ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ С ФЕРРОМАГНИТНОЙ ШАРОВОЙ НАСАДКОЙ

А.Г. Овчаренко¹, М.С. Василишин²

¹Бийский технологический институт АлтГТУ, г. Бийск

²ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск

Магнитные сепараторы с применением ферромагнитной насадки, имеющими высокие градиенты магнитного поля в рабочем пространстве, находят применение для очистки пылегазовых потоков и суспензий от магнитных примесей и являются достаточно экономичными в промышленных условиях. Исследованы полупромышленные сепараторы периодического и непрерывного действия с шаровой ферромагнитной насадкой для очистки антифрикционной присадки «Деста» от магнитных примесей. Для исключения потерь времени на промывку насадки, обеспечения постоянной производительности по суспензии и качества очистки суспензий авторами разработана конструкция и предложен метод расчета основных параметров сепаратора непрерывного действия. Проведены экспериментальные исследования работы сепараторов периодического и непрерывного действия одинаковых габаритов рабочего пространства и производительностей по очищаемой суспензии, которые показали неоспоримые преимущества сепаратора непрерывного действия.

Ключевые слова: магнитный сепаратор, ферромагнитная шаровая насадка, магнитные примеси, антифрикционные присадки.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные сепараторы с применением ферромагнитной насадки, имеющими высокие градиенты магнитного поля в рабочем пространстве, находят применение для очистки пылегазовых потоков и суспензий от магнитных примесей и являются достаточно экономичными в промышленных условиях [1-4].

Для повышения эффективности магнитных сепараторов с ферромагнитной шаровой насадкой необходима постоянная работа по совершенствованию конструкций сепараторов. Важнейшим вопросом является переход от лабораторных конструкций к промышленным, для этого необходимы дополнительные исследования конструкций близких к промышленным.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Сепаратор периодического действия

Был спроектирован и изготовлен полупромышленный магнитный сепаратор периодического действия с учетом результатов расчета и экспериментов на лабораторном сепараторе по очистке антифрикционной присадки «Деста» от магнитных примесей [3]. Схема конструкции такого сепаратора представлена на рисунке 1. Сепаратор состоит из корпуса, содержащего центральную трубу с внутренним диаметром 150 мм, толщиной 1 мм, закрепленных на ней катушки 5 и магнитопровода 4, фланцев со штуцерами 1 и 8 для подачи и отвода очищаемой суспензии или промывной жидкости, а также ферромагнитной насадки в виде шаров диаметром 11,1 мм из стали ШХ 15. Для

загрузки и выгрузки шаров служат люки 3 и 7. В каждом фланце имеется решетка 2 для равномерной подачи очищаемой суспензии по сечению сепаратора. Проточная часть сепаратора выполнена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Расчетная производительность по очищаемой суспензии 500 л/час при вязкости 1 спз. Питание сепаратора осуществляется напряжением электрического тока 220 В через понижающий трансформатор и выпрямитель. Максимальная расчетная напряженность магнитного поля создаваемого катушкой равна 135 кА/м.

Рис.1. Полупромышленный электромагнитный сепаратор

Для оценки работоспособности магнитного сепаратора была произведена очистка присадки «Деста». Присадка с помощью маслососа подавалась через штуцер 8 (рис. 1) в магнитный сепаратор, проходила в зазорах между шарами 6 и

выводилась через штуцер 1. Рабочий режим магнитного сепаратора был выбран с учетом ранее проведенных лабораторных исследований по очистке присадки «Деста». Для исключения перегрева обмотки катушки был выбран щадящий режим работы, при этом напряженность магнитного поля, создаваемого катушкой, была 55,2 кА/м.

Расход подогретой до 50°C присадки был ограничен производительностью маслососа и составлял 225 л/ч. Эффект очистки определяли в зависимости от числа циклов очистки присадки.

Содержание железа в присадке оценивалось по методике АО «ФНПЦ «Алтай» «Определение железа в продуктах производства УДА».

Также была произведена оценка удельных энергозатрат при очистке «Десты» по формуле:

$$A_{yo} = \frac{I \cdot U}{3,6 \cdot 10^6 \cdot Q}, \quad (1)$$

где A_{yo} - удельная работа, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3}$; I - величина электрического тока, подаваемого на катушку, А; U - величина питающего напряжения катушки, В; Q - расход присадки, $\text{м}^3/\text{с}$.

Промывка шаров от магнитных примесей осуществлялась керосином при выключенном магнитном поле. Результаты приведены в таблице 1.

