

УДК 622.778

**ПРОГНОЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССА МАГНИТНОГО ГИДРОЦИКЛОНИРОВАНИЯ
СУСПЕНЗИЙ ОБОГАЩАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ****А. А. Лавриненко, П. А. Сыса***Институт проблем комплексного освоения недр им. акад. Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: lavrin_a@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Разработано новое устройство для мокрого магнитного обогащения — магнитный гидроциклон, позволяющий выделять магнитную фракцию из быстро движущегося криволинейного потока пульпы. Преимуществами магнитного гидроциклона являются высокая удельная производительность и простота конструкции, определяющая надежность устройства. Схема расчета прогнозируемых показателей процесса магнитного гидроциклонирования представляет собой методику оценки возможности извлечения магнитных частиц в зависимости от геометрических размеров аппарата, изменения параметров магнитного поля, скорости потока и физических параметров частиц. Приведено сравнение параметров процесса и результатов обогащения, полученных путем расчета и испытаний магнитного гидроциклона. Предложенное устройство рекомендуется для применения в технологических схемах обогащения железистых кварцитов и других руд, обладающих выраженными магнитными свойствами. При использовании магнитной системы, позволяющей поднять уровень магнитной индукции до 5–10 Тл, возможно извлечение слабомагнитных минералов.

Магнитный гидроциклон, селективность разделения, магнитная фракция, обогащение железорудного сырья, магнитная сила, центробежная сила, содержание железа

DOI: 10.15372/FTPRPI20230415

Магнитные методы обогащения широко используются при переработке железорудного сырья, а также в различных комбинированных технологиях [1, 2]. Перспективным устройством для обогащения руд магнитных минералов является магнитный гидроциклон (МГЦ). Его отличительная особенность — высокая производительность при небольших размерах и отсутствие движущихся частей, что значительно повышает надежность эксплуатации. Магнитный гидроциклон может совмещать функции гидроклассификатора и магнитного сепаратора для мокрого обогащения. Его основная задача — выделение магнитной фракции из быстро движущегося криволинейного потока пульпы. Магнитный гидроциклон можно использовать для классификации слива мельниц с целью предотвращения переизмельчения раскрытых зерен магнетита, исключая возврат его крупных частиц в мельницу. Важным обстоятельством является возможность применения на МГЦ магнитного поля (5–10 Тл) для извлечения слабомагнитных минералов (ильменита, гематита и др.) [1].

Созданием МГЦ в качестве обогатительных аппаратов занимались многие авторы [1, 3, 4]. При помощи магнитного поля в гидроциклонах создавались условия последующего извлечения агрегатов в центробежном поле [5]. Зачастую эти аппараты предназначались для вспомога-

тельных операций, например для регенерации магнетитовых суспензий [6]. Для переработки ильменитовых россыпей использовалась магнитная сила как дополнительная к центробежной [6–9, 10]. Магнитные гидроциклоны предлагается использовать для очистки технологических жидкостей от магнитных включений, однако их режимы работы далеки от обогатительных процессов [11–15]. Кроме того, МГЦ применяются для разделения водно-нефтяной суспензии [16]. Известны разработки МГЦ с целью улавливания магнитных субмикронных частиц в газовых и жидкостных средах [17]. В настоящей работе рассматривается МГЦ как аппарат, предназначенный для обогащения руд магнитных минералов.

В [1] предложен наиболее удачный МГЦ, в котором разгрузка магнитной фракции осуществляется через песковую насадку, а электромагнитная система расположена снаружи на конической части гидроциклона. Процесс магнитного гидроциклонирования имеет несколько параметров, среди которых свойства твердой фазы, режимы магнитного поля и течения суспензии в заданном пространстве разделительного аппарата.

