МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ С ФЕРРОМАГНИТНОЙ ШАРОВОЙ НАСАДКОЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ СУСПЕНЗИЙ ОТ МАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ

А.Г. Овчаренко¹, М.С. Василишин²

¹Бийский технологический институт АлтГТУ, г. Бийск

²ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск

Для повышения эффекта очистки суспензий от магнитных частиц экономически целесообразно в промышленных условиях использовать устройства с магнитными полями невысокой напряженности, но имеющими высокие градиенты магнитного поля в рабочем пространстве. В качестве таких устройств используются магнитные сепараторы с ферромагнитной шаровой насадкой. Для расчетов за основу взята модель процесса осаждения магнитных частиц в квазисплошном поглощающем экране магнитного фильтра, при этом предполагается, что рельеф зоны захвата в окрестности точек контакта намагниченных шаров будет в виде сегментов с характерными размерами r_0 и b . Анализ такой модели позволил отметить подобие рассмотренных процессов осаждения в магнитном сепараторе процессам адсорбции и в дальнейшем использовать элементы теории процесса адсорбции для расчетов таких сепараторов. Представлена методика расчета магнитных сепараторов с ферромагнитной шаровой насадкой для очистки суспензий от магнитных примесей. Экспериментальная проверка расчетных зависимостей при очистке антифрикционной присадки «Деста» подтвердила возможность использования предложенной методики для магнитных сепараторов с ферромагнитной шаровой насадкой

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

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эффекта очистки пылегазовых потоков и суспензий от магнитных частиц экономически целесообразно в промышленных условиях использовать устройства с магнитными полями невысокой напряженности, но имеющими высокие градиенты магнитного поля в рабочем пространстве. Это достигается за счет применения различной формы ферромагнитных насадок: шаров, колец, стержней, пластин и т.п. [1-4]. При невысоких производительностях технологических сред целесообразно применение электромагнитов горшкообразного типа, имеющих катушку, у которой магнитный поток замыкается снаружи через железный корпус [1,2].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим работу магнитного сепаратора с ферромагнитной насадкой в виде шаров и электромагнитом горшкообразного типа. (рис.1).

1 – катушка; 2 – магнитопровод; 3 – шары

Рис.1. Схема магнитного сепаратора с неподвижной шаровой насадкой

Подобные конструкции находят применение для очистки аэрозвесей и суспензий от магнитных примесей.

При протекании суспензии через ферромагнитную шаровую насадку в магнитном поле на магнитную частицу действуют силы, которые определяются как

$$m \frac{d\vec{u}}{d\tau} = \vec{F}_u + \vec{F}_c + \vec{F}_m + \vec{F}_a \quad (1)$$

где $m \frac{d\vec{u}}{d\tau} = \vec{F}_u$ - инерционная сила; $\vec{F}_m$ - сила тяжести; $\vec{F}_a$ - Архимедова (выталкивающая) сила; $\vec{F}_m$ - магнитная сила; $\vec{F}_c$ - сила сопротивления.

При этом приняты допущения:

- 1) магнитные частицы шарообразные, одинакового диаметра;
- 2) при достижении стенки шара частицы не могут быть снова унесены жидкостью;
- 3) при движении частиц в жидкости их сопротивление подчиняется закону Стокса.

При очистке жидкостей для частиц менее 10...50 мкм инерционной, силой тяжести и архимедовой силами можно пренебречь в силу их малости. тогда на магнитную частицу действуют силы

$$\vec{F}_m + \vec{F}_c = 0 \quad (2)$$

Условие осаждения магнитной частицы на насадку в скалярном виде запишется

$$F_m \geq F_c,$$

В данной работе использована модель осаждения магнитных частиц в магнитном фильтре с шаровой насадкой, описанная в литературе [2]. При этом предполагается, что рельеф зоны захвата в окрестности точек контакта намагниченных шаров будет в виде сегментов с характерными размерами r_0 и b . (рис. 2). Анализ такой модели позволил получить выражения для магнитной силы и силы сопротивления при осаждении магнитной частицы в шаровой насадке фильтра [2]

$$F_m = \frac{\mu_0 \cdot \chi \cdot V_o \cdot H^2 \cdot \mu^2}{R} \cdot \frac{(\mu-1) \cdot (r_0/R)}{\left[1 + 0,5 \cdot (r_0/R)^2 \cdot (\mu-1)\right]^3},$$

$$F_c = 55 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \eta_c \cdot W_o \cdot \left(\frac{r_0}{R}\right)^2, \quad (3)$$