Табл. 1. Очистка присадки «Деста» на полупромышленном электромагнитном сепараторе

Число циклов очистки	I , А	U , В	H , кА/м	$Q \cdot 10^6$, $\text{м}^3/\text{с}$	V , м/с	C_o , %	C_k , %	Ψ_z , %	Ψ_r , %	$A_{уд}$, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3}$
1	10	30	55,2	62,5	$0,86 \cdot 10^{-2}$	0,10000	0,00220	97,80	98,0	1,33
2	10	30	55,2	62,5	$0,86 \cdot 10^{-2}$	0,10000	0,00205	97,95	99,9	2,66
3	10	30	55,2	62,5	$0,86 \cdot 10^{-2}$	0,10000	0,00203	97,97	100,0	3,99
4	10	30	55,2	62,5	$0,86 \cdot 10^{-2}$	0,10000	0,00195	98,05	100,0	5,32

Теоретические значения эффекта очистки получены расчетом с использованием методики для расчета магнитных сепараторов с ферромагнитной шаровой насадкой [3].

Полученные результаты по очистке антифрикционной присадки «Деста» от магнитных примесей показали высокий эффект очистки и подтвердили работоспособность такого магнитного сепаратора. Для получения высокого эффекта очистки при испытанных режимах достаточно одного цикла очистки. Различие экспериментальных Ψ_z и расчетных Ψ_r значений эффекта очистки объясняется незначительным содержанием немагнитного железа в шихте УДА.

Электромагнитный сепаратор непрерывного действия

При очистке суспензий с высоким содержанием магнитных примесей в сепараторах периодического действия одним из главных недостатков является быстрое засорение пор в магнитной насадке, и, как следствие, снижение производительности и качества очистки суспензий. Для промывки сепаратора необходимо удалять осадок при отключенном электромагните, а при высоких концентрациях магнитных примесей в суспензии время промывки насадки составляет порядка десятков минут. Частая периодическая промывка шаровой загрузки требует дополнительных устройств, нарушает непрерывный режим технологических процессов.

Известны устройства с постоянным обновлением ферромагнитной насадки при очистке потока газа от магнитных и других включений в слое твердых намагничиваемых частиц [4]. При этом за счет прикладываемого к слою магнитного поля обеспечивается соответствующая структура и пористость, причем магнитное поле ориентировано в камере коллинеарно с гравитационным полем. Магнитная насадка имеет возможность постоянного обновления за счет движения из области магнитной очистки в зону регенерации (очистки насадки от дисперсных включений) и обратно в зону электромагнитного поля.

Эти идеи были использованы авторами при разработке конструкции электромагнитного сепаратора с движением ферромагнитной насадки в рабочем пространстве, обеспечиваемым шнековым устройством, причем шнек выполнен из немагнитного материала (рис.2).

1,3 – патрубки загрузки и выгрузки ферромагнитной насадки; 2 – электромагнит; 4,7 – штуцера подачи и выхода очищаемой суспензии; 5 – шнек; 6 – ферромагнитная насадка.

Рис.2. Магнитный сепаратор непрерывного действия

Наличие транспортирования насадки при работающем электромагните позволяет создавать режим работы сепаратора при непрерывном удалении загрязненной насадки и подаче чистой. Исходная суспензия подается навстречу движущейся насадке. Такая конструкция позволяет эффективно очищать суспензии от магнитных примесей при высоком содержании последних. После отмывки ферромагнитная насадка подается в электромагнитное поле сепаратора.

Расчет магнитных сепараторов непрерывного действия с движущейся ферромагнитной насадкой несколько сложнее, чем сепараторов периодического действия [3] и требует определенных технических решений для непрерывной регенерации насадки по мере ее загрязнения.

В аппаратах непрерывного действия с движущейся насадкой навстречу очищаемой суспензии необходимо рассчитать длину работающего слоя и скорость движения насадки.

При расчете скорости движения насадки исходят из следующих соображений. В слое насадки фронт равных концентраций осаждаемого вещества перемещается вдоль слоя со скоростью u согласно [3]:

$$u = \frac{1}{K} = \frac{W \cdot c_0}{\rho_n \cdot E},$$

где K - коэффициент защитного действия слоя; $W = v \cdot \varepsilon$ - фиктивная скорость суспензии; v - скорость фильтрования суспензии в насадке, м/с; ε - порозность насадки, доли единицы; c_0 - начальная концентрация магнитных частиц в суспензии, кг/м³; E - емкость поглощения насадки; ρ_n - насыпная плотность ферромагнитной насадки, кг/м³.

