

Введение Одним из перспективных и эффективных способов очистки суспензий от парамагнитных загрязняющих примесей с размером частиц менее 60 мкм (оксиды железа, титана, никеля, хрома и т. д., органические и неорганические взвешенные вещества, бактериальная флора), является высокоградиентная магнитная сепарация (ВГМС) [1]. Эффективность очистки суспензий методом ВГМС, зависит от ряда факторов, и может быть представлен как: $\Theta = f(H, \text{grad } H, h, d_{\text{ш}}, c, c_{\text{ч}}, v, d_{\text{ч}}, \eta, \text{ст} \dots)$, (1) $\Theta = [(C_0 - C)/C_0] \cdot 100\%$, (2) где H - напряженность магнитного поля, $\text{grad } H$ - градиент напряженности магнитного поля, h - высота зоны фильтрации, $d_{\text{ш}}$ и c - размер и магнитные свойства рабочих тел матрицы, $c_{\text{ч}}$ - магнитная восприимчивость частиц; v - скорость движения жидкости через рабочие тела матрицы, η - динамическая вязкость среды; $d_{\text{ч}}$ - диаметра частиц фильтруемого материала; d - плотность вещества частицы, c и C - магнитных свойства частицы, C_0 и C - начальная и конечная концентрация частиц в очищаемой жидкой среде. С рядом допущений, условие очистки в высокоградиентном магнитном поле суспензий от частиц размером менее 60 мкм следующее: магнитная сила, действующая на частицу должна быть больше или равна силе гидродинамического сопротивления [1]: $f_m = \mu_0 \cdot c_{\text{ч}} \cdot H \cdot \text{grad } H \cdot V_p$ $f_g = 18 \cdot h \cdot v / d^2 \cdot \rho$, (3) Существенное значение для нахождения важных технологических параметров ВГМС - оптимальной высоты (длины) зоны фильтрации (h_0) и оптимального времени фильтрации (t_0) имеет знание закономерности распределения задержанных частиц по высоте зоны фильтрации высокоградиентного магнитного сепаратора. Результаты исследования и их обсуждение Для нахождения значения h_0 , рассмотрим распределение задержанных парамагнитных частиц по высоте зоны фильтрации магнитного сепаратора. Зададим граничные условия [2,3]: в общей массе частиц с удельной магнитной восприимчивостью $0,1 \cdot 10^{-6} - 430 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$ и эквивалентным диаметром меньших 60 мкм, процент частиц с эквивалентным диаметром 1–45 мкм должно быть в диапазоне 40 – 60 %; концентрация твердого в жидкой среде должна быть не более 14 %; индукция магнитного поля и градиент напряженности магнитного поля по всей длине зоны фильтрации ВГМС постоянны и лежат соответственно в диапазоне 0,2–1,6 Тл и $1,7 \cdot 10^8 - 6 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$; вязкость очищаемой жидкой среды не более 5-6 мПа·с; температура жидкой среды не более 200 оС; скорость потока жидкости на выходе из зоны фильтрации ВГМС 0,006– 0,07 м/с, высота (длина) зоны фильтрации магнитного сепаратора - до 0,6 м. В этих условиях обработка опытных данных [2,3], показала, что распределение концентрации задержанных частиц по высоте зоны фильтрации высокоградиентного магнитного сепаратора достаточно хорошо описывается зависимостью: $C = C_0(1 - e^{-(k \cdot h)})$, (4) откуда высота зоны фильтрации: $h = [\ln(1 - C_0/C)]/k$, (5) где C и C_0 - концентрация частиц в суспензии на выходе из матрицы и входе в матрицу, мг/л, k - безразмерный коэффициент, определяемый опытным путем, h - высота зоны фильтрации, м. С рядом

