

угольной топкой, схема которой представлена на рис. 4, где использованы следующие дополнительные обозначения:

РПВ, РР, РС – автоматические регуляторы, соответственно, производительности дутьевого вентилятора, разряжения в топке, скорости колосниковой решетки;

БК_{O_2} , БК_y , БК_{V_p} – блоки автоматической коррекции, соответственно, задания расхода воздуха по кислороду и расходу угля, задания скорости колосниковой решетки;

ЧЭВ, ЧЭД, ЧЭР – частотно-регулируемые электроприводы, соответственно, дутьевого вентилятора, дымососа, колосниковой решетки;

ДКУ – динамическое корректирующее устройство (дифференциальное звено), необходимое для предупреждения нарушения баланса $F_B=F_D$ и увеличения быстродействия регулятора (РР), возникающего при изменении расхода воздуха в переходных режимах;

ПКР – подвижная колосниковая решетка;

ΔF_{BO_2} , ΔF_{By} , ΔV_{Py} – сигналы коррекции, со-

ответственно, задания расхода воздуха по кислороду и расходу угля, задания скорости решетки по расходу угля;

$U_{\text{РПВ}}$, $U_{\text{РР}}$, $U_{\text{РС}}$ – выходные сигналы соответствующих регуляторов;

$P_{\text{зад}}$, $V_{\text{зад}}$ – заданные значения разряжения в топке и скорости решетки.

Предлагаемая САР режима работы водогрейного котла со слоевой угольной топкой содержит четыре взаимосвязанные подсистемы автоматического регулирования технологических параметров, обеспечивающие высокие экономические, экологические и динамические показатели процесса выработки котлом требуемого количества теплоты. Настройка системы управления сводится к заданию уставок регуляторам и блокам коррекции для базового режима работы котла. При изменении тепловой нагрузки блоки коррекции автоматически изменяют уставки, поддерживая тем самым эффективный режим работы котла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев А.Е. Микропроцессорная система автоматизации водогрейного котлоагрегата для работы на угле // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2008, №3. С. 60-63.
2. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 352 с.

□ Авторы статьи:

Медведев
Алексей Елисеевич
– канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и автоматизация КузГТУ, тел.: 8(384-2)58-23-29

Волыков
Кирилл Павлович
– студент группы ЭА-051 КузГТУ,
тел.: 8(384-2)28-44-62

УДК 532.72:532.584:538.4+621.928

В.А. Старовойтов

МАГНИТНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ЖИДКОСТНЫХ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Ниже проводится аналитическое исследование процессов магнитной сепарации в бинарной системе парамагнитный дисперсный материал – вязкая жидкость в псевдогомогенном приближении, которое позволяет вычислить траектории частиц и распределение концентраций в потоке.

Пренебрегая инерцией частиц [1], распределение объемной концентрации \tilde{c} дисперсных частиц можно описать уравнением

$$\frac{\partial \tilde{c}}{\partial t} + \nabla \tilde{j} = 0, \quad (1)$$

где \tilde{j} – поток вещества дисперсного материала.

Выражение для магнитодиффузионного потока можно получить методами неравновесной термодинамики

$$\begin{aligned} \tilde{j} &= \tilde{c} \tilde{v} - D \nabla \tilde{c} + D \frac{V(\chi - \chi_c) \mu_0}{kT} \tilde{c} \nabla \frac{H^2}{2} =, \quad (2) \\ &= \tilde{c} \tilde{v} + \tilde{j}_0 + \tilde{j}_M \end{aligned}$$

где $\tilde{c} \tilde{v}$; \tilde{j}_0 ; \tilde{j}_M – потоки, обусловленные соответственно конвекцией, диффузией и неоднородность магнитного поля; χ и χ_c – восприимчивости парамагнитного компонента и суспензии на единицу объема; V – объем парамагнитной

частицы; H – напряженность магнитного поля; T – температура суспензии; μ_0 – магнитная постоянная; D – коэффициент диффузии, определяемый соотношением Эйнштейна $D = kT/6\pi d_c v_c R$, где R – радиус частицы; v_c – кинематическая вязкость; d_c – плотность суспензии.

В неоднородном магнитном поле, создаваемом прямолинейным цилиндрическим проводником радиуса a , по которому течет ток I , уравнение (1) с учетом (2) в цилиндрической системе координат \tilde{r}, \tilde{z}, Q в отсутствии конвекции имеет вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{1}{r^3} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{2}{r^4} c = 0, \quad (3)$$

$r = \tilde{r}/a$; $c = \tilde{c}/\tilde{c}_c$ и $t = \tilde{t}_{vM}/a$ – безразмерные координата, концентрация и время соответственно.

При этом скорость седиментации дисперсного материала, приобретаемая под действием максимального градиента поля

$$v_M = \frac{V(\chi - \chi_c)\mu_0 I^2}{24\pi^3 d_c v_c R a^3}, \quad (4)$$

коммутационной диффузией обычно пренебрегают из-за малости D [1].