где μ_0 - магнитная постоянная. μ - относительная магнитная проницаемость. χ - магнитная восприимчивость осадка; H - напряженность магнитного поля V_o - объем осаждаемой частицы r_0 - радиус квазисплошного канала намагничивания (зона захвата частиц); R - радиус шара насадки; δ - диаметр осаждаемой частицы; η_c - динамическая вязкость суспензии; W_o - скорость осаждения частицы.

Рис.2. Схема зоны захвата канала намагничивания ферромагнитной шаровой насадки

В принятой модели намагниченная гранулированная насадка представляет собой квазисплошной поглощающий экран, а выражение для текущей концентрации магнитных частиц в очищаемой среде носит экспоненциальный характер:

$$\frac{c}{c_0} = \exp(-\alpha \cdot L), \quad (4)$$

где C и C_0 - текущая и начальная концентрация магнитных частиц в суспензии, соответственно; L - длина насадки; α - коэффициент поглощения.

Последнее характерно для наиболее мелких частиц порядка десятков микрометров, имеющих размеры и значения восприимчивости, различающиеся в пределах одного порядка. Тогда эффективность очистки ψ выражается в виде

$$\psi = 1 - e^{-\alpha L}, \quad (5)$$

где $\psi = \frac{c_0 - c}{c_0}$; c_0 и c - начальное и конечное содержания магнитных частиц в суспензии;

Важной характеристикой для процесса осаждения в квазисплошном поглощающем экране является коэффициент поглощения, полученный в работе [2]:

$$\alpha = \frac{A \cdot \chi \cdot H^{0,75} \cdot \delta^2}{\eta_c \cdot v \cdot d^2}, \quad (6)$$

где A - обобщенный коэффициент, для расчетов принимают $A = 0,65 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}$; H - безразмерная напряженность магнитного поля; v - скорость фильтрования суспензии в насадке, м/с; d - диаметр шаров, м.

По мере заполнения зон захвата осаждаемыми частицами происходит поочередное самоотключение ячеек и сокращение активной длины насадки L . В общем случае емкость поглощения насадки E рекомендуется определять по формуле

$$E = \frac{m_0}{m_n} = \frac{\rho_q}{\rho_m} \cdot \gamma \cdot (\alpha \cdot d)^{4/3}, \quad (7)$$

где m_0 - общая максимальная масса осажденных частиц; m_n - масса насадки; ρ_q - плотность осаждаемых частиц; ρ_m - плотность материала насадки; γ - плотность упаковки осадка, $\gamma = 0,20 \dots 0,25$,

Для определения номинального фильтроцикла - времени заполнения первого слоя ячеек - используется выражение

$$\tau_0 = \frac{2 \cdot \rho_m}{5 \cdot \rho_c} \cdot \frac{E}{c_0 \cdot \alpha \cdot v}, \quad (8)$$

где c_0 - начальная концентрация магнитных частиц; ρ_m - плотность материала шара; ρ_c - плотность суспензии.

После насыщения первых ячеек насадка продолжает эффективно работать еще определенное время при высоких показателях очистки ψ . Поэтому, время стабильной работы τ фактически превышает

время насыщения первых ячеек τ_0 (номинальный фильтроцикл) в 1,2...1,4 раза [2].

Анализ предложенной модели позволяет отметить подобие рассмотренных процессов в магнитном фильтре процессам адсорбции и дальнейшем использовать элементы теории процесса адсорбции [5] для расчета магнитных сепараторов с ферромагнитной шаровой насадкой.

