

hicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, vol. 62, no. 6, pp. 2441–2452.

14. Haghbin, S., Lundmark, S., Alaküla, M., Carlson, O. Grid-Connected Integrated Battery Chargers in Vehicle Application Review and New Solution. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, vol. 60, no. 2, pp. 459–473. doi: 10.1109/TIE.2012.2187414

15. Mozaffari Niapour, S.A.Kh., Shokri Garjan, Gh., Shafiei, M., Feyzi, M.R., Danyali, S., Bahrami Kouhshahi, M. Review of Permanent-Magnet Brushless DC Motor Basic Drives Based on Analysis and Simulation Study. International Review of Electrical Engineering, 2014, vol. 9, no. 5, pp. 930–957.

Абузяров Тагир Хусаинович,
ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева», аспирант,
e-mail: atx888@yandex.ru
Abuzyarov Tagir Khusainovich,
Nizhny Novgorod State Technical University, postgraduate student, e-mail: atx888@yandex.ru

Плехов Александр Сергеевич,
ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева», кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование электропривод и автоматика», e-mail: aplehov@mail.ru
Plekhov Alexander Sergeevich,
Nizhny Novgorod State Technical University, Candidate of Engineering (PhD), associate professor, Department of Electric Equipment, Electric Drive and Automation, e-mail: aplehov@mail.ru

Дарьенков Андрей Борисович,
ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева», кандидат технических наук, директор Института электроэнергетики, телефон (831) 436-93-79, e-mail: darenkov@nntu.ru
Daryenkov Andrey Borisovich,
Nizhny Novgorod State Technical University, Candidate of Engineering (PhD), Director of the Institute of Electric Power Engineering, telephone (831) 436-93-79, e-mail: darenkov@nntu.ru

Ермолаев Артем Игоревич,
ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева», аспирант,
e-mail: acidwolfvx@rambler.ru
Ermolaev Artem Igorevich,
Nizhny Novgorod State Technical University, postgraduate student, e-mail: acidwolfvx@rambler.ru

УДК 621.313

РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО СЕПАРАТОРА НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.А. ФИЛИППОВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: 9basy9@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса. Магнитожидкостная сепарация является перспективным направлением в сфере утилизации и вторичного использования немагнитных материалов. Производительность и точность разделения являются важными характеристиками любого сепаратора. Предлагаемые на данный момент методы расчета производительности имеют ряд допущений, которые могут существенно сказаться на результате (постоянная магнитная проницаемость магнитной жидкости, линейное изменение напряженности по высоте зазора и пр.) и применимы лишь для конкретных моделей сепараторов. Целью исследования является разработка методики расчета производительности электромагнитного магнитожидкостного сепаратора немагнитных материалов с учетом распределения магнитного поля в зазоре и влияния гидродинамических свойств магнитной жидкости на движение частиц в зоне разделения.

Материалы и методы. Используются численные методы решения систем уравнений движения, полученных на основании фундаментальных законов Ньютона, и разработанные программы для расчета траекторий частиц в зоне разделения магнитожидкостного сепаратора. При этом для упрощения расчета частицы принимаются сферическими и при их движении не создается вихрей в магнитной жидкости. Система решается итерационно: на каждом шаге вычисляется изменение величин, которое суммируется с результатом предыдущей итерации.

Результаты. Разработана методика расчета производительности электромагнитного магнитожидкостного сепаратора немагнитных материалов с учетом распределения магнитного поля в зазоре и влияния гидродинамических свойств магнитной жидкости на движение частиц в зоне разделения. Получены траектории частиц в зоне разделения, которые позволяют проанализировать процесс сепарации проектируемого сепаратора.

Выводы. Предложенный подход позволяет рассчитать массовую и объемную производительности магнитожидкостного сепаратора, зависимости производительностей как для каждой фракции отдельно, так и суммарной от различных параметров сепаратора (например, от угла наклона полюсных наконечников). Полученные результаты могут быть использованы для оценки оптимальности принятых параметров при проектировании магнитожидкостного сепаратора. Также полученные результаты помогут оптимизировать уже находящиеся в работе установки.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитожидкостный сепаратор, уравнение движения частицы, производительность магнитожидкостного сепаратора, немагнитные материалы

CALCULATION OF THE PERFORMANCE OF ELECTROMAGNETIC MAGNETIC LIQUID SEPARATOR OF NON-MAGNETIC MATERIALS

V.A. FILIPPOV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: 9basy9@gmail.com

