

Автоматизированная система управления магнитным дешламентом

А.С. Ануфриев¹, Л.А. Русинов²

¹ООО «Лаборатория инжиниринга»,

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

Аннотация: Процесс дешламации играет ключевую роль в технологии обогащения минеральных материалов, обеспечивая эффективное разделение частиц на основе их магнитных свойств. В статье рассматриваются проблемы, возникающие при использовании традиционных магнитных дешламентов в условиях повышенных температур пульпы. Одним из основных недостатков существующих методов является снижение плотности магнетита при увеличении температуры, что ухудшает качество разделения и приводит к потерям полезного продукта. В статье исследуются физические аспекты этой проблемы и предлагаются методы её устранения, включая управление напряженностью магнитного поля для оптимизации флокуляции. Рассматривается также возможность модернизации дешламентов с заменой постоянных магнитов на электромагниты, что позволит более точно контролировать процесс. Моделирование магнитных полей с использованием программного обеспечения ANSYS Maxwell подтверждает эффективность предложенных решений. Главное внимание в работе уделено разработке гибридной интеллектуальной системы управления процессом дешламации. Предлагаемая система состоит из трех контуров управления: подачей воды, током возбуждения электромагнитов и разгрузкой дешламентатора. Управление каждым из контуров осуществляется с помощью пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов, которые автоматически корректируются на основе данных об изменяющихся параметрах пульпы и внешних условиях. Применение этих методов позволит существенно повысить качество железорудного концентрата, увеличить содержание железа в продукте, снизить потери в хвостах, а также обеспечить стабильную работу оборудования при изменяющихся условиях окружающей среды.

Ключевые слова: магнитная дешламация, флокулятор, АСУ ТП, ПИД регулятор, обогащение железной руды, оптимальное управление.

Введение

Основными показателями эффективности обогащения в целом и магнитной дешламации в частности являются содержание железа в концентрате и в хвостах, однако непрерывный контроль этих показателей вызывает затруднение. Поскольку оба показателя сильно нелинейны и неопределенны в зависимости от расхода промывочной воды, возбуждающего тока и плотности подачи, применение математического моделирования не позволяет определить их с достаточной точностью и обеспечить управление по обратной связи с помощью обычных методов

управления, что делает актуальной задачу модернизации системы управления дешламентом [1, 2].

Одним из факторов, оказывающих серьезное влияние на производительность секции обогащения и, главным образом, на передел дешламации является температура окружающей среды, изменяющая вязкость поступающей в дешламатор пульпы [3].

Ключевым понятием, отражающим негативное влияние повышения температуры, является «технологическое лето», основанное на обнаруженной зависимости линейного падения времени отделения магнитных и немагнитных фракций в дешламаторе от температуры водяной суспензии (см. рисунок 1). Время разделения по плотности изменяется (уменьшается) от 135 секунд при 2 °С до 65 секунд при 22 °С.

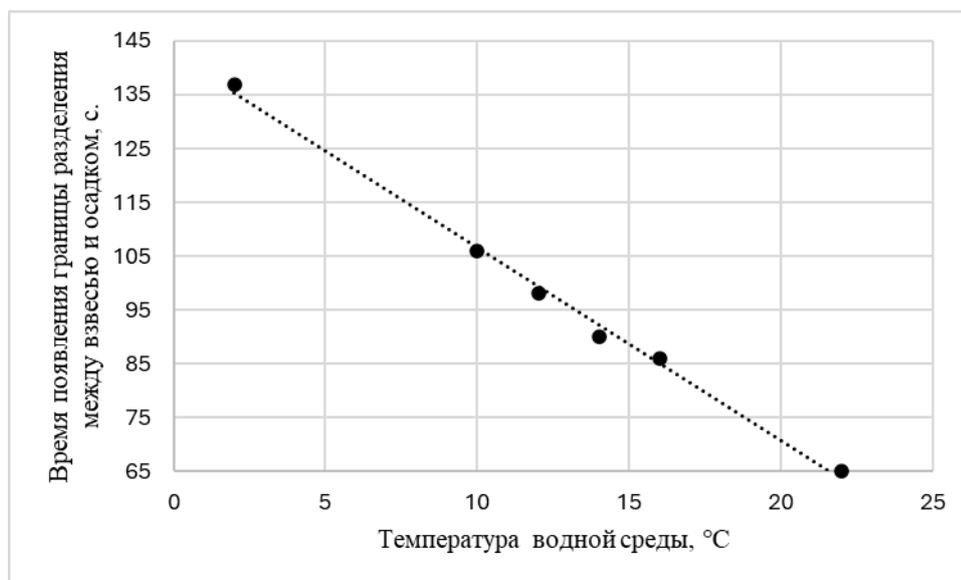


Рис. 1. – График линейной аппроксимации расслоения суспензии от температуры

В традиционных дешламаторах (МД-5 и МД-9, исследованных на фабрике АО «Карельский окатыш») скорость падения вихрей с флокулами уже при 13 °С становится слишком высокой для эффективного разделения магнитных и немагнитных частиц.