Цель данного исследования — повышение эффективности магнитной сепарации в гидроциклоне на основе прогнозирования режимов процесса с учетом состава сырья и конструктивных параметров аппарата. Основная задача — разработка схемы расчета прогнозируемых параметров процесса разделения суспензии в магнитном гидроциклоне.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНОГО ГИДРОЦИКЛОНА

Анализ работы магнитных гидроциклонов показал, что при расположении магнитной системы на конусной части, а также в случае, когда магнитное поле используется для агрегирования частиц, в концентрат извлекаются крупные немагнитные частицы. Для устранения этого недостатка было принято решение удалять магнитный продукт через сливной патрубок с помощью воды, очищенной в гидроциклоне. В новой конструкции МГЦ магнитная фракция извлекается через щелевые отверстия в сливном патрубке. Это стало возможным в результате размещения магнитной системы на крышке гидроциклона, что позволило противопоставить направление магнитной и центробежной сил [18].

В конструкции МГЦ предусмотрена возможность корректировки режима работы с помощью устройства для регулировки площади разгрузочных отверстий в сливном патрубке внутренней вставкой с щелевыми разрезами, перемещением которой изменяется площадь отверстий (рис. 1). Сверху расположена магнитная система, создающая магнитное поле таким образом, чтобы линии магнитного поля пересекали вращающийся в цилиндрической части гидроциклона поток суспензии. Градиент магнитного поля направлен в сторону разгрузочных отверстий. Необходимая конфигурация поля устанавливается при помощи соленоида, расположенного на крышке гидроциклона.

Действие магнитного поля на вращающийся поток суспензии в цилиндрической части приводит к увеличению концентрации магнитных частиц в верхней приосевой области потока. Отвод магнитной фракции осуществляется через слив магнитного гидроциклона вдоль оси вращающегося потока суспензии, совпадающей с осью симметрии магнитной системы. Немагнитная фракция отправляется в противоположную сторону через песковую насадку.

С целью прогнозирования эффективных параметров процесса сепарации, а также определения рациональных размеров разделительного устройства с учетом магнитных свойств частиц и возможности магнитной системы предложена схема расчета параметров процесса магнитного гидроциклонирования, учитывающая физические размеры устройства, плотность жидкости, скорость течения суспензии, плотность и размер частиц, их магнитную восприимчивость.

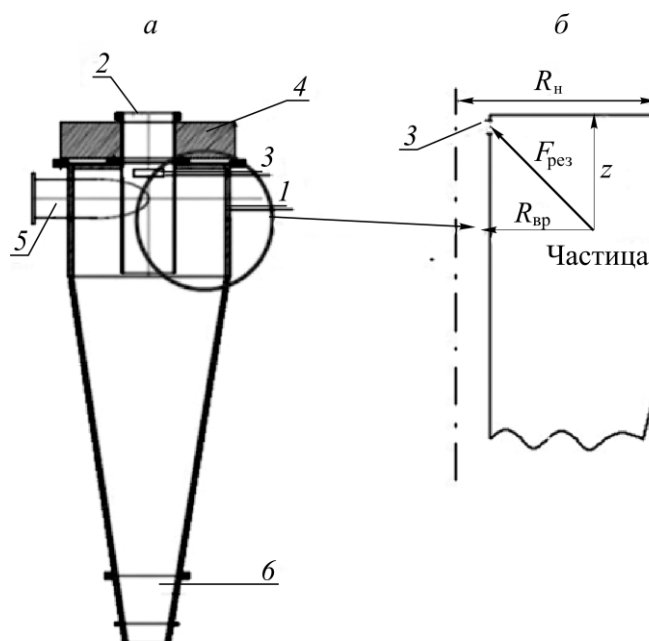


Рис. 1. Сечение магнитного гидроциклона (а) и направление результирующей силы $F_{рез}$, действующей на магнитную частицу (б): 1 — корпус гидроциклона; 2 — сливной патрубок; 3 — разгрузочное отверстие; 4 — магнитная система; 5 — входной патрубок; 6 — песковая насадка; $R_{вр}$ — радиус вращения частицы; R_n — внутренний радиус цилиндрической стенки гидроциклона

Схема расчета построена на базовых физических законах и наиболее известных формулах, описывающих движение твердого тела в жидкости, его инерционность и взаимодействие с магнитным полем. Внутреннее пространство гидроциклона рассматривается как геометрическое место точек в виде плоскости, пересекающей цилиндрическую часть гидроциклона по вертикали. Поскольку гидроциклон является осесимметричным аппаратом, приведена половина сечения разделительного пространства справа от сливного патрубка (рис. 1). Поворачивая изображение вокруг оси гидроциклона, можно получить полную картину распределения сил и силовых полей, действующих на частицу в каждой точке разделительного пространства.