Abstract

Background. Magnetic-liquid separation is a promising area in the field of disposal and recycling of non-magnetic materials. The performance and separation accuracy are important features of any separator. The methods for performance calculation offered at the present moment have a number of assumptions that can significantly affect the result (constant magnetic permeability of the magnetic fluid, linear change in tension along the height of the gap, etc.), and are applicable only to specific models of separators. The aim of this study is to develop a methodology for calculating the performance of an electromagnetic magnetic liquid separator of non-magnetic materials taking into account the distribution of the magnetic field in the gap and the influence of the hydrodynamic properties of the magnetic fluid on the movement of particles in the separation zone.

Materials and methods. Numerical methods are used to solve systems of equations of motion which are obtained on the basis of Newton's fundamental laws and the developed programs for calculating particle trajectories in the separation zone of a magnetic liquid separator are applied. To simplify the calculation, the particles are assumed to be spherical and, when they move, vortices in the magnetic fluid are not created. The system is solved iteratively: at each step, the change in values is calculated and is summed up with the result of the previous iteration.

Results. A technique has been developed for calculating the performance of an electromagnetic magnetic liquid separator of non-magnetic materials considering the distribution of the magnetic field in the gap and the influence of the hydrodynamic properties of the magnetic fluid on the particle movement in the separation zone. Particle trajectories in the separation zone are obtained, which allows one to analyze the separation process of the separator under development.

Conclusions. The proposed approach allows calculating the mass and volumetric capacities of the magnetic liquid separator, the dependences of the capacities for each fraction separately and the total on various parameters of the separator (for example, on the angle of inclination of the pole pieces). The obtained results can be used to assess the optimality of the adopted parameters when designing a magnetic liquid separator. Also, the results obtained will help optimize the installations already in operation.

Key words: magnetic fluid, liquid magnetic separator, particle motion, magnetic liquid separator capacity

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.1.045-052

Введение. С каждым годом объемы электронных отходов в мире увеличиваются, и в 2016 году их было произведено более 40 млн т. В будущем ситуация будет только ухудшаться: предполагается, что в начале следующего десятилетия в мире за год будет выбрасываться не менее 50 млн т электронного мусора, представляющего угрозу для человеческого здоровья и окружающей среды¹.

Непригодные для дальнейшего использования приборы и материалы могут содержать ценные природные ископаемые, такие как золото, серебро, медь, платина и др. Их грамотная переработка может обеспечить: снижение загрязнения окружающей среды, сохранение природных ресурсов и возвращение в производство цветных, драгоценных металлов и других материалов. Так, например, в россыпных месторождениях содержание золота составляет до 0,1–0,5 г/т руды, в коренных рудах 1–5 г/т, а во вторичном сырье содержание золота достигает 100 г/т и даже 100 кг/т. Доля благородных металлов, которые удается получить из вторичного сырья, достигает 20–50 %. Так, в 2016 г. стоимость подобных материалов, не извлеченных из выброшенной электроники, составила 55 млрд долл. [1].

При вторичной переработке производительность технологической схемы в целом определяется производительностью каждого этапа. Производительность магнитожидкостной сепарации определяет мощность предшествующих установок по измельчению, магнитной сепарации и необходимую производительность последующих операций [2, 3].

Несмотря на это, зачастую вопрос производительности решается эмпирическими исследованиями уже созданного устройства. Так, в [4] приведены зависимости эффективности сепарации от производительности экспериментальной установки (рис. 1).

Эффективность сепарации оценивается по критерию Землянского:

$$E_3 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 100,$$

где ε_1 – извлечение легких фракций в хвосты, %; ε_2 – извлечение тяжелых фракций в концентрат, %.

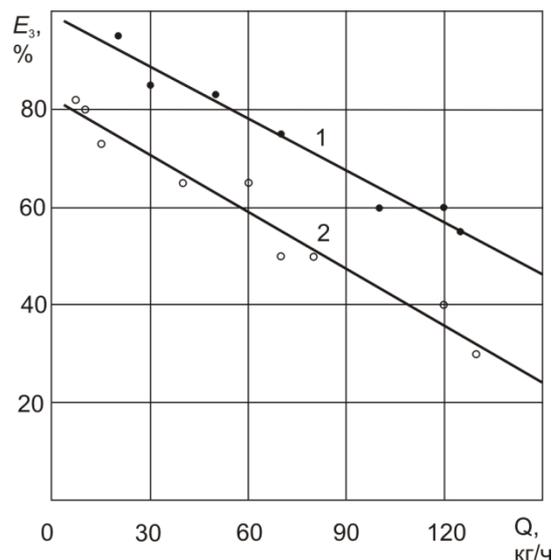


Рис. 1. Зависимости эффективности сепарации по критерию Землянского (E_3) от производительности: 1 – подача материала по всей длине слоя магнитной жидкости; 2 – подача материала в начало слоя магнитной жидкости [4]