В МД-9 пульпа подается в кольцевой желоб загрузочного бака, проходит через намагничивающие аппараты, где магнитные частицы образуют флоккулы, ускоряя осаждение. Осевший материал транспортируется граблями к центру и выводится через дроссельный клапан. Вода и шламы вытесняются вверх и удаляются. Конструкция дешламатора МД-9 представлена на рисунке 2.

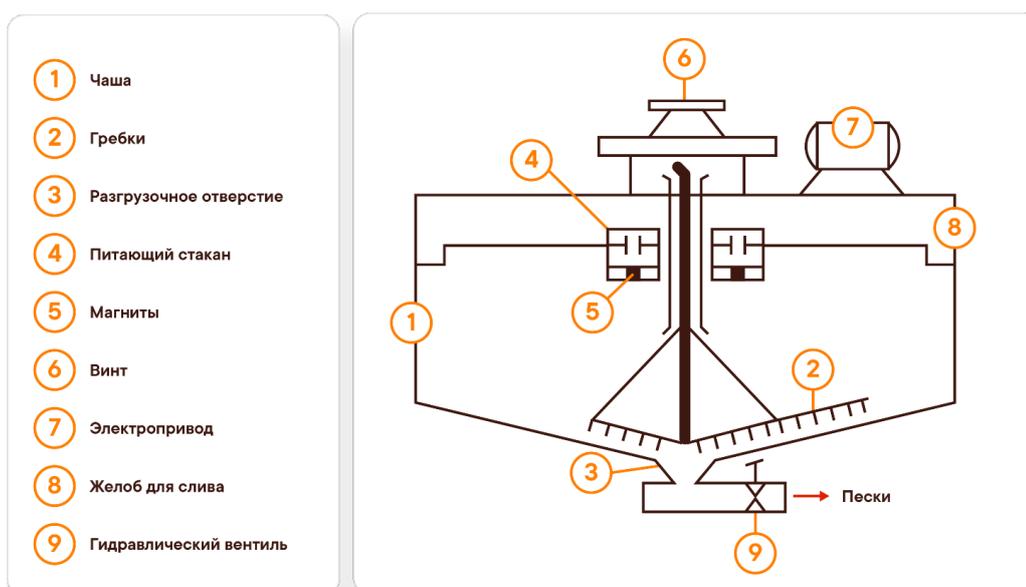


Рис. 2. – Эскиз магнитного дешламатора МД-9

Сезонные изменения температуры влияют на работу дешламатора. При температуре воды ниже 13 °С процесс разделения соответствует требованиям, а управление осуществляется через кран для выпуска магнетита. Однако при температуре выше 13 °С плотность пульпы снижается, что нарушает процесс. Это связано с уменьшением вязкости воды, изменением турбулентных вихрей и ухудшением образования флокул, что приводит к потерям воды, увеличению отходов и снижению плотности магнетита [4].

Магнитное поле дешламатора

Методы повышения эффективности флокулообразования в магнитном дешламаторе связаны с оптимизацией физических, химических и

технологических параметров. Основой флокулообразования является процесс агрегации мелких частиц, который можно улучшить различными способами.

В.В. Карамзин установил зависимость между степенью флокуляции и напряженностью поля:

$$\psi = k_1 H_0^2 \Delta\psi \delta(H - H_{кр}) + (1 + \psi_2) \{1 - \exp[-k_2(H - H_{кр})]\} \quad (1)$$

Где H_0 – начальная напряженность магнитного поля, вызывающая равновесную обратимую флокуляцию;

$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$ – прирост степени флокуляции за счет лавинного процесса;

ψ_1, ψ_2 – степени флокуляции в начале и конце лавинного процесса, соответственно;

$H_{кр}$ – критическая напряженность поля, вызывающая лавинную флокуляцию ($H_0 < H_{кр}$);

k_1 и k_2 – коэффициенты интенсивности процесса, функции от концентрации, магнитной восприимчивости, форм-фактора, критерия Рейнольдса для гидромеханического режима движения среды, размера частиц от времени;

$\delta(H - H_{кр})$ – функция Дирака от напряженности [5].

Исходя из математического описания процесса магнитной флокуляции, можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на эффективность дешламации оказывают напряженность магнитного поля и гидродинамические характеристики движения среды.

Конструктивной особенностью штатных флокуляторов является неравномерное магнитное поле для намагничивания пульпы. В соответствие с паспортом на дешламатор магнитный МД9, напряженность магнитного поля в середине рабочего зазора составляет не менее 40 кА/м (рисунок 2).

Эксплуатационный персонал из опыта применения МД-9 увеличил величину напряженности магнитного поля флокуляторов до 60 кА/м, не изменяя его конструкции [6, 7].

Магнитный флокулятор дешламатора (рисунок 3), состоящий из цилиндрического ферромагнитного корпуса с магнитной системой, состоящей из постоянных магнитов с магнитной индукцией, направленной по оси цилиндра и размещенной на верхней части ферромагнитного полюса, изготовленного в виде усеченного конуса [8].