В начальный момент объемная концентрация – произвольная функция от координаты, т.е.

$$c = \omega(r) \text{ при } t=0 \quad (5)$$

Решение уравнения (3) с начальными условиями (5) дает

$$c = \omega \left[(r^4 - 4t)^{0.25} \right] \left(1 + 4t r^{-4} \right)^{-0.5}. \quad (6)$$

Зависимость $c(r)$ для однородной в начальный момент суспензии ($\omega=1$) представлена на рис. 1.

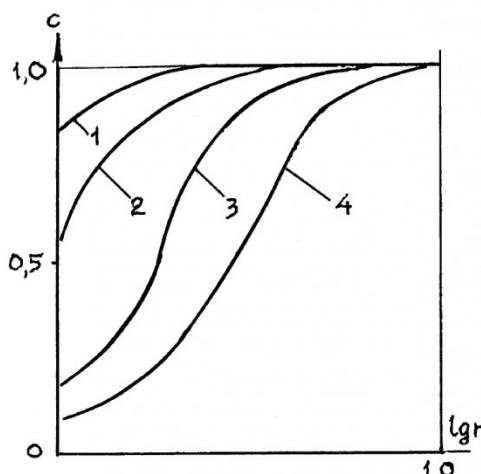


Рис. 1. Распределение объемной концентрации в отсутствии конвекции: 1 – $t=0.1$; 2 – $t=1.0$; 3 – $t=10$; 4 – $t=100$

Концентрация нигде не превышает начальную. Это объясняется ростом магнитных сил при приближении к проводнику. По этой же причине более близкие к поверхности проводника области очищаются быстрее.

При $t \rightarrow \infty$ концентрация стремится к нулю, т.е. несущая среда будет полностью очищена от дисперсной фазы. Поток осаждающихся частиц на единице длины проводника

$$\begin{aligned} \Gamma &= - \int_S \tilde{j}_M \cdot n dS = \\ &= 2\pi a \tilde{c}_0 \omega [(1+4t)0.25] (1+4t)^{-0.5} v_M \end{aligned}$$

На поверхности проводника $j = -v_M cr / r$,

поэтому при попадании на стенку частицы дисперсного материала остаются на ней. Таким образом, выполняется обычное для диффузионных процессов граничное условие – частицы покидают дисперсионную среду при достижении проводника, поверхность которого следует рассматривать как поглощающую. При этом на протяжении всего процесса радиус проводника не изменяется. Такое приближение справедливо при $a \gg R$. Условие пренебрежения диффузией по сравнению с магнитодиффузией имеет вид $2D/v_M a \ll 1$. Для практических скоростей седиментации это условие выполняется с хорошей точностью.

Процесс конвективной магнитоседиментации рассматривается для аналогичного проводника с током, но помещенного коаксиально в цилиндрическую трубу радиуса b и длиной $L \gg b$ с распределением профилей скоростей

$$\tilde{v}_z = v_0 \left(A \ln r - r^2 + 1 \right), \quad (8)$$

$$\text{где } v_0 = \frac{\Delta p a^2}{4d_c v_0 L}; \quad A = \frac{I}{\ln b/a} \left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 - 1 \right];$$

Δp – перепад давления по длине L . При $t < 0$ объемная концентрация однородна. В момент $t=0$ на участке внутреннего цилиндра (проточной части) $0 \leq \tilde{z} \leq l$ начинает протекать ток I . Уравнение конвективной магнитодиффузии в цилиндрических координатах

$$r = \tilde{r}/a; z = \tilde{z}/a; t = \tilde{t}/T$$

примет вид

$$k_t \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{A \ln r - r^2 + 1}{A - 2} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} - k_M \left(\frac{1}{r^3} \frac{\partial c}{\partial r} - \frac{2c}{r^4} \right) = 0 \quad (9)$$

где

$$k_t = \frac{l}{v_0(A-2)T}, \quad k_M = \frac{v_M l}{v_0(A-2)a}.$$

Начальные и граничные условия:

$$\text{при } t=0 - c=1, \text{ при } z=0 - c=1 \quad (10)$$

Стационарное уравнение (9) с граничными условиями (10) являются задачей с граничными ус-

ловиями типа Коши, которая решается методом характеристик для произвольного распределения концентрации $c = \omega(r)$ при $z=0$. Решение приводит к зависимости в неявном виде

$$c = r^2 \eta^{-2} \omega(\eta), \quad (11)$$

где η – параметр, определяемый трансцендентным уравнением при $r=1$.

Процесс стационарной магнитоседиментации не зависит от вязкости, и так как $v_M \sim v_c^{-1}$ и $v_0 \sim v_c^{-1}$, то и k_M не зависит от вязкости.