Для упрощения схемы расчета параметров процесса рассматривается сечение цилиндрической части, поделенное на квадратные ячейки со стороной 1 мм, в которых параметры магнитного поля и центробежной силы неизменные. Принимаем также условие, что частицы шарообразные и не испытывают сопротивления, обусловленного стесненным движением суспензии. Движение магнитных частиц в МГЦ зависит от суммы следующих составляющих:

- инерционная — движение частицы с определенной массой и скоростью по известной траектории;
- гидродинамическая — взаимодействие частицы с потоком жидкости;
- магнитная — взаимодействие частицы с магнитным полем.

В каждой ячейке устанавливается центробежное ускорение, сила гидродинамического сопротивления, магнитная индукция и магнитное ускорение. Рассчитывается результирующее ускорение и установившаяся скорость смещения частицы $V_{смещ}$:

$$V_{смещ} = \frac{2a_{рез}r^2(\rho - \rho_0)}{9\eta_0},$$

где $a_{рез}$ — результирующее ускорение; r — радиус частицы; ρ — плотность частицы, ρ_0 — плотность жидкости; η_0 — динамическая вязкость жидкости.

Магнитная сила в каждой ячейке определялась по известной формуле:

$$F_{\text{магн}} = \mu_0 \chi \eta m_{\text{ч}} H_{\text{grad}} H,$$

$\mu_0 = 1.256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная; χ — магнитная восприимчивость вещества частицы, ед.; $m_{\text{ч}}$ — масса частицы, кг; H — напряженность магнитного поля, А/м.

Градиент напряженности H_{grad} вычисляется как разница значений напряженности поля в соседних ячейках, отнесенная к расстоянию между центрами ячеек.

Сила сопротивления движению частицы в жидкости рассчитывалась по формуле Стокса:

$$F_{\text{сопр}} = 6\pi\eta d_{\text{ч}} V_{\text{ч}},$$

здесь η — коэффициент динамической вязкости, Па·с; $d_{\text{ч}}$ — диаметр частицы, м; $V_{\text{ч}}$ — скорость частицы, м/с.

Также учитывалась центробежная сила $F_{\text{цб}}$, зависящая от тангенциальной скорости $V_{\text{т}}$ кругового движения потока в гидроциклоне:

$$F_{\text{цб}} = m_{\text{ч}} \frac{V_{\text{т}}^2}{R_{\text{вр}}}, \quad V_{\text{т}} = V_{\text{вх}} \left(\frac{R_{\text{ц}}}{R_{\text{вр}}} \right)^{0.66},$$

где $R_{\text{вр}}$ — радиус вращения частицы; $V_{\text{вх}}$ — входная скорость потока; $R_{\text{ц}}$ — радиус цилиндрической части гидроциклона.

В качестве критерия, по которому можно оценить возможность извлечения той или иной частицы в концентрат, избрана средняя установившаяся скорость смещения частицы $V_{\text{ср}}$ относительно потока жидкости, которую может развить эта частица под действием магнитной и центробежной сил с учетом сопротивления жидкости, для того чтобы преодолеть внутреннее пространство гидроциклона до разгрузочного отверстия 3 (рис. 1):

$$V_{\text{ср}} = \frac{\sum_0^i V_{\text{смещ}}}{i},$$

i — количество ячеек по пути перемещения частицы.

Если средняя скорость смещения мала, то частица не сможет преодолеть поток жидкости шириной L внутри магнитного гидроциклона и будет вынесена им из зоны действия магнитного поля (цилиндрической части), а далее последует либо в песковую насадку, либо в сливной патрубок в зависимости от крупности.

Частица совершает движение по спирали, при этом ее смещение рассматривается относительно оси гидроциклона. Для перемещения частицы к разгрузочному отверстию сливного патрубка она должна за время нахождения в цилиндрической части преодолеть расстояние L . Это кратчайший путь, пройденный частицей относительно вращающегося потока по направлению к сливному отверстию:

$$L = \sqrt{z^2 + (R_{\text{н}} - R_{\text{вн}})^2},$$

где z — расстояние от частицы до крышки гидроциклона, м; $R_{\text{н}}$ — внутренний радиус цилиндрической стенки гидроциклона, м; $R_{\text{вн}}$ — наружный радиус сливного патрубка, м.