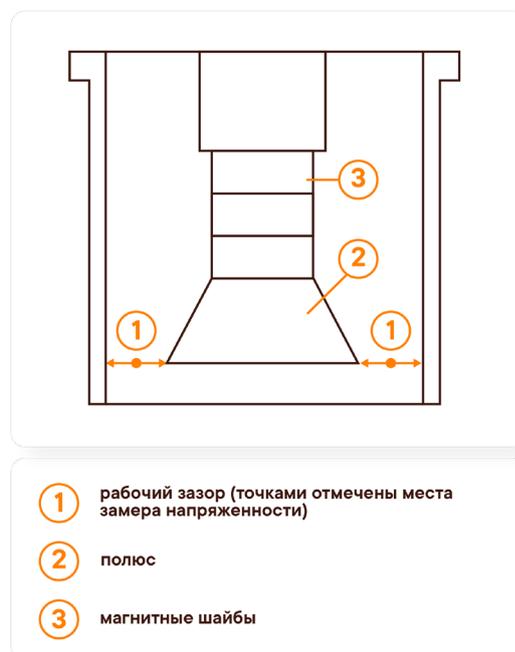


Рис. 3. – Флокулятор МД-9.

Форма изменения напряженности магнитного поля в рабочем зазоре флокулятора представлена на рисунке 4.

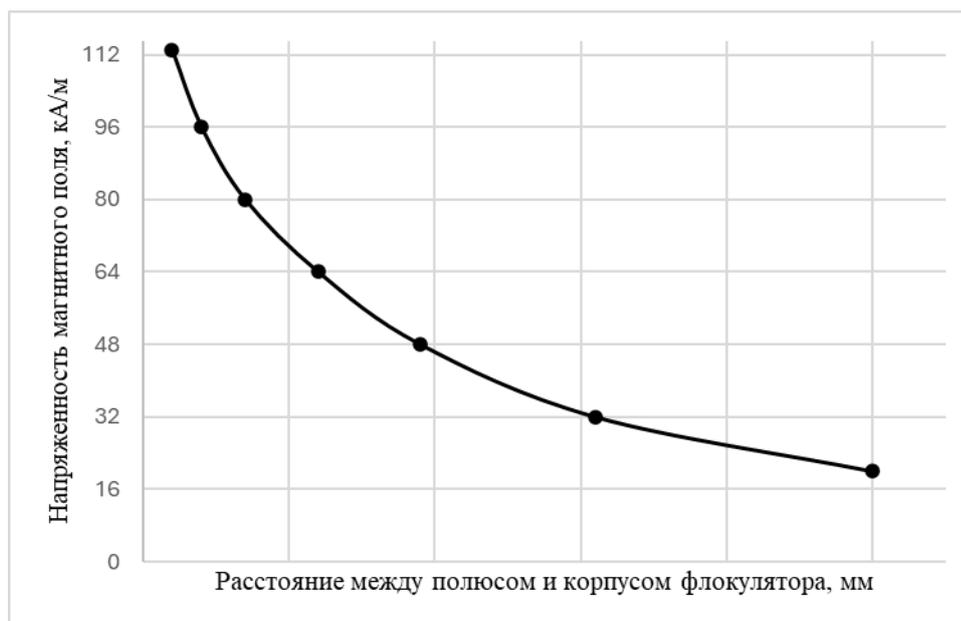


Рис. 4. – График зависимости напряженности магнитного поля от расстояния между полюсом и корпусом флокулятора.

Для обеспечения эффективного управления процессом дешламации в условиях нестабильных физико-химических характеристик пульпы требуется внедрение регулируемого параметра – напряженности магнитного поля, для чего необходима модернизация традиционно применяемой в дешламаторах конструкции флокулятора.

Моделирование магнитного поля флокулятора

Наиболее современное программное обеспечение для исследования магнитных полей трехмерных моделей – комплекс программ ANSYS Maxwell, который базируется на методе конечных элементов (Finite Element Method – FEM) и численно рассчитывает статические, гармонические электромагнитные и электрические поля, а также переходные процессы в полевых задачах.

Основу математического аппарата составляют уравнения Максвелла, которые являются фундаментальными уравнениями электромагнитного поля:

Уравнение Гаусса, где B – магнитная индукция:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2}$$

Закон Ампера с поправкой Максвелла связывает циркуляцию магнитного поля с плотностью электрического тока и изменением электрического поля во времени (H – напряженность магнитного поля, D – электрическая индукция, J – плотность тока):

$$\nabla \cdot \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3)$$

Исходные уравнения для моделирования магнитного поля в стационарном режим часто используется квазистатическое приближение, где вклад переменного электрического поля может быть пренебрежимо мал, и тогда уравнение Ампера принимает вид:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \quad (4)$$

Магнитное поле характеризуется двумя векторными величинами: магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля. Они связаны через магнитную проницаемость материала μ следующим образом:

$$\bar{B} = \mu \cdot \bar{H} \quad (5)$$

Уравнению Лапласа – Пуассона относительно магнитного векторного потенциала:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} = -\mu_0 \bar{J} \quad (6)$$

В трехмерной системе координат (xyz) магнитное поле имеет три составляющих вектора магнитного потенциала $A=A_x$, $A=A_y$, $A=A_z$, и уравнение Лапласа-Пуассона принимает вид [9-11]:

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A}_x = -\mu_0 \bar{J}_x \\ \frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A}_y = -\mu_0 \bar{J}_y \\ \frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A}_z = -\mu_0 \bar{J}_z \end{cases} \quad (7)$$

Для моделирования штатного флокулятора были использованы исходные данные, представленные в таблице 1.