При $\omega(\eta) = 1$ получаем искомое стационарное решение, удовлетворяющее граничному условию (10). Поток частиц, осаждающихся на поверхности единичной длины, приобретает вид

$$\Pi = 2\pi a v_M \tilde{c}_0 \eta^{-2}.$$

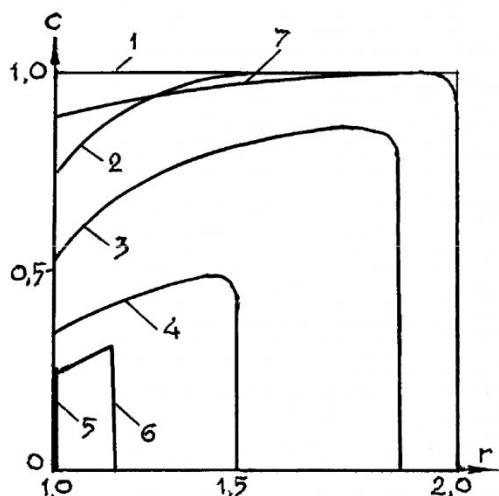


Рис. 2. Стационарное распределение объемной концентрации c/r при b/a и $k_M z$:
1 – 0; 2 – 0,01; 3 – 0,1; 4 – 0,35; 5 – 0,512

Достижимая на практике скорость седиментации $v_M \ll v_0$, поэтому магнитное поле изменяет объемную концентрацию только вблизи поверхности проводника – образуется магнитоиндукционный пограничный слой толщиной δ .

Стационарное распределение концентрации $c(r)$, определяемое решением (11) для $b/a=2$ представлено на рис. 2.

При $b/a > 10$ характер распределения напоминает кривые на рис. 1. Магнитные силы на дальней стенке $r=b/a$ в 8 раз меньше сил на поверхности, но оказываются достаточными для того, чтобы фронт концентрации отходил от дальней стенки (см. кривые 2-5). При $k_M z = 0,512$ канал будет полностью очищен от дисперсной фазы (кривая 5). Расчеты в приближении стержневого течения по формуле (6), в которой t заменено на

$v_M l z / (v_{cp} a)$, где средняя скорость $v_{cp} = \frac{v_0}{2} \left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 + 1 - A \right]$, дают заниженную

интенсивность осаждения (кривые 6, 7). Это объясняется пренебрежением наличия гидродинамическим пограничным слоем.

С ростом b/a магнитные силы на дальней стенке становятся слишком малыми, чтобы вызвать там изменение концентрации.

На рис. 3 представлено распределение объемной концентрации $c(z)$ для $b/a=2$ в центре потока супензии $r=1.5$ (кривые 1, 2) и на поверхности проводника $r=1$ (кривые 3-5). При $k_M z = 0,512$ объемная концентрация на конце проводника ($z=1$) достигает своего минимального для ближней стенки значения $-c = (a/b)^2 = 0,25$ (кривая 5). Если $k_M > k_M^* = 0,512$, то фронт концентрации перемещается в область $z \leq k_M^* k_M^{-1}$, и поверхность проводника недоиспользуется. Для произвольных b/a значение параметра

$$k_M^* = \left[f\left(\frac{b}{a}\right) - f(1) \right] \left(16 \frac{A-2}{A} \right)^{-1},$$

где

$$f(x) = x^4 \left(4 \ln x - \frac{8}{3A} x^2 + \frac{4}{A} - 1 \right).$$

Согласно неявному аналитическому решению (11), процесс стационарной конвективной магнитоседиментации определяется параметром $16(A-2)A^{-1}k_M$. При $k_M \ll 1$ объемная концен-

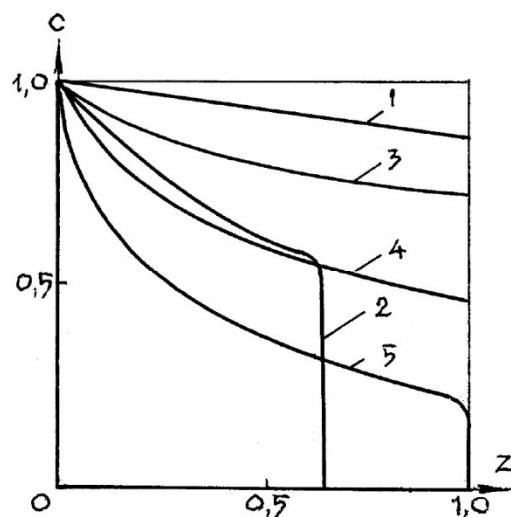


Рис. 3. Распределение объемной концентрации $c(z)$ в центре потока ($r=1.5$) при k_M : 1 – 0,1; 2 – 0,512 и на поверхности проводника ($r=1$) при k_M : 3 – 0,01; 4 – 0,1; 5 – 0,512

трация меняется только вблизи поверхности проводника, т.е. образуется пограничный слой. При больших k_M происходит перераспределение концентрации во всем объеме и наблюдается отход фронта концентрации от дальней стенки. Процесс не зависит от вязкости суспензии.

Для описания нестационарного процесса при

малых числах k_M вполне достаточно использовать квадратичный профиль скорости и линейную зависимость градиента магнитного поля от координаты. При этом время перехода к стационарному состоянию потока пропорционально вязкости перерабатываемой суспензии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parker M.R. The physics of magnetic separation. – Contemp. Phys., 1997, vol. 161, № 3.

□ Автор статьи :

Старовойтов

Владимир Алексеевич

- канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и автоматизации КузГТУ.

Тел. 3842-58-23-29.