Время нахождения частицы в зоне действия магнитного поля $t_{\text{н}}$ можно найти, зная размеры цилиндрической части МГЦ и его питающего патрубка:

$$t_{\text{н}} = \frac{R_{\text{н}}^2 z}{R_{\text{патр}}^2 V_{\text{вх}}},$$

здесь z — высота цилиндрической части гидроциклона, охваченная магнитным полем и необходимая для интенсивного извлечения; $R_{\text{патр}}$ — диаметр входного патрубка; $V_{\text{вх}}$ — скорость потока суспензии во входном патрубке гидроциклона.

Условием извлечения частицы из потока является гарантированное прохождение расстояния L за время ее нахождения в зоне действия магнитного поля гидроциклона.

$$V_{\text{ср}} t_n > kL,$$

$k > 1$ — коэффициент, учитывающий влияние турбулентности потока и движение частицы в стесненных условиях. Коэффициент k определяется опытным путем.

Схема расчета параметров процесса представляет собой матрицу, содержащую по пять параметров в каждой ячейке: магнитную индукцию, магнитное ускорение, центробежное ускорение, результирующее ускорение и расчетную скорость смещения, которые описывают распределение сил и скоростей, действующих на частицы в зоне действия магнитного поля. Определяющий параметр возможности извлечения частицы из потока в концентрат при заданных условиях — средняя установившаяся скорость перемещения, которую частица может развить в жидкости под действием действующих на нее сил. Для оценки возможности извлечения частицы мы берем именно среднюю скорость движения частиц, поскольку скорость отдельных частиц существенно отличается в зависимости от точки расположения частицы внутри гидроциклона.

С помощью описанных уравнений для заданной конструкции гидроциклона рассчитывалась средняя установившаяся скорость смещения частиц при разделении магнетитовой суспензии. Расчет проводился для гидроциклона с диаметром цилиндрической части 50 мм и сливным патрубком диаметром 10 мм. Входная скорость потока жидкости задавалась в пределах 0.1–1.0 м/с. При этом для гидроциклона высотой зоны сепарации 20 мм расчетное время пребывания частицы находится в пределах 0.51–5 с.

Результаты расчета установившейся средней скорости смещения частицы магнетита при изменяющемся уровне магнитной индукции приведены на рис. 2. Из представленных данных следует, что частицы магнетита приобретают достаточную среднюю скорость для преодоления потока жидкости только при 0.3 Тл в центре магнитной системы (как будет показано далее в экспериментальных данных).



Рис. 2. Влияние магнитной индукции на изменение установившейся средней скорости смещения частицы размером 0.074 мм с магнитной восприимчивостью 0.000817 м³/кг

Очевидно, что повышение уровня магнитной индукции приводит к нелинейному увеличению скорости движения магнитной частицы относительно потока жидкости. Следовательно, вероятность ее извлечения в концентрат повышается.

С увеличением магнитной восприимчивости частиц при фиксированной магнитной индукции их скорость линейно возрастает. Это позволяет подобрать режим работы МГЦ для разделения богатых и бедных сростков либо материалов с различной магнитной восприимчивостью.

Как показывают расчетные данные, с увеличением скорости подачи суспензии снижается средняя скорость смещения частиц (рис. 3). Извлечение концентрата будет снижаться, если не компенсировать эту ситуацию увеличением магнитной индукции.