Таблица №1

Исходные параметры модели штатного флокулятора

Параметр	Значение
Материал магнита	Феррит-барий
Остаточная индукция (Br)	1,2 Т
Коэрцитивная сила (Hc)	800 кА/м
Форма магнита	Цилиндрическая
Диаметр магнита	0,02 м
Длина магнита	0,05 м
Рабочая температура	25 °С
Температурный коэффициент	-0,1 %/°С
Температура окружающей среды	20 °С
Тип анализа	Статический анализ
Шаг сетки	0,001 м
Граничные условия	Нулевые граничные условия на границе расчетной области

Решение системы уравнений 7 получено с помощью пакета в комплексе программ ANSYS Maxwell 3D. В ходе решения построены: картина магнитного поля исходного флокулятора, график напряженности (рисунок 5).

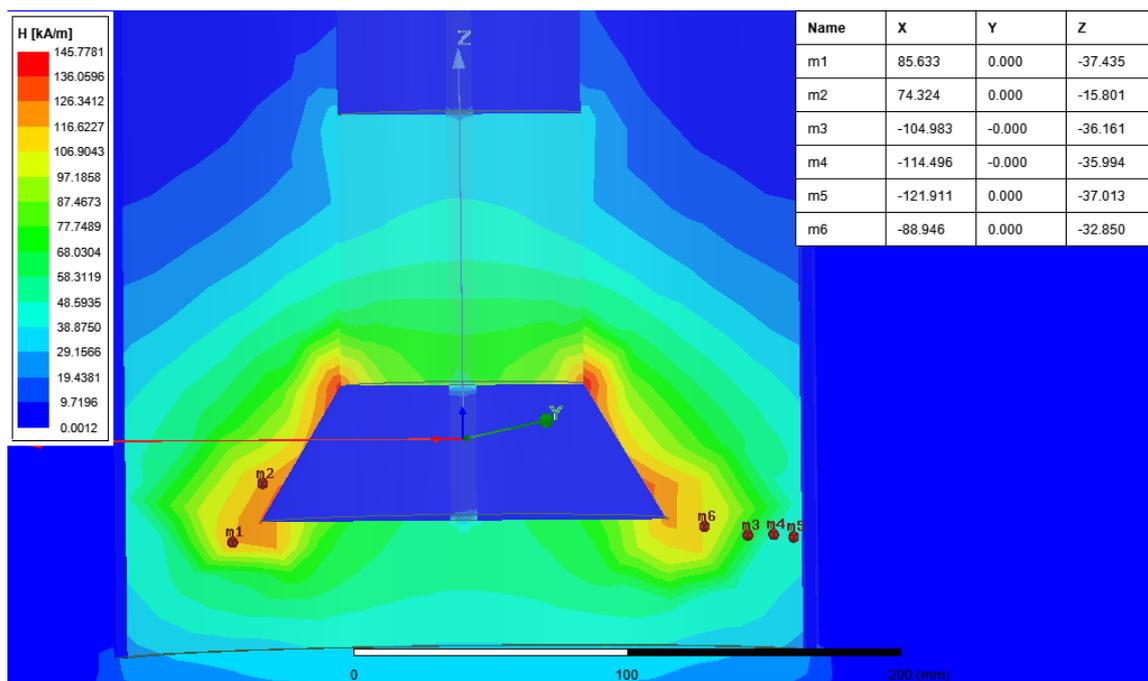


Рис. 5 – Распределение магнитного поля штатного флокулятора МД-9

Исходя из полученного распределения магнитного поля штатного флокулятора, в предлагаемой конструкции обеспечивается «средняя» напряженность магнитного поля постоянной величины ориентировочно в 74 кА/м.

Выбранная величина напряженности магнитного поля не должна привести к необходимости размагничивания после выхода песков из дешламатора с одной стороны и обеспечить более равномерное намагничивание проходящей через такие флокуляторы пульпы с другой стороны [12, 13].

В данной конструкции флокулятора негативное влияние оказывают колебания в характеристиках исходного сырья для магнитного дешламатора, такие как изменение гранулометрического состава, массовой плотности пульпы, температуры.

Предлагается модернизировать флокуляторы, а именно заменить постоянные магниты на электромагниты в форме полого цилиндра. Таким образом, будет возможность управлять напряженностью электромагнитного

поля в зависимости от характеристик руд, которые поступают на передел обогащения [14-16].

Предварительные расчеты показали, что для создания поля напряженностью выше 120 кА/м необходим ток возбуждения порядка 80-90 кА. Исходные данные для моделирования представлены в таблице 2.

Таблица №2

Исходные параметры модели соленоидного флокулятора

Параметр	Значение
Длина соленоида	0,1 м
Внутренний диаметр соленоида	0,05 м
Внешний диаметр соленоида	0,06 м
Число витков	1000
Материал проводника	Медь
Диаметр проводника	0,001 м
Сила тока	1 А
Частота тока	50 Гц
Температура	20 °С
Тип анализа	Статический анализ
Шаг сетки	0,001 м
Граничные условия	Нулевые граничные условия на границе расчетной области

На рисунке 6 представлено распределение напряженности магнитного поля при токе возбуждения 170 кА·витков. Магнитное поле внутри соленоида (в месте протекания пульпы) может достигать 300 кА/м и практически постоянно по модулю [17].