В [5] рассматривается вопрос производительности магнитожидкостного сепаратора с полюсами, расходящимися в горизонтальной плоскости (рис. 2). Такая конструкция обеспечивает дополнительную силу, которая помогает продвигаться легкой фракции в горизонтальном направлении.

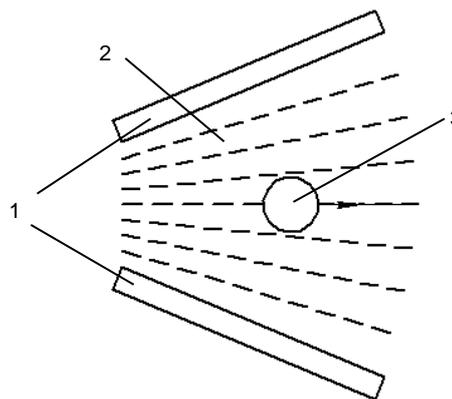


Рис. 2. Магнитожидкостный сепаратор с расходящимися полюсами: 1 – полюсные накопечники; 2 – магнитная жидкость; 3 – немагнитное тело

Для расчета производительности сепаратора применяются приведенные ниже выражения:

¹ Глобальный мониторинг электронных отходов, 2017 год / К.П. Балде, В. Форти, В. Грей и др.; Университет Организации Объединенных Наций (УООН), Международный союз электросвязи (МСЭ) и Международная ассоциация по твердым отходам (МАТО), Бонн/Женева/Вена.

• конечная скорость движения немагнитной частицы в горизонтальном направлении

$$v_{kx} = k_3 \sqrt{\frac{d}{\rho_{kx}} \left(\mu_0 \chi H \frac{\partial H}{\partial x} + \rho_4 g \sin \alpha \right)},$$

где k_3 – эмпирический коэффициент; d – диаметр частицы; ρ_{kx} – горизонтальная составляющая квазиплотности магнитной жидкости; χ – магнитная восприимчивость магнитной жидкости;

• конечная скорость движения немагнитной частицы в вертикальном направлении

$$v_{ky} = k_1 k_2 \sqrt{d \frac{\rho_4 - \rho_{ky}}{\rho_{ky}}},$$

где k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты; ρ_{ky} – вертикальная составляющая квазиплотности магнитной жидкости; ρ_4 – плотность частицы;

• необходимая длина зоны разделения

$$L = k_4 h \sqrt{\frac{\rho_{ky} \mu_0 \chi H \frac{\partial H}{\partial x} + \rho_4 g \sin \alpha}{(\rho_4 - \rho_{ky}) \rho_{kx}}},$$

где k_4 – эмпирический коэффициент;

• производительность сепаратора

$$Q = \rho \Delta h \theta b v_k / \beta,$$

где Δh – толщина слоя перемещаемого материала; θ – степень разрыхления фракции; b – рабочая ширина канала сепаратора; β – доля легкой фракции в исходном сырье.

Приведенные выше методы определения производительности подходят исключительно для конкретных типов магнитожидкостных сепараторов и включают в себя ряд эмпирических коэффициентов, что делает затруднительным их использование при разработке новых устройств. При этом применяется ряд допущений, которые могут сказаться на точности определения этого параметра.

Использование численного моделирования физических полей для расчета производительности магнитожидкостных сепараторов может дать более высокую точность и возможность применения новой методики при проектировании новых устройств.