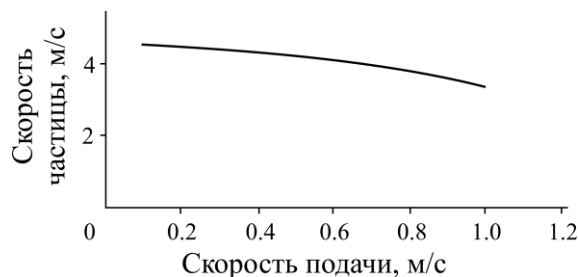


Рис. 3. Влияние скорости подачи суспензии на установившуюся среднюю скорость смещения частицы магнетита в сторону разгрузочного отверстия МГЦ

Из представленных на рис. 2 и 3 расчетных данных следует, что процессом обогащения в магнитном гидроциклоне можно управлять изменением магнитной индукции и скоростью подачи суспензии. Исходя из свойств сырья возможно определение необходимой силы магнитного поля и прогнозирование конструктивных размеров разделительного устройства и магнитной системы. Чтобы спрогнозировать извлечение того или иного продукта, нужно знать его исходное распределение по крупности. В настоящем исследовании использовался магнетит, измельченный до -0.1 мм. Распределение по крупности представлено на рис. 4.

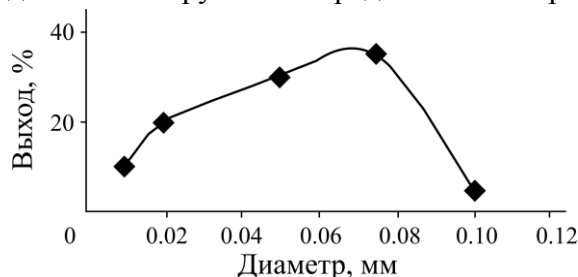


Рис. 4. Гранулометрическая характеристика магнетита

Далее было построено семейство кривых, отражающих изменение средней установившейся скорости частиц в зависимости от их диаметра и магнитной индукции в магнитной системе МГЦ (рис. 5).

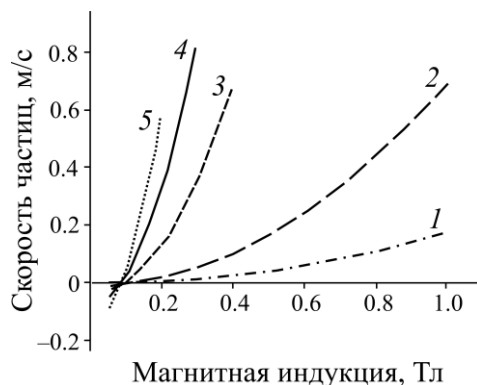


Рис. 5. Зависимость расчетной установившейся средней скорости частиц различных классов крупности в зависимости от магнитной индукции (отрицательное значение скорости означает извлечение в хвосты): 1 — 0.010; 2 — 0.020; 3 — 0.050; 4 — 0.075; 5 — 0.100

Неравенством $V_{\text{ср}} t_{\text{н}} > kL$ определялась скорость частицы, при которой происходит ее извлечение. В данном случае скорость составляет не менее 0.1 м/с. По расчетам на рис. 5 устанавливаем, что частицы 10 мкм извлекаются при магнитной индукции 0.75 Тл, частицы 20 мкм при магнитной индукции 0.38 Тл и т. д.

Суммируя выходы частиц соответствующей крупности по мере возрастания магнитной индукции, получаем расчетную зависимость извлечения частиц от силы приложенного магнитного поля (рис. 6, кривая 1).

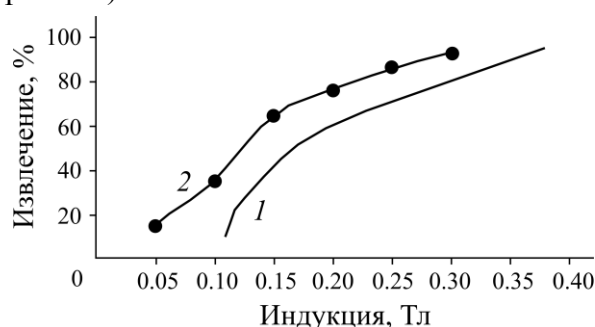


Рис. 6. Влияние магнитной индукции на расчетное (1) и экспериментальное (2) извлечение железа из суспензии магнетитового концентрата и кварца

Для экспериментальной проверки расчетных данных создано действующее устройство с магнитной системой, которое питалось переменным током через автотрансформатор, обеспечивая непосредственно под крышкой гидроциклона в центре магнитную индукцию до 0.4 Тл. Эффективность работы МГЦ испытывалась в лабораторных условиях на искусственной суспензии магнетитового концентрата и кварца в соотношении, соответствующем содержанию $\text{Fe}_{\text{маг}}$ 43.98 % при 18 % твердого и крупности 70 % класса -0.04 мм. Верхняя граница крупности составляла 0.12 мм. Содержание железа в продуктах определялось с помощью рентгенофлуоресцентного анализа.