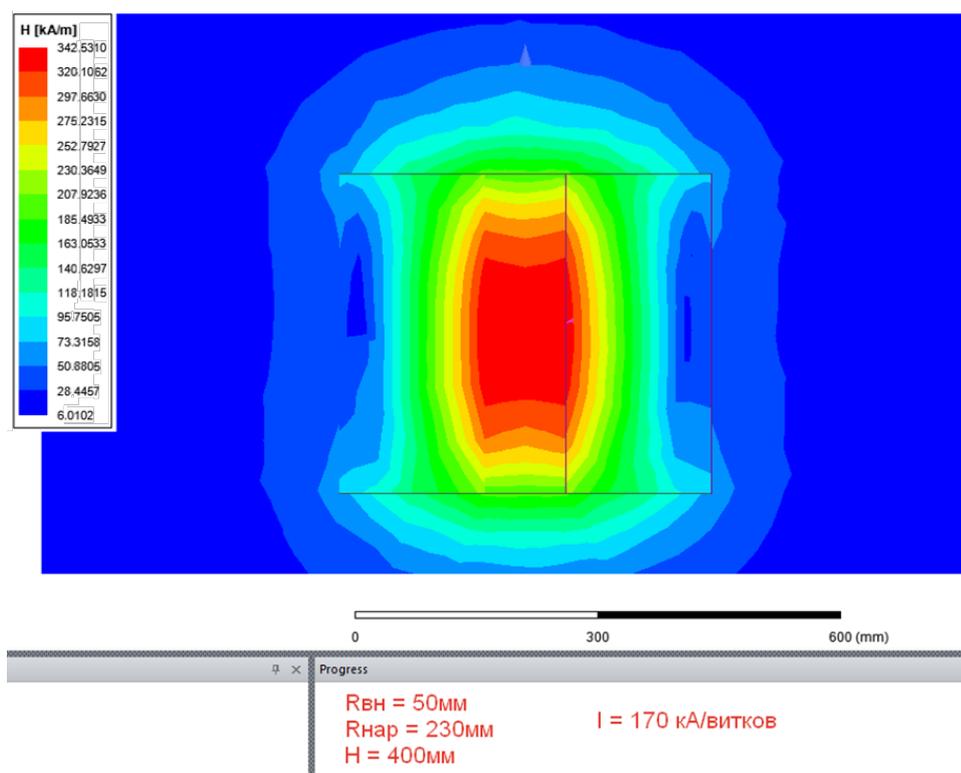


Рис. 6 – Распределение магнитного поля соленоидного флокулятора
Автоматизированная система управления магнитным дешламентом

Интеграция моделирования и управления привела к разработке гибридного интеллектуального метода управления, основанного на математическом моделировании ключевых зависимостей процесса дешламации и оптимизации уставок регуляторов по целевой функции.

Одной из ключевых задач в процессе дешламации является возможность регулирования величины магнитного поля в зависимости от характеристик шихты с одновременным увеличением времени нахождения частиц в чане дешламатора. Это позволяет подстраивать параметры работы флокулятора под конкретные условия, обеспечивая оптимальное намагничивание и, соответственно, эффективность процесса [18-20].

Предлагается модернизировать систему управления дешламентом, выделив 3 контура управления:

– Контур управления подачей воды: регулятор получает текущие значения расхода воды через электромагнитный расходомер. В зависимости от значений расхода регулируется задвижка.

– Контур управления возбуждающим током соленоида, определяющим напряженность магнитного поля дешламатора: текущий ток измеряется трансформатором тока и корректируется с помощью угла включения тиристора.

– Контур управления разгрузкой дешламатора предусматривает датчик, являющийся радиоизотопным плотномером: в зависимости от плотности слива дешламатора исполнительный механизм закрывает или открывает разгрузочную задвижку дешламатора.

Помимо 3-х контуров реализован автоматический контроль массовой доли железа магнетита в отвальных хвостах и в концентрате осуществляется непрерывно с помощью автоматических потоковых магнитометров (АПМ).

На основе выделенных контуров разработана гибридная интеллектуальная стратегия оптимизации управления для магнитного дешламатора, представленная на рисунке 7.

В системе управления обесшламливанием железорудного концентрата реализован гибридный подход, который объединяет контурное управление с оптимизацией на основе целевой функции.

Контурный уровень управления включает три ПИД-регулятора, каждый из которых отвечает за управление одним из важных параметров процесса: расходом воды, током возбуждения и плотностью слива дешламатора. ПИД-регуляторы работают по принципу минимизации ошибки между фактическим значением контролируемого параметра и заданным значением, которое формируется на оптимизационном уровне.

Оптимизационный уровень системы выполняет ключевую функцию генерации предустановленных значений для контурных регуляторов.

Уставки ПИД-регуляторов в системе управления магнитным дешламентом подбираются на основе комбинации целевой функции и математической модели, основанной на популяционном балансе. Этот подход позволяет учитывать сложные взаимодействия между частицами пульпы и их распределение [21, 22].