Очевидно, что скорость движения насадки W_n (в м/с) в сепараторе должна быть равна скорости u (в м/с) движения фронта равных концентраций. Если насадка будет двигаться быстрее, чем фронт равных концентраций, то ее поглощающая способность (емкость поглощения) будет использоваться не полностью. А если движение насадки будет медленнее, то снизится эффективность поглощения. Принимаем, что скорость движения насадки W_n равна

$$W_n = u = \frac{c_0 \cdot W}{\rho_n \cdot E}. \quad (2)$$

Из практических соображений при расчете скорости насадки необходимо ввести коэффициент запаса поглощающей способности с учетом потери времени защитного действия для исключения проскока отделяемых частиц K_3 . Для адсорбентов в случае практических расчетов Кельцевым Н.В. в

формулу (2) был введен коэффициент $K_3 = 1.10-1.20$ [5]. Для расчетов магнитных сепараторов принимаем $K_3 = 1.20$. Окончательно скорость движения насадки в магнитном сепараторе непрерывного действия будет

$$W_n = \frac{K_3 \cdot c_0 \cdot W}{\rho_n \cdot E}. \quad (3)$$

Задаваясь временем пребывания $\mathfrak{Z}$ (в с), диаметром D сепаратора легко определить длину работающего слоя

$$L = W_n \cdot \mathfrak{Z} \quad (3)$$

и расход насадки через сепаратор Q_n (в кг/с)

$$Q_n = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot W_n \cdot \rho_n. \quad (4)$$

Наличие шнека в рабочем пространстве сепаратора позволяет поддерживать постоянную производительность по суспензии в процессе очистки при высоких концентрациях магнитных примесей путем регулирования расхода ферромагнитной насадки и при этом обеспечивать качество очистки. Проведены экспериментальные исследования по определению расхода шаров насадки и удельных энергозатрат в электромагнитном сепараторе непрерывного действия при различных напряженностях магнитного поля (рис. 3).

Рис.3. Зависимость расхода насадки Q_n и удельных энергозатрат $A_{уд}$ на транспортирование от напряженности магнитного поля H для электромагнитного фильтра

Расход насадки от напряженности магнитного поля зависит сложным образом, что объясняется влиянием магнитного поля на структуру и гидродинамику движения шаров загрузки при транспортировании шнеком. Наибольший расход шаров в экспериментах отмечен при $H = 100$ кА/м, при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля расход шаров незначительно уменьшается. Последнее объясняется повышением удерживающей

способности магнитного поля. Удельные энергозатраты на транспортирование насадки в пределах исследуемых параметров имеют минимум в области напряженности $H = 100$ кА/м.

Для разработанной конструкции с помощью меченых шаров оценена структура потока шаровой насадки в магнитном поле. Также определены средние времена пребывания при различных режимах (рис. 4).

1 – $H = 0$ кА/м, $\tau_{\text{ср}} = 99,4$ мин; 2 – $H = 55,2$ кА/м, $\tau_{\text{ср}} = 134,9$ мин;
3 – $H = 104,9$ кА/м, $\tau_{\text{ср}} = 89,9$ мин.

Рис.4. Распределение времени пребывания шаров в магнитном сепараторе τ при различных напряженностях магнитного поля H (шары ШХ15 D=11,1 мм, меченых 50 штук, всего 3779 штук)

При этом частота определялась как

$$p_i = \frac{10}{50 \cdot (\tau_{i+10} - \tau_i)} \cdot 100, \quad (5)$$

где p_i – частота появления меченых шаров, %; 50 – количество меченых шаров, штук; τ_i – время пребывания в магнитном сепараторе первого из десяти меченых шаров i – определения, мин; $\tau_{i+10} - \tau_i$ – время выхода десяти меченых шаров, мин.

Среднее время пребывания определяем

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \frac{V_c}{V_{\text{ш}}}}{G}, \quad (6)$$

где ε – порозность шаровой загрузки, доли единицы; V_c – объем рабочей камеры сепаратора, м³; $V_{\text{ш}}$ – объем одного шара загрузки, м³; G – расход шаров, штук в мин.

При частоте вращения шнека 1 об /мин и напряженности магнитного поля $H = 0$ кА/м среднее время пребывания шаров составляет 99,4 мин. Для практически используемой напряженности $H = 55,2$ кА/м при очистке «Десты» время пребывания

возрастает и составляет 134,9 минут. Гидродинамический режим шаров имеет промежуточный характер между аппаратом идеального вытеснения и идеального смешения. При увеличении напряженности магнитного поля до $H = 105$ кА/м наблюдается уменьшение среднего времени пребывания шаров и гидродинамический режим приближается к идеальному вытеснению.