Методы исследования. Для расчета траектории частицы при движении в рабочем зазоре МЖС была принята следующая

модель. На немагнитную частицу с плотностью ρ и объемом V в магнитной жидкости с плотностью $\rho_{ж}$ и намагниченностью M действуют четыре силы (рис. 3):

• сила тяжести $\bar{F}_T = \rho \bar{g} V$;

• сила Архимеда $\bar{F}_A = -\rho_{ж} \bar{g} V$;

• выталкивающая сила со стороны МЖ

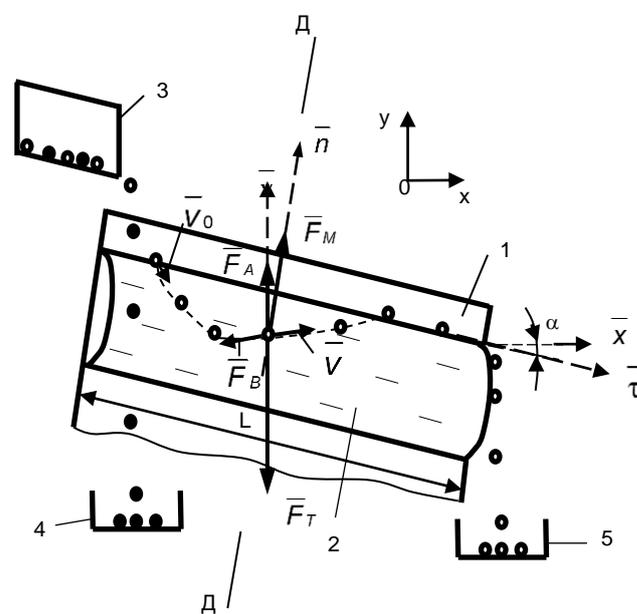
$$\bar{F}_M = -\mu_0 M \nabla H V, \quad (1)$$

где ∇H – градиент напряженности магнитного поля;

• сила сопротивления \bar{F}_B , обусловленная вязкостью МЖ, определяемая формулой Стокса

$$\bar{F}_B = -3\pi \eta d \bar{v}, \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость МЖ; \bar{v} – скорость движения частицы.



Сечение Д-Д

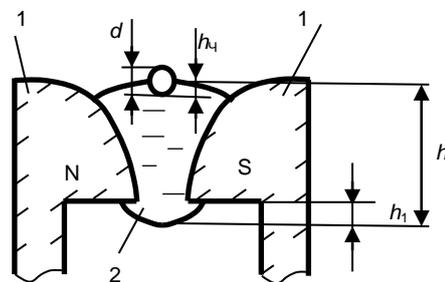


Рис. 3. Движение немагнитных частиц в магнитожидкостном сепараторе: 1 – полюсные наконечники, образующие рабочий зазор; 2 – магнитная жидкость; 3 – устройство подачи немагнитных частиц; 4 – контейнер для тяжелых частиц; 5 – контейнер для легких частиц

Уравнение движения частицы может быть получено на основании второго закона Ньютона

$$\bar{F}_T + \bar{F}_A + \bar{F}_M + \bar{F}_B = m \frac{d\bar{v}}{dt}, \quad (3)$$

где $m = \rho V$ – масса частицы.

Будем считать, что частицы сферические, имеют диаметр d . После подстановки всех величин в формулу Ньютона уравнение движения немагнитной частицы в рабочем зазоре МЖС будет иметь вид

$$\rho V \frac{d\bar{v}}{dt} + 3\pi \eta d \bar{v} + [-\mu_0 M |\nabla H| V + (\rho - \rho_{ж}) g V] = 0. \quad (4)$$

Примем следующие допущения:

– МЖ имеет линейную реологическую характеристику и постоянную динамическую вязкость ($\eta = \text{const}$);

– рабочий зазор МЖС спроектирован правильно, в результате чего третье слагаемое в левой части уравнения (4) постоянно (оно представляет собой результирующую силу, которая действует на частицу в статике).

Уравнение (4) запишем в виде

$$a \frac{d\bar{v}}{dt} + b\bar{v} + c = 0, \quad (5)$$

где a, b, c – постоянные величины, не зависящие от величины скорости.

В проекциях на оси уравнение (4) имеет вид:

$$\begin{aligned} & \rho g V (-\bar{e}_y) - \rho_{ж} g V (-\bar{e}_y) - \mu_0 M \times \\ & \times [|\nabla H| \sin \alpha (-\bar{e}_x) + |\nabla H| \cos \alpha (-\bar{e}_y)] V - \\ & - 3\pi \eta d (v_x \bar{e}_x + v_y \bar{e}_y) = \rho V \frac{d}{dt} (v_x \bar{e}_x + v_y \bar{e}_y); \\ & \rho V \frac{dv_x}{dt} + 3\pi \eta d v_x - \mu_0 M |\nabla H| \sin \alpha V = 0; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \rho V \frac{dv_y}{dt} + 3\pi \eta d v_y + \\ & + [-\mu_0 M |\nabla H| \cos \alpha + (\rho - \rho_{ж}) g] V = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