Суспензия подавалась в МГЦ через входной патрубок при помощи шламового насоса производительностью 800 л/час. В цилиндрической части корпуса гидроциклона суспензия попадала в зону действия магнитных и центробежных сил и приобретала вращательное движение. При этом магнитная сила направляет магнитные частицы к магнитной системе, в результате чего они концентрируются под крышкой гидроциклона вокруг сливного патрубка. Немагнитные частицы под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам гидроциклона и затем удаляются через песковую насадку. Поскольку применяется переменное магнитное поле, восприимчивые частицы совершают колебательные движения с частотой магнитного поля, одновременно перемещаясь в сторону центра магнитной системы и таким образом дают возможность немагнитным частицам в стесненных условиях перемещаться к периферии [19]. Магнитные частицы, находящиеся у стенок сливного патрубка, под действием разницы давления потоков суспензии в цилиндрической части гидроциклона и в сливном патрубке выдавливаются через разгрузочные отверстия внутрь сливного патрубка и потоком осветленной в гидроциклоне тонкодисперсной части суспензии выносятся из магнитного гидроциклона.

По результатам лабораторных испытаний разделения суспензии магнитных и немагнитных частиц при различной магнитной индукции построена экспериментальная зависимость извлечения Fe от магнитной индукции (рис. 6, кривая 2). Полученные экспериментальные зависимости имеют сходимость с расчетной зависимостью извлечения магнитных частиц в концентрат. Имеющиеся расхождения объясняются тем, что схема расчета достаточно проста и не учитывает все особенности перемещения массы вещества в гидроциклоне, например наличие циркуляционных потоков. Кроме того, при отсутствии магнитного поля имеется небольшое извлечение

магнетита в концентрат за счет выноса мелких классов минерала в слив с потоком жидкости. Эта составляющая обусловлена граничной крупностью разделения в магнитном гидроциклоне без магнитной системы и дает небольшую прибавку к теоретическому извлечению.

Несоответствие в извлечении можно скорректировать путем введения поправочного коэффициента, который может быть получен в результате дальнейшего проведения статистических исследований на реальном сырье с учетом снижения магнитной восприимчивости тонкодисперсных частиц [20]. Если считать зависимость извлечения от приложенной магнитной индукции как $\varepsilon = f(B)$, то с учетом выноса $\varepsilon = f(x + B)$, где x — постоянная выноса. Следует отметить, что режим работы МГЦ в отсутствии магнитного поля не является рабочим режимом, как и при низких значениях магнитной индукции.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показывают возможность эффективного разделения суспензии на магнитную и немагнитную фракции во вращающемся потоке жидкости под воздействием наложенного на него магнитного поля. Предполагается обогащение самых различных минералов, имеющих магнитные свойства, при установке соответствующей магнитной индукции. Схема расчета позволяет прогнозировать параметры магнитного гидроциклона: силу магнитного поля, скорость подачи, конструктивные размеры разделительного устройства и магнитной системы в соответствии со свойствами перерабатываемого сырья. Данный метод имеет перспективы развития и применения в различных схемах обогащения.