Для определения времени защитного действия слоя насадки составляется материальный баланс. При этом пренебрегаем длиной работающего слоя и предполагаем, что магнитное разделение происходит мгновенно. Тогда количество поглощаемого ферромагнитной насадкой вещества M (в кг) слоем L (в м) при емкости поглощения E (в кг/кг) и площади поперечного сечения сепаратора S (в м^2) равно

$$M = \rho_n \cdot E \cdot S \cdot L, \quad (9)$$

где ρ_n - насыпная плотность ферромагнитной насадки, кг/м^3 .

Это же количество магнитных частиц, выделенных из суспензии, проходящей через слой со скоростью W (в м/с) за время τ (в с) выражается:

$$M = W \cdot S \cdot c_0 \cdot \tau, \quad (10)$$

где $W = v \cdot \varepsilon$ - 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/м^3 .

Приравняв правые части (9) и (10), находим время защитного действия слоя

$$\tau = \frac{\rho_n \cdot E \cdot L}{W \cdot c_0} = K \cdot L, \quad (11)$$

где K - коэффициент защитного действия слоя, с/м. Для магнитных сепараторов время защитного действия будем определять как $\tau = 1,3 \cdot \tau_0$ с учетом (8). Скорость продвижения фронта равных концентраций u в слое насадки можно посчитать как

$$u = \frac{1}{K} = \frac{W \cdot c_0}{\rho_n \cdot E}. \quad (12)$$

Для магнитных сепараторов с насадкой периодического действия продолжительность цикла работы состоит из продолжительности магнитного разделения (поглощения) и вспомогательных операций (промывка насадки, удаление растворителя и т.п.). При этом для обеспечения непрерывной работы длительность основной операции должна быть больше длительности вспомогательных операций, если используется два магнитных сепаратора. При большем числе сепараторов продолжительность основного процесса может быть меньше.

Таким образом, продолжительность процесса сепарации является величиной заданной, а целью расчета является определение длины слоя насадки, ее объема и диаметра сепаратора.

Для определения длины слоя насадки рассматривают материальный баланс процесса сепарации магнитных частиц в ферромагнитной насадке.

Принимается допущение о постоянстве активности насадки по всей длине ($E = \text{const}$). Тогда количество поглощаемого насадкой вещества определяется по формуле

$$M = G_n \cdot E, \quad (13)$$

где M - количество поглощаемого вещества, кг; G_n - количество насадки, кг; E - емкость поглощения, кг/кг .

С другой стороны количество поглощенного вещества находят по формуле (10):

$$M = W \cdot S \cdot c_0 \cdot \tau.$$

По этой формуле предполагается полное извлечение магнитных частиц из суспензии, в противном случае вместо c_0 в формулу подставляют разность $c_0 - c_k$, где c_k - концентрация магнитных частиц в уходящем из насадки потоке.

Из (10) и (13) легко получить количество насадки

$$G_n = \frac{W \cdot S \cdot c_0 \cdot \tau}{E}. \quad (14)$$

Длину слоя насадки L (в м) определяют по объему насадки V (м^3) и принятому диаметру сепаратора D (в м) из

$$V = \frac{G_n}{\rho_n} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L.$$

откуда

$$L = \frac{G_n}{0,785 \cdot \rho_n D^2} \quad (15)$$

При больших значениях L возможен вариант уменьшения длины насадки путем многократного прохождения очищаемой среды через насадку, т.е. циркуляционная схема. Даже при малых однократных эффектах очистки магнитной сепарации за 7-8 циклов достигается высокий эффект очистки близкий к 90% [2]. Это также позволяет уменьшить напряженность намагничивающего поля и увеличить скорость фильтрования.

Для замкнутой циркуляционной системы эффект очистки зависит от числа циклов n по формуле

$$\psi_n = 1 - (1 - \psi)^n, \quad (16)$$

где ψ - эффект очистки при первом цикле.

Для проверки рассмотренных теоретических зависимостей были проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке. Магнитный сепаратор лабораторной установки представляет собой катушку, содержащую немагнитную трубку, внутри которой расположена ферромагнитная насадка в виде стальных шаров диаметром 3 мм из стали ШХ 15. Снаружи катушка закрыта корпусом из стали Ст.3, который одновременно является экраном от вредного воздействия магнитного поля и магнитопроводом, замыкающим внешний магнитный поток.