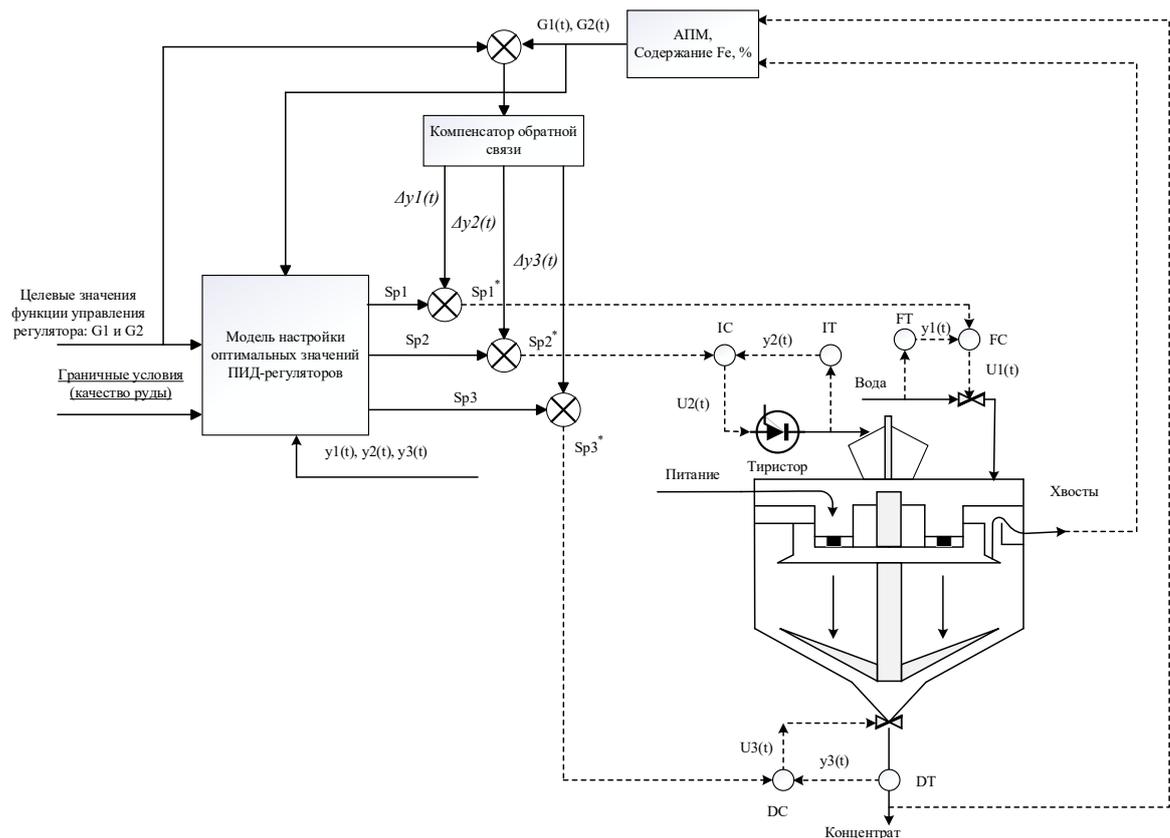


Рис. 7 – Структура системы управления модернизированным дешламентом.

Математическая модель популяционного баланса описывает динамику распределения частиц по размерам и их концентрацию в процессе обработки пульпы в дешламенте. Эта модель учитывает различные процессы, такие как агрегация частиц, разрушение агломератов, осаждение, а также влияние магнитного поля на движение частиц. Используя дифференциальные уравнения, модель предсказывает, как изменения в управляемых параметрах

(например, ток возбуждения, расход воды и плотность пульпы) повлияют на распределение частиц и, следовательно, на эффективность всего процесса.

Целевая функция, включающая такие критерии, как максимизация извлечения железа (G_1) и минимизация потерь полезного компонента (G_2) задает основные технологические цели системы. Эта функция определяет, каким образом различные параметры должны быть оптимизированы, чтобы достичь максимальной производительности и качества процесса.

Оптимальные уставки ПИД-регуляторов подбираются с использованием метода роя частиц. Результаты, полученные на основе модели популяционного баланса, используются для прогнозирования влияния изменений в уставках на ключевые показатели процесса. Эти прогнозы позволяют системе управления находить наиболее подходящие уставки для текущих условий работы дешламатора.

Результатом работы оптимизационного уровня является скорректированное предустановленное значение для каждого контурного регулятора. Эти значения передаются на контурный уровень, где ПИД-регуляторы используют их для управления процессом. Весь процесс управления является итеративным: система постоянно отслеживает фактические значения параметров процесса и, если они отклоняются от целевых значений, возвращается на оптимизационный уровень для пересмотра и корректировки установок.

Во время работы системы модель оптимизации задает предварительные уставки S_p для контуров управления расходом воды S_{p1} , возбуждающим током S_{p2} и плотностью слива S_{p3} в соответствии с целевыми значениями (G_1 и G_2), диапазоном целевых значений и граничными условиями. Затем регулятор задает компенсирующие значения $\Delta u(t)$ в зависимости от отклонения между G и $G(t)$ и соответствующим состоянием эксплуатации. Таким образом, окончательные установочные точки рассчитываются как $S_p =$

$Sp^* + \Delta y(t)$. На уровне контурного управления контроллеры расхода воды FC, возбуждающего тока IC и плотности подачи DC обеспечивают, чтобы фактические значения $y(t)$ следовали за их уставками, чтобы фактические индексы качества находились в пределах целевых диапазонов [23].