Обоснован и разработан метод прогнозирования результатов процесса разделения суспензии в магнитном гидроциклоне, заключающийся в определении граничной скорости частиц в жидкости под действием основных силовых полей процесса магнитного гидроциклонирования, учитывающий основные геометрические параметры аппарата, физические свойства обогащаемого материала и режимы процесса разделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. — М.: МГГУ, 2005. — 670 с.
2. Khokhulya M. S., Alekseeva S. A., Cherezov A. A., and Fomin A. V. Analyses of grinding and gravity / magnetic separation with a view to optimizing mixed-type processing technology for rare metals, J. Min. Sci., 2021, Vol. 57, No. 3. — P. 511–522.
3. Freeman R. J., Rowson N. A., Veasley T. J., and Harris I. R. The progress of the magnetic hydrocyclone, Magnetic and Electrical Separation, 1993, Vol. 4, No. 3. — P. 139–149.
4. Chen G. Design and analysis of magnetic hydrocyclone, A thesis submitted for the degree of master of engineering, Department of Mining and Metallurgical Eng. McGill University, 1989. — 129 p.
5. Просвирнин В. И., Масюткин Е. П., Масюткин Д. Е. Уточненная математическая модель коагуляции магнитных частиц при криволинейном движении // Совр. наукоемкие технологии. — 2017. — № 9. — С. 58–63.
6. Пелевин А. Е. Уточненная математическая модель коагуляции магнитных частиц при криволинейном движении // Обогащение руд. — 2021. — № 4. — С. 15–18.
7. А. с. 1194495 СССР. Магнитный гидроциклон кл. В 03 С 1/02 / Ю. А. Курников, И. Ф. Концур, А. В. Паневник, В. П. Здрок, Ю. Н. Ефимов, С. Н. Иовчук. — 1985.
8. Adewoye A. J. Improvement to hydrocyclone used in separating particles from produced water in the oil and gas industry. Robert Gordon University, PhD thesis. 2020. Hosted on OpenAIR [online]. Available from: <https://doi.org/10.48526/rgu-wt-1357822>.

9. **Wenshan Guo, Huu Hao Ngo, Rao Y. Surampalli, and Tian C. Zhang.** Sustainable resource management: Technologies for recovery and reuse of energy and waste materials, John Wiley & Sons., 2021. — P. 435.
10. **Premarathe W. A. and Rowson N. A.** Development of a magnetic hydrocyclone separation for the recovery of titanium from beach sands, *Physical Separation Sci. Eng.*, 2003, Vol. 12, No. 4. — P. 215–222.
11. **Авдеев Б. А.** Расчет электромагнитной системы магнитного гидроциклона // *Вестн. АГТУ. Морская техника и технология.* — 2015. — № 2. — С. 64–71.
12. **Масюткин Е. П., Авдеев Б. А., Просвирнин В. И.** Исследование распределения напряженности магнитного поля в инерционном аппарате очистки судового моторного масла // *Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова.* — 2016. — Т. 19. — № 4. — С. 737–743.
13. **Львов В. В., Александрова Т. Н.** Автоматизированное управление классификацией гидроциклонов // *Горн. журн.* — 2017. — № 5. — С. 94–96.
14. **Управителева А. А., Львов В. В.** Исследование влияния магнитного гидроциклона при классификации окисленных железистых кварцитов // *Материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. “Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья”*: сб. науч. ст. — Екатеринбург, 2020. — С. 175–180.
15. **Авдеев Б. А.** Повышение эффективности очистки моторного масла в судовых дизелях путем применения магнитных гидроциклонов. — Ульяновск, 2016. — 151 с.
16. **Lin Liu, Lixin Zhao, Xu Yan, Yahong Wang, Baorui Xu, and Bing Lian.** Innovative design and study of an oil-water coupling separation magnetic hydrocyclone, *Separation and Purification Technology*, 2019, Vol. 213. — P. 389–400.
17. **Zhang Jianpinga, Zha Zhentinga, Che Penga, Pan Weiguoa, and Liu Jianga.** Trapping performance improvement of submicron particles in electrostatic cyclone by the applied magnetic field, *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, 2018, Vol. 57, No. 2. — P. 205–215.
18. **Патент 2748911 РФ.** Способ извлечения магнитной фракции из потока суспензии и устройство для его осуществления / П. А. Сыса, А. А. Лавриненко, И. И. Агарков // *Опубл. в БИ.* — 2021. — № 16.
19. **Сыса П. А.** Повышение селективности обогащения магнетитовых кварцитов на основе применения высокоградиентного сепаратора с низкоинтенсивным переменным магнитным полем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2016. — 23 с.
20. **Опалев А. С., Марчевская В. В.** Исследование влияния крупности зерен магнетита на магнитную восприимчивость железорудных концентратов // *ФТПРПИ.* — 2023. — № 1. — С. 161–167.

Поступила в редакцию 02/VI 2023

После доработки 25/VI 2023

Принята к публикации 30/VI 2023