Необходимо отметить основные преимущества сепаратора непрерывного действия при очистке суспензий от магнитных примесей, которые заключаются в исключении потерь времени на промывку насадки, обеспечение постоянной производительности по суспензии и качества очистки суспензий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан и испытан полупромышленный электромагнитный сепаратор периодического действия с ферромагнитной шаровой насадкой для очистки суспензий от магнитных примесей.

2. Разработан и испытан полупромышленный электромагнитный сепаратор непрерывного действия с ферромагнитной шаровой насадкой для очистки суспензий от магнитных примесей.

3. Сравнение полупромышленных электромагнитных сепараторов периодического и непрерывного действия одинаковых габаритов рабочего пространства и производительностей по очищаемой суспензии показало неоспоримые преимущества сепаратора непрерывного действия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сандуляк А.В. Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов. – М.: Химия, 1988. – 136 с.
2. Сыса П. А. Повышение селективности обогащения магнетитовых кварцитов на основе применения высокоградиентного сепаратора с низкоинтенсивным переменным магнитным полем: дис. канд. техн. наук: 25.00.13. – М., 2016. – 146 с.
3. Овчаренко А.Г. Методика расчета магнитных сепараторов с ферромагнитной шаровой насадкой для очистки суспензий от магнитных примесей / А.Г. Овчаренко, М.С. Василишин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 3. – с. 69-74.
4. Process for the removal of particulates entrained in a fluid using a magnetically stabilized fluid cross-flow contactor. U.S. Patent 4255166, 1981.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/46/43/62/98ba0e807e60e5/US4255166.pdf>
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.

Овчаренко Александр Григорьевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения и качества, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)435308, e-mail: tmk@bti.secna.ru.

Василишин Михаил Степанович – д.т.н., зав. лабораторией ИПХЭТ СО РАН, тел. (3854)435308, e-mail: tmk@bti.secna.ru.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF MAGNETIC SEPARATORS WITH FERROMAGNETIC BALL NOZZLE

A.G. Ovcharenko¹, M. S. Vasilishin²

¹*Biysk technological Institute of Altai state technical University, Biysk*

²*IPCET SB RAS, Biysk*

Abstract – Magnetic separators with the use of a ferromagnetic nozzle, having high gradients of the magnetic field in the working space, are used for cleaning dust and gas flows and suspensions from magnetic impurities and are quite economical in industrial conditions. Semi-industrial separators of periodic and continuous action with ferromagnetic ball nozzle for cleaning the antifriction additive "Desta" from magnetic impurities are studied. To eliminate the loss of time for flushing the ferromagnetic ball nozzle, to ensure constant suspension performance and the quality of cleaning suspensions, the authors have developed a design and proposed a method for calculating the main parameters of a continuous separator. Experimental studies of the operation of separators of periodic and continuous action of the same dimensions of the working space and the performance of the cleaned suspension were carried out, which showed the undeniable advantages of a continuous separator.

Keywords: magnetic separator, ferromagnetic ball nozzle, magnetic impurities, antifriction additives.

REFERENCES

1. Sandulyak A.V. Magnetic filtration purification of liquids and gases. - M.: Chemistry, 1988. - 136 p.
2. Sysa P. A. Increasing the selectivity of the enrichment of magnetite quartzites based on the use of a high-gradient separator with a low-intensity alternating magnetic field: dis. candidate of technical sciences: 25.00.13. - M., 2016. - 146 p.
3. Ovcharenko A. G. Method of calculation of magnetic separators with a ferromagnetic ball nozzle for cleaning suspensions from magnetic impurities / A. G. Ovcharenko, M. S. Vasilishin // South Siberian Scientific Bulletin. - 2021. - No. 3. - pp. 69-74.
4. Process for the removal of particulates entrained in a fluid using a magnetically stabilized fluid cross-flow contactor. U.S. Patent 4255166, 1981. <https://patentimages.storage.googleapis.com/46/43/62/98ba0e807e60e5/US4255166.pdf>
5. Kasatkin A. G. Basic processes and devices of chemical technology. - M.: Chemistry, 1973. - 752 p.

Ovcharenko Alexander Grigoryevich-Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology and Quality, Biysk Technological Institute (branch) of the FSBEI VO AltSTU, tel. (3854)435308, e-mail: tmk@bti.secna.ru.

Mikhail Stepanovich Vasilishin-Doctor of Technical Sciences, Head of the Department.laboratory of IPCET SB RAS, tel. (3854)435308, e-mail: tmk@bti.secna.ru.