

казателей и анализа состояния оборудования в темпе технологического процесса.

ВЫВОД

Предложен целевой критерий, позволяющий оператору энергоблока устранять пережоги топлива, допущенные в процессе эксплуатации оборудования с минимальными потерями.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. СССР 1455350. Способ устранения пережогов топлива по узлам энергоблока / В. И. Назаров, П. В. Бачище, А. А. Никифоров // Бюл. изобр. – 1989. – № 4.
2. Fletcher R., Reeves C. M. Function Minimization by Conjuqate Gradients // Computer J. – 1964. – № 7. – P. 149–154.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 30.05.2005

УДК 537.84

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ОСАЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ЧАСТИЦ В ВЫСОКОГРАДИЕНТНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Инж. МУРАДОВА Р. А.

Азербайджанская государственная нефтяная академия

Анализ существующих теорий осаждения частиц в градиентном магнитном поле и возможностей их применения в реальных магнитных фильтрах показывает, что ныне отсутствует законченная теория магнитного осаждения пара- и ферромагнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле в силу принципиальных ограничений, которые возникают при попытке реализации способа для технологических сред с широкими спектрами свойств. Поэтому необходимо совершенствование известных и создание новых, более простых и общих способов расчета динамических характеристик процессов осаждения пара- и ферромагнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле.

Оценка сил, действующих на частицу в неоднородном магнитном поле, свидетельствует о том, что магнитное осаждение частиц осуществляется в результате конкуренции в основном магнитной F_m и стоковой F_c сил.

Если жидкость, несущая твердые частицы, проявляет неньютоновские свойства, то связь между тензорами напряжений и скоростей деформации нелинейна, и поэтому для описания движения жидкости неприменимы уравнения Навье – Стокса. Анализ реологических характеристик исследу-

двух технологических сред показывает, что неньютоновские свойства слабо зависят от скорости сдвига и для широкого класса таких сред применимо допущение, что показатель неньютоновости n мало отличается от единицы: $|n - 1| \ll 1$.

Это обстоятельство определило выбор реологической модели на основании степенной модели Освальда – Вейля, на которой изучался процесс осаждения магнитных частиц. В качестве рабочей жидкости были выбраны водные растворы карбоксиметилцеллюлозы различной концентрации, искусственно обогащенной ферромагнитным порошком микронного размера. Такой выбор суспензии диктуется подбором модели жидкости, описывающей широкий диапазон неньютоновских свойств сред и сохраняющей высокую текучесть. Этими свойствами обладают технологические среды, в частности пластовые и сточные воды в нефтедобывающей промышленности, содержащие примеси органического и неорганического происхождения. Реологические характеристики рабочих жидкостей определены в ротационном вискозиметре по известной методике. Исследуемые в экспериментах жидкости позволили охватить практически диапазон изменения показателя $0,8 < n < 1$.

На рис. 1 построены совмещенные эпюры абсолютных значений магнитных и гидромеханических сил по ширине порового канала между двумя точками контакта ферромагнитных тел. Точки пересечения этих эпюр соответствуют радиусам зоны магнитного захвата. В окрестности радиуса зоны захвата магнитная сила в несколько раз превышает силы сопротивлений. Такое соотношение сил обеспечивает захват и осаждение частиц в околосредной зоне высокоградиентной среды. Как видно из рис. 1, по мере проявления неньютоновских свойств у взвесенесущей среды радиус захвата частиц уменьшается.

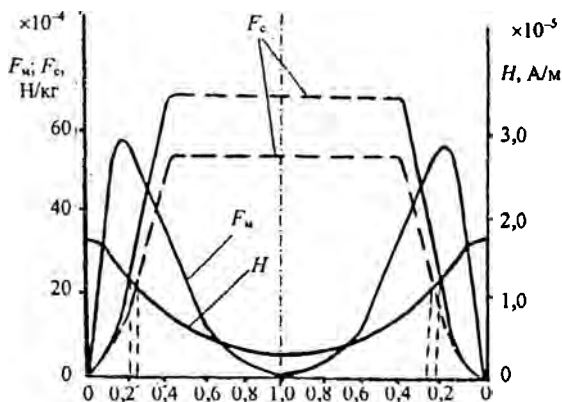


Рис. 1. Эпюры сил, действующих в поровом канале высокоградиентной среды при $H_0 = 150$ кА/м, $\mu = 10,6$: - - - - при $n = 1$, $k = 0,001$ Гц/м²; — — — при $n = 0,952$, $k = 0,004$ Гц/м² (k — коэффициент консистенции)