допущений t_0 для матрицы из шаров диаметром $d_{ш}$ может быть рассчитано по эмпирической формуле, приведенной в работе [4]: (6) где, h_0 – оптимальная высота зоны фильтрации высокоградиентного магнитного сепаратора, м; R – радиус окружности, в которую заключен один слой, состоящий из шаров размером $d_{ш}$, м; K_n – коэффициент пористости шаров; $r_{сч}$ – средневзвешенный радиус частиц, м; $d_{ч}$ – плотность частицы, кг/м³; C_0 – концентрация частиц в очищаемой жидкой среде, кг/кг; $d_{ж}$ – плотность жидкости, кг /м³; S – площадь сечения рабочей зоны магнитного аппарата, м²; v – скорость фильтрации жидкости через рабочую зону магнитного аппарата, м/с. Задаваясь требуемой эффективностью очистки ВГМС и последовательно решая уравнения (2), (4), и (6) можно рассчитать h_0 и t_0 . Например, при очистке оборотных вод сталеплавильного производства от шлама с начальной концентрацией частиц 5200 мг/л, диаметром частиц ≤ 45 мкм, с t до $428 \cdot 10^{-6}$ м³/кг с эффективностью $\approx 98\%$, оптимальная высота зоны фильтрации магнитного сепаратора составила $h_0 \approx 0,15$ м, время фильтрации $t_0 \approx 50$ с. Для этого случая уравнение (4) имеет вид: $C = 5200 \cdot (1 - e^{-(24 \cdot h)})$ (рис. 1). Рис. 1 - Распределение задержанных частиц по высоте зоны фильтрации магнитного сепаратора По данным гранулометрического анализа [3], в межшаровом пространстве и на поверхности шарового слоя матрицы происходит накопление «подложки» из наиболее крупных и сильномагнитных частиц диаметром $d \geq 10$ мкм (рис.2). Рис. 2 - Гранулометрический состав шлама сталеплавильного производства: 1 - шлам до очистки, 2 - магнитный шлам; m - массовая доля Из рис. 2 видно, что размер основной массы частиц магнитного шлама (более 80 %) лежит в диапазоне 0,010-0,045 мм. Очевидно, что в этом диапазоне $f_m \gg f_g$. Дальнейшее увеличение высоты зоны фильтрации $> 0,15$ м, дает лишь незначительный прирост эффективности очистки суспензии от шлама по причине наличия в ней частиц диаметром $d \leq 10$ мкм. Для этого случая $f_m \leq f_g$. С ростом начальной концентрации шлама в очищаемой суспензии, например, для $C = 7200$ мг/л при индукции магнитного поля 0,21 Тл, решение системы уравнений (2), (4), (6) при эффективности магнитной очистки 99 %, дает оптимальное время фильтрации $t_0 \approx 44$ сек, (по опытным данным примерно 30 сек) и оптимальную высоту зоны фильтрации $h_0 \approx 0.2$ м. Для получения концентрации шлама в воде, например, 180 мг/л, при начальной концентрации 7200 мг/л, оптимальное время фильтрации составит примерно 1,9 мин (по опытным данным 2 мин) [2]. Несмотря на ряд преимуществ перед другими методами, метод высокоградиентной магнитной сепарации малоэффективен при очистке слабokonцентрированных суспензий от ионов металлов. Это связано в первую очередь с технической сложностью и дороговизной изготовления мощных магнитных систем, создающих большую магнитную силу $|B_{gradB}|$ [1], позволившую бы извлечь из воды ионы металлов, имеющих радиус порядка $0,2 \cdot 10^{-9}$ м. С целью доочистки таких суспензий от ионов тяжелых металлов

целесообразно дополнить метод ВГМС сорбционной очисткой с помощью отходов промышленного и сельскохозяйственного производства, предложенные в работах [4-6], что позволит существенно повысить эффективность очистки суспензий, в том числе от ионов тяжелых металлов. Выводы Таким образом, полученная система уравнений $\eta = [(C_0 - C)/C_0] \cdot 100\%$, $C = C_0(1 - e^{-k \cdot h})$, в граничных условиях позволяет рассчитать важнейшие технологические параметры магнитной сепарации - оптимальную высоту зоны фильтрации h_0 и оптимальное время фильтрации t_0 ,