Анализ результатов работы гибридной системы управления дешлампатором показывает, что производительность модернизированного магнитного дешлампатора с турбулизатором и интеллектуальной системой управления лучше, чем у традиционного магнитного дешлампатора МД-9. Концентрат, полученный с помощью модернизированного дешлампатора, имеет более высокое качество, что подтверждается увеличением содержания железа в концентрате в среднем на 2,2% и снижение степени извлечения хвостов на 3,7% , что свидетельствует об том, что использование интеллектуальной системы управления на основе гибридного подхода позволяет значительно улучшить процесс обогащения железной руды на этапе дешламации

Литература

1. Li Y., Zhang L., Liu X. Influence of Pulp Temperature on the Separation Efficiency of Iron Ore Concentrates // Minerals Engineering, 2020, Vol. 145, P. 106131. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106131.
 2. Zhao H., Ma Y., Wang R. Effect of Pulp Temperature on Flotation Performance and Recovery of Fine Iron Particles // International Journal of Mineral Processing, 2019, Vol. 186, P. 44–51. DOI: 10.1016/j.minpro.2018.12.013.
 3. Chen W., Xu Z., Wu D. Temperature-Induced Changes in Pulp Viscosity and Their Impact on Magnetic Separation // Journal of Applied Mineralogy, 2021, Vol. 31, № 3. – pp. 245–251. DOI: 10.1007/s40789-021-00445-5.
 4. Kuznetsov V. A., Petrov A. S., Ivanova M. V. Improving the Efficiency of Magnetic Desliming of Iron Ore Concentrates // Russian Journal of
-



Non-Ferrous Metals, 2020, Vol. 61, № 2, P. 105–112. DOI: 10.3103/S1067821220020076.

5. Sal'nikova T.V., Duplinskaya M.V., Yushkova I.S. // XXI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «Sovremennyy'e texnika i tehnologii», 2017, Tomsk: Tomskij politexnicheskij universitet. – pp. 69–71.

6. Wang S., Li J., Zhao X. Optimization of Magnetic Desliming Process for Iron Ore Beneficiation // Minerals Engineering, 2018, Vol. 124, pp. 135–142. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.05.012.

7. Morozov V. V., Korablev S. N., Zolotarev A. M. Advances in Magnetic Desliming Technology for Iron Ore Processing // Journal of Mining Science, 2019, Vol. 55, № 4, pp. 678–685. DOI: 10.1134/S1062739119040102.

8. Burris-Mog T., Burns M., Chavez A., Schillig J. Analysis of an adjustable field permanent magnet solenoid // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 2017, № 868. – P. 66–72. DOI: 10.1016/j.nima.2017.06.013.

9. Жаутиков Б. А., Айкеева А. А., Маханов К. М., Жаутиков Ф. Б., Роговая К. С., Мухтарова П. А., Телман Е. М. Исследование магнитных параметров электромагнитной подъемной установки с помощью пакета прикладных программ ANSYS Maxwell // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2017, № 1 (37), С. 84–94.

10. Dubitsky V. V., Pavlov A. V., Borovkov V. A., et al. Complex approach to magnetic separator design // Physics of Metals and Metallography, 2015, Vol. 116, № 9, pp. 891–900. DOI: 10.7868/S0207352815020092.

11. Zhautikov B. A., Aykeeva A. A., Makhanov K. M., et al. Research of magnetic parameters of electromagnetic lifting installation with the software package ANSYS Maxwell // Caspian Journal: Control and High Technologies, 2017, Vol. 1 (37), pp. 84–94.

12. Андреева Е. Г., Демин А. В., Семина И. А. Моделирование концентратора магнитного поля в комплексе программ ANSYS Maxwell //

Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2015, № 4, С. 12–16.

13. Клявлин А. Современные методы моделирования электромагнитного поля // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2011, № 1, С. 52–55.

14. Семина И. А. Имитационное моделирование трехмерной модели магнитной системы открытого типа в комплексе программ ANSYS // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2014, № 1, С. 32–36.

15. Zheng Y., Zhou Z., Dai R. Simulation and optimisation design of the solenoid valve // The Journal of Engineering, 2019, № 23, P. 8701–8705. DOI: 10.1049/joe.2018.9087.

16. Зеленова И. М. Флокуляция магнетита с целью повышения качества железорудных концентратов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2009, С. 386–395.

17. Абасова М. М., Антонов Е. А. Моделирование электромагнитного поля и анализ характеристик электродвигателя // Сборник научных статей Всероссийской конференции, 2023, Т. 2, С. 176–181. DOI: 10.47581/2023/FM-02/Abasova.01.

18. Morkun V. The Cyber-Physical System for Increasing the Efficiency of the Iron Ore Enrichment / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak, S.O. Semerikov, O. Serdiuk, I. Gaponenko I. // Information Systems Frontiers, 2023, pp. 1-11. DOI: 10.31896/ore.enrichment.2023.