Экспериментальные исследования показали, что процесс осаждения магнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле существенно зависит от гидродинамических особенностей обтекания вязкой неньютоновской жидкостью намагниченных ферромагнитных тел (стержня, шара) и от профиля течения в порах из контактирующих ферромагнитных тел. Профиль распределения скоростей при обтекании уединенного цилиндрического стержня круглого сечения аксиальным потоком неньютоновской жидкости определяется на основании ее течения в элементарной ячейке:

$$v_z = v_0 f(n, \delta_1) \left[\frac{3n-1}{\delta_1^2} \ln r_a - r_a^{3-\frac{1}{n}} + 1 \right];$$

$$f(n, \delta_1) = \left[\frac{3n-1}{\delta_1^2} \ln \frac{1}{\delta_1} - \delta_1^{\frac{1}{n}-3} + 1 \right], \quad \delta_1 = \frac{a}{R},$$

где a – радиус стержня; R – то же ячейки; v_0 – скорость течения жидкости.

Профиль распределения скоростей при обтекании множества параллельно расположенных стержней круглого сечения аксиальным потоком вязкой неньютоновской жидкости определяется ячеистой моделью Хаппеля – Кувабары:

$$v_z = v_0 f(n, \gamma) \left[\frac{3n-1}{2\gamma} \ln r_a - r_a^{3-\frac{1}{n}} + 1 \right];$$

$$f(n, \gamma) = \left[\frac{3n-1}{2\gamma} \ln \frac{1}{\gamma} - \gamma^{\frac{1-3n}{2n}} + 1 \right]^{-1}, \quad r_a = \frac{r}{a},$$

где γ – плотность упаковки стержней.

Профиль же распределения скоростей при обтекании уединенного шара потоком степенной жидкости определяется формулой З. П. Шульмана.

Определение профиля распределения скоростей при течении как неньютоновских жидкостей в порах из контактирующих шаров или стержней сопряжено со значительными математическими трудностями. Для случая течения в порах вязких неньютоновских жидкостей данная задача может быть решена с помощью приближенной методики А. В. Сандуляка с учетом характерной особенности магнитного осаждения. Пользуясь этой методикой, находим, что в порах из контактирующих шаров

$$v_z = v_\phi f_1(n) \left[1 - \frac{a}{r} \right],$$

а в порах из контактирующих стержней круглого сечения

$$v_z = v_\phi f_5(n) \left[\frac{r}{a} - 1 \right],$$

где $f_1(n)$, $f_5(n)$ – функции от показателя неньютоновости n , причем $f_1(1) = 31,5$; $f_5(1) = 14,625$; v_ϕ – скорость фильтрации жидкости.

Были исследованы также возможности использования в качестве базовой внешней системы намагничивания многополюсной магнитной системы. Результаты сравнительного анализа действия параметра, характеризующего силовой фактор на частицу в поле многополюсной системы намагничивания, свидетельствуют о том, что наиболее эффективными являются четырехполюсные системы. Это позволило использовать в качестве намагничивающей магнитную систему автомобильных электрических стартеров марок СТ–230Б, СТ–142, отличающихся высокой производительностью и компактностью.

Расчеты показывают, что процесс осаждения пара- и ферромагнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле существенно зависит от реологических свойств несущей среды. Неучет неньютоновских свойств, даже если они незначительны, при расчете по существующим методикам приводит к завышению результатов расчета в 1,5–2 раза и более.

Дифференциальные уравнения, описывающие траектории движения частицы в высокоградиентном магнитном поле одиночного ферромагнитного цилиндрического стержня круглого сечения при аксиальном обтекании ламинарным потоком вязкой неньютоновской жидкости, решаются численно с помощью ЭВМ. Однако при учете особенностей технологических и промышленных жидкостей задачу можно решить аналитически, полученные формулы удобны для практических расчетов. При допущении, что $|n-1| \ll 1$ и $Re < 1$, уравнение для полного осаждения частицы из ламинарного потока вязких неньютоновских жидкостей без учета профиля несущей среды определяется по выражению

$$Z' = \frac{r_{a_0}^4}{2 \sin^2 2\theta} X_n [\cos 2\theta - \cos 2\theta_0] \quad \text{при} \quad r_{a_0} = \frac{r_0}{a},$$

где $X_n = X(n)$, причем $X(1) = 1$; r_0, θ_0 – начальные координаты частицы в высокоградиентном магнитном поле; $Z' = (v_m/v_0)(L/a)$; L – длина стержня; v_0 – скорость движения частицы; v_m – так называемая магнитная скорость, зависящая от магнитных, реологических и геометрических параметров системы.