В результате интегрирования уравнений (6) и (7) получим выражения для скорости движения частицы по осям:

$$v_x = \left(v_{0x} + \frac{c_x}{b} \right) e^{-\frac{bt}{a}} - \frac{c_x}{b}; \quad (8)$$

$$v_y = \left(v_{0y} + \frac{c_y}{b} \right) e^{-\frac{bt}{a}} - \frac{c_y}{b}, \quad (9)$$

где $a = \rho V$; $b = 3\pi \eta d k_b$;

$$c_y = k_c (-\mu_0 M |\nabla H| V \cos \alpha - \rho_{ж} g V) + \rho g V;$$

$$c_x = -k_c \mu_0 M |\nabla H| V \sin \alpha,$$

где k_b, k_c – коэффициенты, учитывающие степень погружения частицы в МЖ:

$$k_b = \frac{S_n}{S} = \frac{h_c}{d}, \quad k_c = \frac{V_n}{V} = \frac{6(d \frac{h_c^2}{2} - \frac{h_c^3}{3})}{d^3}, \quad (10)$$

где h_c – высота погруженной части частицы; d – ее диаметр.

В компьютерной программе для расчета траектории движения частицы задаются следующие параметры:

- плотность частицы ρ ;
- плотность жидкости $\rho_{ж}$;
- угол наклона полюсов (поверхности магнитной жидкости) α ;
- длина активной части полюсов L ;
- высота столба магнитной жидкости h ;
- высота расположения минимального рабочего зазора относительно нижней поверхности магнитной жидкости h_1 (граница смены направления магнитной силы F_M);
- кривая намагничивания магнитной жидкости;
- величина динамической вязкости МЖ η ;
- диаметр частицы d ;
- начальное положение частицы X_0, Y_0 ;
- проекции вектора начальной скорости v_{0x}, v_{0y} .

При расчете траектории по известным координатам на предыдущей итерации определяется, находится ли частица в магнитной жидкости. Если не находится, то определяется изменение скорости при действии только силы тяжести. Если же частица находится в МЖ, то определяется степень ее погружения в МЖ, коэффициенты k_b и k_c по (10), рассчитывается скорость по приведенным выше формулам (8), (9). По известным скоростям определяется изменение координат частицы на рассматриваемом шаге изменения времени. Координаты записываются в массив и в итоге отображаются на графиках (рис. 4, 5) [6].

Производительность сепаратора при движении разделяемого материала монослоем можно рассчитать по следующей формуле:

$$Q = \rho d b v / k,$$

где d – средний диаметр частицы разделяемого материала; b – ширина слоя разделяемого материала; v – средняя скорость движения разделяемой смеси по направлению к разгрузочному устройству; k – коэффициент заполнения материала [7].

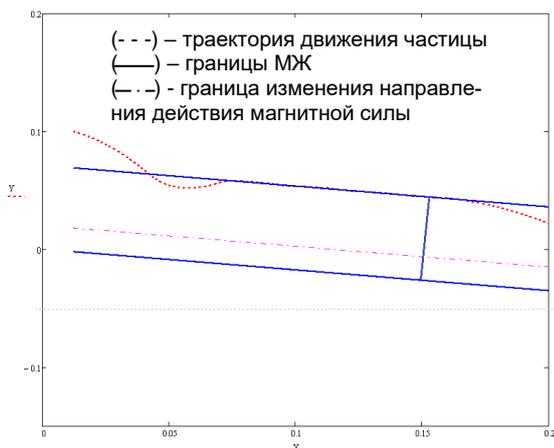


Рис. 4. Расчетное значение траектории движения алюминиевой частицы диаметром 5,6 мм при угле наклона полюсов 10°

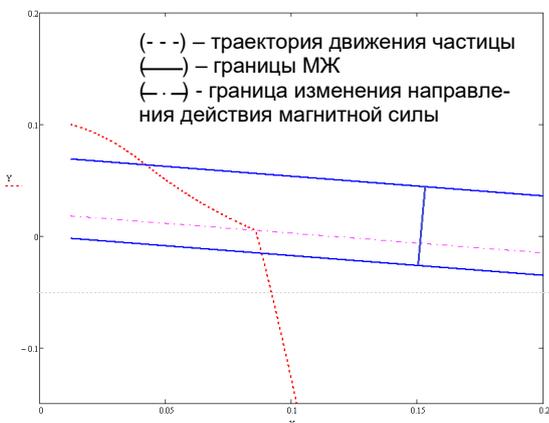


Рис. 5. Расчетное значение траектории движения медной частицы диаметром 4,9 мм при угле наклона полюсов 10°

Так как движение сепарируемой смеси в магнитожидкостном сепараторе происходит в двух направлениях: в горизонтальной плоскости для легкой фракции и в вертикальной для тяжелой, то следует рассматривать две производительности – по легкой и тяжелой фракциям.