19. Zhu Z., Cui Z., Lu W. Novel Control Strategies for Improving Efficiency of Magnetic Separators // Journal of Mining and Metallurgy, 2018, Vol. 54, № 2, P. 121–128. DOI: 10.2298/JMMG1802121Z.

20. Lungu M., Marin C. A., Popescu D. Advanced Control Systems for Magnetic Desliming Units: A Review // IEEE Transactions on Industry

Applications, 2020, Vol. 56, № 4, pp. 4334–4345. DOI: 10.1109/TIA.2020.2990405.

21. Khan S., Ahmed T., Zaman K. Automation and Control of Magnetic Separation Processes: An Overview // Separation and Purification Technology, 2021, Vol. 260, P. 118186. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.118186.

22. Petrov N., Ivanov M. Magnetohydrodynamic Applications in Mineral Processing // Minerals Engineering, 2021, Vol. 170, P. 107013. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107013.

23. Fernandez P., Sanchez R. Intelligent Systems for Optimizing Magnetic Desliming Operations // Expert Systems with Applications, 2022, Vol. 194, P. 116517. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.116517.

References

1. Li Y., Zhang L., Liu X. Minerals Engineering, 2020, Vol. 145, p. 106131. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106131.

2. Zhao H., Ma Y., Wang R. International Journal of Mineral Processing, 2019, Vol. 186, P. 44–51. DOI: 10.1016/j.minpro.2018.12.013.

3. Chen W., Xu Z., Wu D. Journal of Applied Mineralogy, 2021, Vol. 31, № 3. – P. 245–251. DOI: 10.1007/s40789-021-00445-5.

4. Kuznetsov V. A., Petrov A. S., Ivanova M. V. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2020, Vol. 61, № 2, pp. 105–112. DOI: 10.3103/S1067821220020076.

5. Salnikova T. V., Duplinskaya M. V., Yushkova I. S. XXI International Scientific Conference "Modern Equipment and Technology", 2017, Tomsk: Tomsk Polytechnic University, pp. 69–71.

6. Wang S., Li J., Zhao X. Minerals Engineering, 2018, Vol. 124, p. 135–142. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.05.012.

7. Morozov V. V., Korablev S. N., Zolotarev A. M. Journal of Mining Science, 2019, Vol. 55, № 4, pp. 678–685. DOI: 10.1134/S1062739119040102.



8. Burris-Mog T., Burns M., Chavez A., Schillig J. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 2017, № 868. pp. 66–72. DOI: 10.1016/j.nima.2017.06.013.
 9. Zhautikov B. A., Ajkeeva A. A., Maxanov K. M., Zhautikov F. B., Rogovaya K. S., Muxtarova P. A., Telman E. M. Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vy`sokie texnologii, 2017, № 1 (37), pp. 84–94.
 10. Dubitsky V. V., Pavlov A. V., Borovkov V. A., et al. Physics of Metals and Metallography, 2015, Vol. 116, № 9, pp. 891–900. DOI: 10.7868/S0207352815020092.
 11. Zhautikov B. A., Aykeeva A. A., Makhanov K. M., et al. Caspian Journal: Control and High Technologies, 2017, Vol. 1 (37), pp. 84–94.
 12. Andreeva E. G., Demin A. V., Semina I. A. E`lektrotexnicheskie i informacionny`e komplekсы` i sistemy`, 2015, № 4, pp. 12–16.
 13. Klyavlin A. E`lektrotexnicheskie i informacionny`e komplekсы` i sistemy`, 2011, № 1, pp. 52–55.
 14. Semina I. A. E`lektrotexnicheskie i informacionny`e komplekсы` i sistemy`, 2014, № 1, pp. 32–36.
 15. Zheng Y., Zhou Z., Dai R. The Journal of Engineering, 2019, № 23, pp. 8701–8705. DOI: 10.1049/joe.2018.9087.
 16. Zelenova I. M. Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vy`sokie texnologii, 2009, pp. 386–395.
 17. Abasova M. M., Antonov E. A. Sbornik nauchny`x statej Vserossijskoj konferencii, 2023, T. 2, pp. 176–181. DOI: 10.47581/2023/FM-02/Abasova.01.
 18. V. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A., Semerikov S.O., Serdiuk O., Gaponenko I. Information Systems Frontiers, 2023, pp. 1-11. DOI: 10.31896/ore.enrichment.2023.
-



19. Zhu Z., Cui Z., Lu W. Journal of Mining and Metallurgy, 2018, Vol. 54, № 2, pp. 121–128. DOI: 10.2298/JMMG1802121Z.
20. Lungu M., Marin C. A., Popescu D. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, Vol. 56, № 4, pp. 4334–4345. DOI: 10.1109/TIA.2020.2990405.
21. Khan S., Ahmed T., Zaman K. Separation and Purification Technology, 2021, Vol. 260, p. 118186. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.118186.
22. Petrov N., Ivanov M. Minerals Engineering, 2021, Vol. 170, p. 107013. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107013.
23. Fernandez P., Sanchez R. Expert Systems with Applications, 2022, Vol. 194, p. 116517. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.116517.

Дата поступления: 21.02.2025

Дата публикации: 25.04 2025