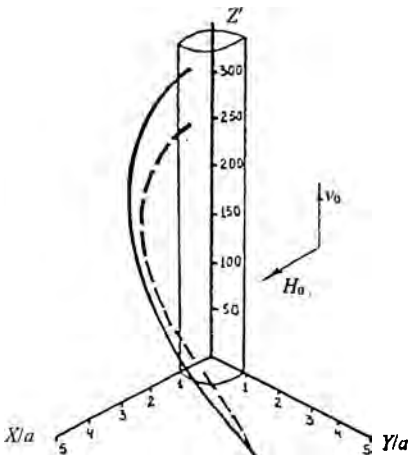


Рис. 2. Характерные траектории осаждения частиц на намагниченном ферромагнитном стержне круглого сечения: — — без учета профиля течения несущей среды; - - - с учетом профиля течения несущей среды

На процесс осаждения существенно влияет также и профиль распределения скоростей потока неньютоновских жидкостей. При указанных выше допущениях дифференциальное уравнение, описывающее траектории движения частицы в высокоградиентном магнитном поле намагниченного ферромагнитного стержня, также решается аналитически. Сравнительный график типичных траекторий осаждения частиц в поле намагниченного стержня из потока ламинарного аксиального потока неньютоновских жидкостей с учетом и без учета профиля несущей среды показан на рис. 2.

Уравнение траекторий частиц в высокоградиентном магнитном поле намагниченного ферромагнитного стержня круглого сечения с учетом

профиля распределения скоростей описывается выражением

$$Z' = X_n f(n, \delta_1) \frac{r_{a_0}^4}{\sin^2 2\theta} \left[\frac{3n-1}{2\gamma} \ln \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta_0} + (\cos 2\theta - \cos 2\theta_0) \right] \left[\frac{3n-1}{2\gamma} \ln \frac{r_{a_0}^2}{\sin 2\theta_0} + 1 - \frac{3n-1}{2\gamma} \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{3n-1}{2\gamma} [\cos 2\theta \ln \sin 2\theta - \cos 2\theta_0 \ln \sin 2\theta_0] + \\
& + \left(\frac{r_{a_0}^2}{\sin 2\theta_0} \right)^{\frac{3n-1}{2n}} \sin^{\frac{n-1}{2n}} 2\theta \left[\frac{(\theta - \theta_0)}{180^\circ} \pi - 0,25(\sin 4\theta - \sin 4\theta_0) \right].
\end{aligned}$$

Реологические свойства несущей среды существенно влияют на кинетику процесса осаждения частиц. На рис. 3 показана кинетика обрастания поверхности намагниченного стержня осажденными частицами. Как видно, незначительное проявление неньютоновских свойств существенно снижает скорость обрастания профиля поверхности осаждения при прочих равных условиях.

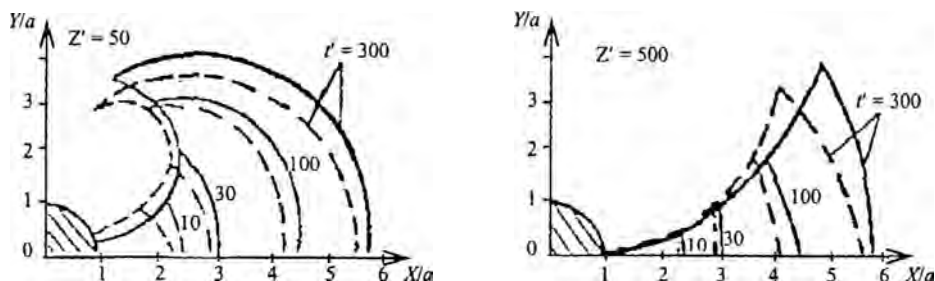


Рис. 3. Некоторые профили насыщения поверхности намагниченного ферромагнитного стержня осажденными частицами: — при $n = 1$; - - - при $n = 0,9$

Осаждение тонкодисперсных железосодержащих частиц происходит в околоконтактной зоне контактирующих ферромагнитных тел. Преимущественно рельеф зоны магнитного захвата с учетом реологических характеристик определяется уравнением

$$\frac{X}{a} = \frac{1}{2} \left(\frac{Y}{a} \right)^2 - \frac{\left(\frac{0,65n}{n+0,4} \right) (\rho_a^*)^{2n+1}}{Y/a},$$

где X , Y – координаты точек, описывающих рельеф зоны захвата частиц.

Относительный эквивалентный радиус зоны магнитного захвата определяется как

$$\rho^* = \left[\frac{a_p \chi \delta^{n+1} H^{0.75}}{\eta_b X_n f_2(n) v_\phi 2^{n-1} a^n} \right]^{2n+1},$$

где $f_2(n)$ – функции от n ; $a_p = 7,59$ кг/(м·с) – расчетный коэффициент радиуса пояса зоны магнитного захвата; $\eta_b = k \left(\frac{v_\phi}{2a} \right)^{n-1}$ – коэффициент эффективной вязкости; χ – магнитная восприимчивость частицы.