Питание электромагнита осуществляется от выпрямителя, подаваемый ток регулируется лабораторным автотрансформатором. Ток и напряжение контролируется амперметром и вольтметром соответственно. Магнитный сепаратор устанавливается вертикально в пространстве, к немагнитной трубке сердечника присоединяются трубопроводы подачи и вывода суспензии углеродных материалов, промывной жидкости и насадки. Для периодической работы сепаратора в режимах очистки, промывки или загрузки ферромагнитной насадки предусмотрены задвижки.

Эксперименты проводились с антифрикционной присадкой «Деста» (производство АО «ФНПЦ»Алтай), которая представляет суспензию аморфного углерода, наноалмазов и магнетита в индустриальном масле.

Процесс магнитной очистки происходит следующим образом. В сепараторе создавалась необходимая напряженность магнитного поля путем регулирования подаваемого электрического тока. После этого сверху в сепаратор загружается чистая шаровая насадка. Затем снизу - вверх подавалась подогретая до 50°C присадка «Деста», которая проходила шаровую ферромагнитную насадку и выводилась в сосуд для очищенной суспензии. Подача присадки производилась с помощью маслососа. Выгрузка загрязненной насадки осуществлялась после каждого режима путем отключения катушки и одновременной подачи промывной жидкости (керосин). После тщательной промывки шаров, последние загружались в сепаратор и очистка производилась при другой напряженности магнитного поля.

Варьируемыми факторами в процессе эксперимента были напряженность магнитного поля и средняя скорость фильтрования суспензии в рабочей зоне сепаратора. Средняя скорость фильтрования суспензии определялась по формуле:

$$v = \frac{Q}{S \cdot \varepsilon},$$

где V - средняя скорость фильтрования, м /с ; Q - объемный расход, м³/с; S - площадь поперечного сечения рабочей камеры сепаратора, м²; ε - порозность насадки, доли единицы.

В процессе экспериментов определялось содержание железа в исходной присадке и обработанной в магнитном поле. Анализ проводился по методике «Определение железа в продуктах производства УДА» АО «ФНПЦ»Алтай». При обработке экспериментальных результатов рассчитывалась эффективность очистки антифрикционной присадки от железосодержащих примесей по формуле:

$$\psi = \frac{C_0 - C_k}{C_0},$$

где ψ - эффективность очистки, %; C_0 и C_k - начальное и конечное содержание железа в присадке, %.

Теоретические значения эффективности очистки определялись по выражению (5). Результаты эксперимента и теоретического расчета по предложенной методике представлены таблице 1.

Табл. 1. Результаты эксперимента и теоретического расчета при магнитной очистке антифрикционной присадки «Деста» на лабораторном сепараторе

При всех режимах температура присадки равна 50°C

№ п/п	H, кА/м	$Q \cdot 10^6$, м ³ /с	$v \cdot 10^2$, м/с	C_0 , %	C_k , %	ψ , %	ψ_t , %
1	120	1,05	3,34	0,1	0,00158	98,42	99,60
2	80				0,00173	98,27	98,40
3	53				0,00573	94,30	95,00
4	27				0,01660	83,40	84,50
5	120	1,20	3,82	0,1	0,00173	98,27	99,20
6	80				0,00183	98,17	97,20
7	53				0,00850	91,50	92,90
8	27				0,02200	78,00	79,60
9	120	1,35	4,33	0,1	0,00168	98,32	98,60
10	80				0,00601	94,00	95,80
11	27				0,02730	72,70	75,00

Изменение напряженности магнитного поля в пределах от 27 до 120 кА/м при средних скоростях суспензии в рабочем пространстве магнитного сепаратора $(1,05 \dots 1,35) \cdot 10^{-2}$ м/с значительно влияет на эффект очистки. При напряженностях 120 кА/м отмечается высокий эффект очистки, в дальнейшем рекомендуется использовать напряженности магнитного поля в пределах 100...200 кА/м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика расчета магнитных сепараторов с ферромагнитной шаровой насадкой для очистки суспензий от магнитных примесей.