Таким образом, производительность рассчитывается следующим образом:

- для легкой фракции

$$Q_{\text{л}} = \rho_{\text{л}} d_{\text{л}} b v_{\text{хср}} / k_{\text{л}};$$

- для тяжелой фракции

$$Q_{\text{т}} = \rho_{\text{т}} d_{\text{т}} \delta v_{\text{уср}} / k_{\text{т}},$$

где $d_{\text{л}}$ и $d_{\text{т}}$ – диаметры легкой и тяжелой частиц соответственно; b – длина дуги верхней поверхности магнитной жидкости; δ – величина минимального зазора магнитожидкостного сепаратора (рис. 6); $v_{\text{хср}}$ и $v_{\text{уср}}$ – средние скорости движения по соот-

ветствующим осям; $k_{\text{л}}$ и $k_{\text{т}}$ – коэффициенты заполнения легкой и тяжелой фракций соответственно [4, 5].

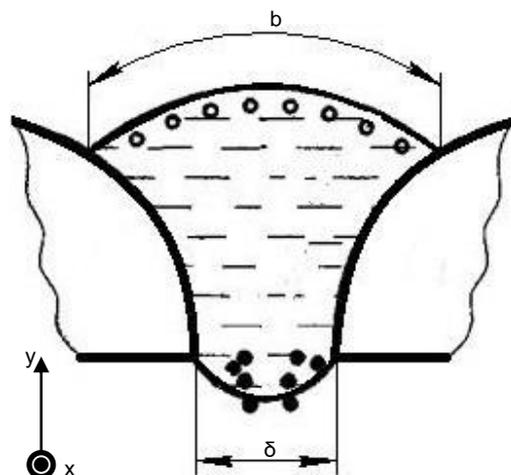


Рис. 6. Зазор магнитожидкостного сепаратора

Для получения объемной производительности необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$Q_{\text{V}} = Q / \rho,$$

где ρ – плотность соответствующей фракции.

При использовании описанной выше модели могут быть получены скорости движения частиц в зоне разделения сепаратора.

Так как скорость частицы при ее движении в зоне разделения не является постоянной, необходимо рассчитать среднюю скорость:

$$v_{\text{ср}} = \frac{\int_0^T v dt}{T},$$

где T – время движения в зоне разделения.

Численно средняя скорость определяется как

$$v_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \Delta t}{T},$$

где v_i – скорость на i -й итерации; N – номер итерации, на которой происходит выход частицы из зоны разделения.

Если $T = N \cdot \Delta t$, то

$$v_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N}.$$

Результаты исследования. В качестве примера были рассчитаны производительности магнитожидкостного сепаратора при разных углах наклона полюсных наконечников. Для расчета были приняты следующие параметры магнитной жидкости: вязкость 7,5 Па·с; плотность 1,15 г/см³;

намагниченность насыщения 25 кА/м [8]. Разделяемая смесь двухкомпонентная с частицами диаметром 1,5 мм и плотностями 7,26 г/см³ (олово) и 2,7 г/см³ (алюминий) для тяжелой и легкой фракций соответственно. Параметры сепаратора соответствуют лабораторной установке: длина зоны разделения 15 см; высота зоны разделения 7 см; длина дуги верхней поверхно-

сти магнитной жидкости 2,5 см; минимальный зазор 1 см.

В результате расчета получены скорости движения и время нахождения на каждом участке, на основании которых вычислены зависимости массовой (рис. 1) и объемной (рис. 2) производительностей от угла наклона полюсных наконечников (результаты расчетов сведены в таблицу).