При исследовании динамики дисперсных частиц в магнитном фильтре с помощью радиуса захвата из простых физических особенностей определя-

ется эффективность фильтра. В частности, для магнитного фильтра аксиального типа эффективность фильтра составляет:

$$\Xi = 1 - \alpha(L_a, \gamma, n) \exp \left[-\frac{4}{\pi} \left(\frac{L_a}{X_n} \right)^{0.5} \gamma \right];$$

$$\alpha(L_a, \gamma, n) = \frac{\frac{1}{\gamma} - 1}{2f(n, \gamma) \left\{ \frac{3n-1}{4\gamma} \left[\left(\ln \frac{1}{\gamma} - 1 \right) \frac{1}{\gamma} + 1 \right] - \frac{n}{5n-1} \left[\left(\frac{1}{\gamma} \right)^{\frac{5n-1}{2n}} - 1 \right] + 0,5 \left[\frac{1}{\gamma} - 1 \right] \right\}},$$

где $L_a = (v_m / v_0)(L/a)$ – безразмерный коэффициент длины фильтра.

Для полишаровой среды стационарное уравнение магнитного осаждения определяется модифицированным уравнением эффективности фильтра, полученным на основании формулы А. В. Сандуляка:

$$\psi = \lambda \left\{ 1 - \exp \left[-1,66 \left(\frac{0,65n}{(n+0,4)f_2(n)} \right)^n \frac{a_p \chi H^{0,75} \delta^{n+1} L}{2^{n-1} \eta_b a^{n+1} v_\phi} \right] \right\},$$

где λ – доля ферромагнитной фракции примесей.

Таким образом, разработанная модель осаждения частиц позволяет учесть реологическую особенность несущей среды. Полученные теоретические результаты с достаточной степенью точности совпадают с экспериментальными данными.

Принципиальным отличием разработанных и запатентованных устройств [4–6] для осаждения ферромагнитных частиц из потока текучих сред являются повышение эффективности осаждения как магнитных, так и немагнитных частиц, а также значительное улучшение конструкций аппаратов.

Разработанные электромагнитные фильтры были внедрены в технологические процессы нефтедобычи и нефтеочистки, применены для технологической очистки сточных вод гальванического цеха завода «Промавтоматика» (Баку), для частичной доочистки сточных вод Бакинского агрегатного завода и показали высокую работоспособность и эффективность.

ВЫВОДЫ

1. Разработан обобщенный метод расчета осаждения магнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле, который позволяет учитывать широкий спектр свойств очищаемых сред и расширить границы применимости теории электромагнитного фильтрования.

2. Для выявления специфики характера течения жидкости в порах магнитного фильтра определены эпюры распределения скоростей вязких

неньютоновских жидкостей при течении их в порах из стержней и шаров. Для сильнопористых фильтров с нагрузкой из ферромагнитных стержней эпюра распределения скоростей определена с помощью ячеистой модели, а в порах из контактирующих ферромагнитных шаров – по методике А. В. Сандуляка.

3. На основании использования степенной модели реологических сред получены аналитические выражения, описывающие процесс магнитного осаждения частиц в высокоградиентном магнитном поле одиночного намагниченного ферромагнитного стержня круглого сечения и в порах из намагниченных ферромагнитных тел.

4. Полученные формулы пригодны для расчета основных технологических режимных параметров электромагнитного фильтрования как ньютоновских (вязких), так и неньютоновских жидкостей.

5. Показана возможность использования в качестве базовой конструкции для намагничивания корпуса электродвигателя постоянного тока, представляющая компактную и эффективную многополюсную магнитную систему. На этой основе разработаны и внедрены на производстве электромагнитные сепараторы и фильтры-осадители, предназначенные для очистки, которые показывают высокую работоспособность и эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. С а н д у л я к А. В. Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов. – М.: Химия, 1988. – 136 с.

2. Ку л и е в Х. М., А б б а с о в Т. А., Р а д ж а б о в З. А. Математическое моделирование нестационарного процесса магнитно-фильтрационной очистки жидкостей // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1995. – № 1. – С. 96–99.

3. А л и - з а д е П. Г., А б б а с о в Т. А., Ку л и е в Х. М. К вопросу использования магнитных жидкостей в химической технологии // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1996. – № 1–2. – С. 95–97.

4. А. с. 1692652 СССР. Циклонный электромагнитный сепаратор / Х. М. Кулиев // Бюл. изобр. – 1991. – № 43.

5. П а т. 2014149 Российской Федерации. Электромагнитный фильтр для очистки вязких жидкостей / Х. М. Кулиев // Бюл. изобр. – 1994. – № 11.

6. П а т. 2023476 Российской Федерации. Магнитное устройство для очистки газов / Х. М. Кулиев // Бюл. изобр. – 1994. – № 22.

Представлена кафедрой
теоретических основ электротехники

Поступила 16.02.2004