2. Магнитная очистка на лабораторном сепараторе показала значительное уменьшение магнитных примесей в присадке «Деста» при напряженности магнитного поля 120 кА/м.

3. Теоретические расчеты и экспериментальные результаты для лабораторного магнитного сепаратора подтвердили возможность использования полученных зависимостей для расчета магнитных сепараторов с ферромагнитной шаровой насадкой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Резлеску И. Бэреску В. и др. Физика магнитной сепарации материалов./Пер. с рум. – Киев: ВЦПТИД, 1983.-74 с.

2. Сандуляк А.В. Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов. - М.: Химия, 1988.-136 с.

3. Тагунов Е.Я., Тагунов П.Е., Кармазин В.В. Расчет магнитного поля в рабочей области высокоградиентного барабанного шарикового сепаратора на постоянных магнитах //Горный информационно-аналитический бюллетень, МГГУ. - 2012.- №2, - С.106-111.

4. Сандуляк, А. А. Фильтр-сепаратор ферропримесей керамических суспензий. Магнитное поле в порах матрицы / А. А. Сандуляк, А. В. Сандуляк, Д. В. Ершов // Стекло и керамика. – 2013. – № 6. – С. 25-27.

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.

METHOD OF CALCULATION OF MAGNETIC SEPARATORS WITH A FERROMAGNETIC BALL NOZZLE FOR CLEANING SUSPENSIONS FROM MAGNETIC IMPURITIES

A.G. Ovcharenko¹, M. S. Vasilishin²

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

²*IPCET SB RAS, Biysk*

Abstract – To increase the effect of cleaning suspensions from magnetic particles, it is economically feasible in industrial conditions to use devices with low-intensity magnetic fields, but having high magnetic field gradients in the working space. As such devices, magnetic separators with a ferromagnetic ball nozzle are used. The calculations are based on a model of deposition of magnetic particles in a magnetic absorbing screen, and it is assumed that the topography of the capture zone in the vicinity of the contact points of the magnetized balls will have the form of segments with characteristic sizes r_0 and b . The analysis of such a model allowed us to note the similarity of the considered deposition processes in the magnetic separator with the adsorption processes and to further use the elements of the theory of the adsorption process for the calculations of such separators. A method for calculating magnetic separators with a ferromagnetic ball nozzle for cleaning suspensions from magnetic impurities is presented. Experimental verification of the calculated dependences during the cleaning of the anti-friction additive "Desta" confirmed the possibility of using the proposed calculation method for magnetic separators with a ferromagnetic ball nozzle.

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

REFERENCES

1. Razlesku I. Badescu V. et al. Physics of magnetic separation of materials. - Kiev: VCPITLD, 1983. -74 p.
2. Sandulyak A.V. Magnetic filtration cleaning of liquids and gases. - M.: Khimiya, 1988. -136 p.
3. Tagunov E. Ya., Tagunov P. E., Karmazin V. V. Calculation of the magnetic field in the working area of a high-gradient drum ball separator on permanent magnets //Mining information and analytical Bulletin, MGGU. - 2012. - No. 2, - p. 106-111.
4. Sandulyak, A. A. Filter-separator of ferroprimsey ceramic suspensions. Magnetic field in the pores of the matrix / A. A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, D. V. Yershov // Glass and Ceramics. - 2013. - No. 6. - p. 25-27.
5. Kasatkin A. G. Basic processes and apparatuses of chemical technology. - M.: Chemistry, 1973. - 752 p.

Ovcharenko Alexander G.-doctor of technical Sciences, Professor, head of the Department of engineering technology and quality, Biysk technological Institute of Altai state technical University, tel. (3854)435308, e-mail: tmk@bti.secna.ru.

Vasilishin Mikhail Stepanovich-doctor of technical Sciences, head.laboratory IPCET SB RAS, phone: (3854)435308, e-mail: tmk@bti.secna.ru.