Зависимости массовой и объемной производительностей магнитожидкостного сепаратора от угла наклона полюсов

α , град	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Q_T , кг/ч	75,48	76,98	78,74	80,79	83,15	85,86	88,94	92,21	–	–
Q_L , кг/ч	–	7,86	17,85	31,12	42,09	48,91	53,3	55,5	55,83	55,95
Q_{Σ} , кг/ч	75,48	84,84	96,59	111,91	125,24	134,77	142,24	147,71	55,83	55,95
Q_{VT} , л/ч	10,40	10,60	10,85	11,13	11,45	11,83	12,25	12,70	0,00	0,00
Q_{VL} , л/ч	0,00	2,91	6,61	11,53	15,59	18,11	19,74	20,56	20,68	20,72
$Q_{V\Sigma}$, л/ч	10,40	13,51	17,46	22,65	27,04	29,94	31,99	33,26	20,68	20,72

Выводы. В отличие от известных методов, разработанная методика использует полную картину распределения поля в зазоре, при расчете производительности используются мгновенные значения скоростей движения частиц, что, несомненно, увеличивает точность расчета. Также разработанную методику можно применять к различным типам магнитожидкостных сепараторов.

Полученные зависимости позволяют подобрать оптимальные параметры магнитожидкостного сепаратора для обеспечения максимальной производительности и энергоэффективности процесса разделения, помогают оценить адекватность некоторых параметров магнитожидкостного сепаратора. Анализ графиков (рис. 7, 8) показывает, что при угле наклона полюсных наконечников более 40 град тяжелая фракция начинает попадать в легкую и такое положение полюсов является недопустимым.

Таким образом, используя разработанную на основе этого алгоритма программу [9], можно спроектировать магнитожидкостный сепаратор, максимально отвечающий требованиям процесса разделения при переработке вторичных материалов.

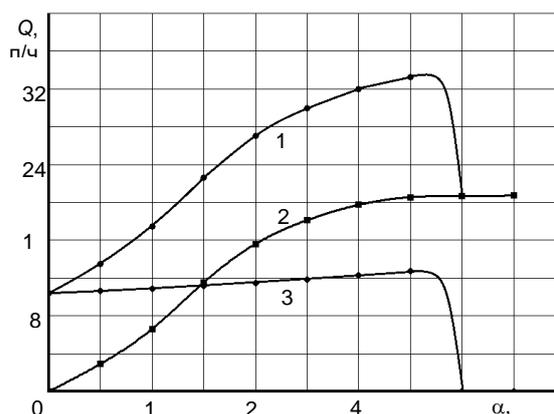


Рис. 7. Зависимость производительности магнитожидкостного сепаратора от угла наклона полюсов: 1 – суммарная; 2 – по тяжелой фракции; 3 – по легкой фракции

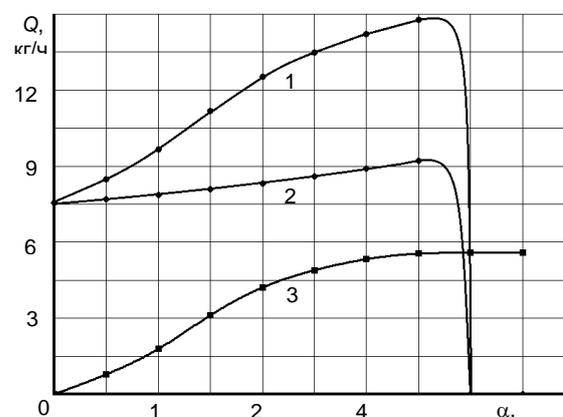


Рис. 8. Зависимость объемной производительности магнитожидкостного сепаратора от угла наклона полюсов: 1 – суммарная; 2 – по легкой фракции; 3 – по тяжелой фракции

Список литературы

1. Баркан М., Чиненкова М. Технология извлечения драгоценных металлов из отходов электротехники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.waste.ru/module/s/section/item.php?itemid=233>

2. Извлечение цветных и благородных металлов из электронного лома: экономические показатели и стратегия ценообразования / Л.С. Стрижко, Ю.Ю. Костюхин, Г.В. Кружкова, Е.А. Иванова // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2013. – № 3. – С. 28–33.

3. Теляков А.Н., Иконин Л.В. Результаты испытания технологии переработки радиоэлектронного лома // Записки Горного института. – 2006. – Т. 169. – С. 193–195.

4. Гуляихин Е.В., Солоденко А.Б. Бочкарев Г.Р. Сепарация минерального сырья в псевдоутяжеленных средах. – Новосибирск: Наука, 1984. – 140 с.

5. Кравченко Н.Д., Карамзин В.И. Магнитная сепарация отходов цветных металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 129 с.

6. Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. Математическая модель движения немагнитных частиц в рабочем зазоре гидростатического магнитоэжекторного сепаратора // XVII Междунар. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. Плес, сентябрь 2016. – Иваново, 2016. – С. 178–186.

7. Пелевин А.Е. Магнитные и электрические методы обогащения. Магнитные методы обогащения: учебник; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 296 с.

8. Колчанов Н.В., Колесниченко Е.В. Вязкость магнитных коллоидных жидкостей при различных температурах и объемных долях твердых частиц // Вестник Пермского университета. Физика. – 2017. – № 4(38). – С. 37–45. doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-37-44

9. Свид. 2019616505 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Расчет траекторий немагнитных частиц в зоне разделения магнитоэжекторного сепаратора / В.А. Филиппов; правообладатель ФГБОУВО ИГЭУ № 2019615527 заявл. 15.05.2019 г.; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 23.05.2019 г.

References

1. Barkan, M., Chinenkova, M. *Tekhnologiya izvlecheniya dragotsennykh metallov iz otkhodov elektrotekhniki* [Technology of the extraction of precious metals from electrical engineering waste].

Available at: <http://www.waste.ru/module/s/section/item.php?itemid=233>

2. Kazakov, Yu.B., Stradomskiy, Yu.I., Filipov, V.A. *Matematicheskaya model' dvizheniya nemagnitnykh chastits v rabochem zazore gidrostaticheskogo magnitozhdkostnogo separatora* [A mathematical model of non-magnetic particles motion in the working gap of a hydrostatic liquid magnetic separator]. *Sbornik nauchnykh trudov XVII Mezhdunarodnoy Plessoy nauchnoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam. Ples, sentyabr' 2016* [XVII International Scientific Conference on nanodispersed magnetic fluids: Conference Proceedings, Ples, September 2016]. Ivanovo, 2016, pp. 178–186.

3. Kolchanov, N.V., Kolesnichenko, E.V. *Vyazkost' magnitnykh kolloidnykh zhidkostey pri razlichnykh temperaturakh i ob'emnykh dolyakh tverdykh chastits* [Viscosity of magnetic colloidal liquids at various temperatures and with various fractions of solid particles]. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika*, 2017, no. 4(38), pp. 37–45. doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-37-44

4. Pelevin, A.E. *Magnitnye i elektricheskie metody obogashcheniya*. *Magnitnye metody obogashcheniya* [Magnetic and electrical enrichment methods. Magnetic enrichment methods: a textbook]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo UGGU, 2018. 296 p.

5. Strizhko, L.S., Kostyukhin, Yu.Yu., Kruzhkova, G.V., Ivanova, E.A. *Izvlechenie tsvetnykh i blagorodnykh metallov iz elektronnoy loma: ekonomicheskie pokazateli i strategiya tsenoobrazovaniya* [Extraction of non-ferrous and precious metals from electronic scrap: economic indicators and pricing strategy]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2013, no. 3, pp. 28–33.

6. Telyakov, A.N., Ikonin, L.V. *Rezultaty ispytaniya tekhnologii pererabotki radioelektronnoy loma* [Test results of radioelectronic scrap processing technology]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2006, vol. 169, pp. 193–195.

7. Gulyaikhin, E.V., Solodenko, A.B. *Bochka-rev, G.R. Separatsiya mineral'nogo syr'ya v psevdoutyazhelennykh sredakh* [Separation of minerals in pseudo heavy media]. *Novosibirsk: Nauka*, 1984. 140 p.

8. Kravchenko, N.D., Karamzin, V.I. *Magnitnaya separatsiya otkhodov tsvetnykh metallov* [Magnetic separation of non-ferrous metal waste]. *Moscow: Metallurgiya*, 1986. 129 p.

9. Filippov, V.A. *Raschet traektoriy nemagnitnykh chastits v zone razdeleniya magnitozhdkostnogo separatora* [Calculation of non-magnetic particle trajectories in the separation zone of magnetic separator]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM № 2019616505* [Certificate of computer program state registration no. 2019616505]. 2019.

Филиппов Василий Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», специалист по УМП 1-й категории, старший преподаватель кафедры электромеханики, телефон (4932) 26-97-06, e-mail: 9basy9@gmail.com

Filippov Vasily Alexandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Specialist in Methodology and Training Support of the 1st category, Senior Lecturer, Department of Electromechanics, telephone (4932) 26-97-06, e-mail: 9basy9@gmail.com