол между векторами намагниченности и напряженности.

Взаимодействие магнитных масс диполя m_n и m_s приводит к возникновению осевых сжимающих усилий в теле дипольного ферромагнетика, которые могут быть рассчитаны по формуле [5] при $\varphi = 0$. Однако в однородном поле усилия эти противоположны и скомпенсированы, так что их равнодействующая равна 0. Кроме того, как видно из формулы [5], эти усилия резко уменьшаются с увеличением длины диполя.

В теле (ферромагнетике), движущемся на ленте над поверхностью магнитной системы, вектор напряженности магнитного поля не движется, оставаясь на месте (зона намагничивания). Необходимо, чтобы образовавшиеся флюкулы чугунной стружки не отставали от скорости ленты и равномерно перемещались с лентой (с учетом сил сопротивления среди смеси стружки, столкновения между частицами, набегания флюкул на магниты с одноименными полюсами и т.д.).

Динамические характеристики магнитных свойств смеси стружки влияют на эффективность магнитного разделения. Эти характеристики благодаря гистерезисному характеру процессов намагничивания при быстром их протекании существенно отличаются от статических (установившихся) характеристик. Указанные различия имеются главным образом при сухой магнитной сепарации стружки, где скорость движения частиц через зону се-

парации и время пребывания их в магнитном поле могут быть различны (т.е. регулируемые). В этих условиях намагничивание становится динамическим и величины α_g, M_g, I_g будут ниже их статических значений. В результате падают магнитная сила и эффективность магнитного разделения. Экспериментальные исследования [8] и в лаборатории КТИПП показали, что применение предварительного намагничивания путем установки дополнительного полюса перед зоной сепарации устраняет это нежелательное явление и повышает эффективность сепарации.

Наиболее значительной силой близкого взаимодействия магнитных зарядов является сила "потокосцепления", представляющая упрощенное выражение тягового усилия Максвелла [2]

$$F = \frac{B^2 S}{\mu_0 8\pi} \quad (10)$$

и получения путем дифференцирования выражения магнитной энергии по линии действия силы. Эта сила проявляется и в однородном поле, причем в процессе магнитной сепарации именно она удерживает материал на поверхности ленты.

В зоне намагничивания постоянным током чугунной стружке передается высокая коэрцитивная сила и достаточно высокая магнитная индукция.

В неоднородном поле (зонах активизации и движения стружки во взвешенном состоянии) на магнитный диполь действует так называемая пондеромоторная сила, возникающая в связи с раскомпенсацией сжимающих сил, действующих на магнитный диполь, если магнитные заряды диполя находятся в различных по напряженности точках поля. Принципиально это также можно объяснить и рассчитать на основе закона Кулона, так как

неоднородное поле предполагает наличие близкорасположенного условного заряда.

Пондеромоторная сила равна [2]

$$F_m = \epsilon H \left[\frac{dH}{dx} \right] = M_0 \epsilon H \frac{dH}{dx} = \epsilon H \text{grad} H, \quad (11)$$

где $\frac{dH}{dx}$ - градиент напряженности в направлении действия силы.

При попадании флоккул в зону активизации чугуно-бронзовой стружки (зона переменного магнитного поля) происходит их отставание в результате сил сопротивления бронзовой стружки, столкновения между частицами и т.д. В момент попадания флоккул в магнитное поле одноименного полюса наиболее богатые чугуно-содержащие флоккулы выталкиваются и выносятся за зону удерживания магнитным полем. Можно подобрать в зоне активизации П соответствующий частотный режим, скорость ленты конвейера 3, конструкцию рыхлителя 8 таким образом, чтобы обеспечить качественное разделение чугунной стружки от бронзовой (рис. 2.).

В теле (ферромагнетике), движущемся над поверхностью магнитной системы, вектор системы магнитного поля изменяется (зона активизации). Напряженность поля на краю магнитопровода уменьшается и "флоккулы взрываются" градиентом напряженности. Такое разрушение флоккул приводит к освобождению бронзовой стружки, а следовательно, к повышению эффективности процесса разделения.

Следует отметить, что специфика дробления и подачи чугуно-бронзовой стружки на конвейер 3 требует особых режимов, так как крупные фракции чугунной стружки являются более тяжелыми, что усложнит работу магнитной системы 7 при движении

стружки во взвешенном состоянии.

В зоне активизации смеси стружки происходит предварительная сепарация или отделение чугунной стружки от бронзовой. Активизированная чугунная стружка перемещается в третью зону к притягивающим магнитам 7 конвейера 6 за счет поперечной силы ($\mathcal{E} - H \text{ grad} H$), удерживается во взвешенном состоянии за счет сил потока сцепления [3, 4]

$$F_{\Phi} \cong \frac{B^2}{8\pi} \quad (12)$$

В зоне движения чугунной стружки во взвешенном состоянии (зона III) верхний конвейер 6 (см. рис. 2) устанавливается с регулировкой так, чтобы можно было изменить интенсивность влияния магнита на частицы чугунной стружки. Кроме того, применено механическое средство (рыхлитель 8) для перемешивания стружки на подающем конвейере 3. Подмагничивающая система 7 на конвейере 6 переменного тока имеет различные параметры. Вначале чугунная стружка подвергается воздействию магнитного поля незначительной силы с целью размагничивания частиц чугунной стружки. В результате чего эти частицы активизируются и отделяются от бронзовой стружки. Затем чугунная стружка подвергается воздействию магнитного тока притягивающего магнита большей силы, который физически выделяет чугунные частицы из смеси стружки и превращает их во взвешенную активную массу с тем, чтобы из нее выпали частицы бронзовой стружки. "Притягивающий" магнит зоны движения чугунной стружки во взвешенном состоянии имеет большую интенсивность, чем магнит зоны активизации.

Цель НИР и ОКР - подобрать рациональные значения пара-

метров сепаратора для разделения чугуно-бронзовой стружки с дальнейшим проектированием оптимального опытно-промышленного образца.

Эффективность рассматриваемого сепаратора очевидна, так как основные вышеуказанные параметры регулируются в широких пределах.

Дальнейшее более глубокое изучение магнитных свойств стружки, особенностей,ее поведения в магнитном поле сепаратора и влияния магнитного поля на среду, в которой происходит разделение, позволит создать новые, высокоэффективные режимы разделения и значительно улучшит технологию магнитной сепарации стружки.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения. - М.: Недра, 1966.
2. Кармазин В.В. Использование магнитных свойств материала в процессах магнитного разделения. В сб. Новые физические методы сепарации минерального сырья. - М.: Наука, 1969.
3. Кармазин В.В. О возможности интенсификации магнитного обогащения. В сб. Теория и практика электрических и магнитных методов сепарации полезных ископаемых. - М.: Наука, 1968.
4. Кармазин В.И. Современные методы магнитного обогащения руд черных металлов. - М.: Госюртехиздат, 1962.
5. Окулов Ю.И. Магнитный заряд и его космофизические аспекты. Авторефер. Канд.дисс. МГУ, 1968.
6. Пласкин И.Н., Кармазин В.В. Магнитная флокуляция тонкоизмельченных сильномагнитных материалов в процессах магнитной сепарации. - Доклад на У научно-технической сессии института "Механобр". Труды института "Механобр"⁰, 1966.
7. Пласкин И.Н., Кармазин В.И., Олофинский Н.Ф., Норкин В.В., Кармазин В.В. Новые направления глубокого обогащения тонковкрапленных железных руд. - М.: Наука, 1964.
8. Foster Fraas Magnitization delay in the separation off minerals – Rept.nvest.Bur.Mines,U.S.Dep.,Unterior,1964,№6411,13.

