

ГЛУБИННОЕ РАДИАЛЬНОЕ ФИЛЬТРОВАНИЕ В ВОЛОКНОВЫХ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТАХ

В. К. Корнеева, В. М. Капцевич, И. В. Закревский

*Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь;
тел.: +375(17) 272-12-54, e-mail: lerakor1974@mail.ru*

Рассмотрен процесс глубинного радиального фильтрования в волокновых фильтроэлементах. Показано, что при глубинном радиальном фильтровании действие механизмов осаждения частиц загрязнений в проницаемом материале зависит от радиального положения очищаемой среды. Получено решение уравнения Ивасаки для радиального фильтрования.

В настоящее время в технологии порошковой металлургии для изготовления цилиндрических фильтроэлементов из металлических порошков, проволоки, сеток и волокон получен метод сухого изостатического прессования [1; 2]. Изготовленные по этой технологии фильтроэлементы по сравнению с плоскими обладают большей прочностью при одной и той же поверхности фильтрования, обеспечивают высокую производительность, обладают более равномерным порораспределением, характеризуются легкостью изготовления, монтажа, регенерации и др.

Однако если процессы глубинного фильтрования широко описаны для плоских фильтроэлементов [2–5], то для цилиндрических сведения о радиальном фильтровании в литературе отсутствуют. Так, широко применяемое уравнение Ивасаки [6] напрямую не может быть использовано для описания процесса глубинного фильтрования в цилиндрических элементах. Это связано с тем, что течение загрязненных жидкостей (горюче-смазочных материалов, технических жидкостей и др.) в цилиндрических проницаемых материалах (ПМ) имеет некоторые особенности: скорость потока в ПМ цилиндрической формы зависит от их радиуса. Соответственно, уравнение Дарси для цилиндрического ПМ в дифференциальной форме имеет вид:

$$v_r = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (1)$$

где v_r – радиальная скорость фильтрации в каждом сечении цилиндрического ПМ, м/с; k – коэффициент проницаемости ПМ, м²; p – давление, Па; r – текущая радиальная координата, м.

Радиальная скорость фильтрации v_r в каждом сечении цилиндрического ПМ связана с его текущей координатой r соотношением:

$$v_r = v_0 \frac{r_0}{r}, \quad (2)$$

где v_0 – скорость фильтрации на внутренней поверхности цилиндрического ПМ радиуса r_0 , м/с.

Уравнение неразрывности в случае радиального одномерного потока в цилиндрических координатах имеет вид [7]:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} = 0. \quad (3)$$

Подставляя значение v_r из (1), получаем дифференциальное уравнение, характеризующее распределение давлений в цилиндрическом ПМ:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) можно записать и так:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (5) приводит к следующему результату:

$$p = c_1 \ln r + c_2, \quad (6)$$

где c_1 и c_2 – постоянные, определяемые из граничных условий.

Если на входе в цилиндрическую перегородку $p = p_0$, а при выходе $p = p_k$, то после подстановки этих граничных условий в выражение (6) получим:

$$p_0 = c_1 \ln r_0 + c_2, \quad (7)$$

$$p_k = c_1 \ln r_k + c_2, \quad (8)$$

где r_0 и r_k – соответственно, внутренний и наружный радиус цилиндрического ПМ, м.

Откуда:

$$c_1 = \frac{p_0 - p_k}{\ln \frac{r_0}{r_k}}; \quad (9)$$

$$c_2 = p_k - \frac{p_0 - p_k}{\ln \frac{r_0}{r_k}} \ln r_k; \quad (10)$$

$$p = p_2 - \frac{p_1 - p_2}{\ln \frac{r_0}{r_k}} (\ln r_2 - \ln r_2). \quad (11)$$

Подставив значение p в уравнение (1), получим:

$$v_r = -\frac{k}{\mu r} \frac{\Delta p}{\ln \frac{r_0}{r_k}}. \quad (12)$$

Скорость фильтрации на входе в цилиндрическую перегородку ($r = r_0$) составит:

$$v_0 = -\frac{k}{\mu r_0} \frac{\Delta p}{\ln \frac{r_0}{r_k}}. \quad (13)$$

Рассмотрим течение жидкости в цилиндрическом ПМ. Введем понятие удельной пропускной способности перегородки через внутреннюю поверхность $S_0(r = r_0)$ как отношение производительности фильтрации $v_0 S_0$ к высоте H цилиндрического ПМ:

$$Q = \frac{v_0 S_0}{H} = \frac{2\pi k}{\mu} \frac{\Delta p}{\ln \frac{r_0}{r_k}}. \quad (14)$$

Осаждение частиц в ПМ для случая фильтрования в радиальном направлении можно описать зависимостью Ивасаки [6] в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial r} = -\lambda C, \quad (15)$$

где C – объемная концентрация частиц, %; r – радиальное направление движения очищаемой жидкости, м; λ – коэффициент фильтрования, м^{-1} , который, очевидно, будет отличаться от коэффициента фильтрования при плоскопараллельном движении [3].

Эффективность осаждения частиц загрязнений в пористой волокнутой среде характеризуется следующими параметрами:

вероятностью столкновения η_0 , равной отношению количества частиц N_c , столкнувшихся с единичной преградой (коллектором), к общему количеству частиц N , присутствующих в жидкости:

$$\eta_0 = \frac{N_c}{N}; \quad (16)$$

вероятностью осаждения α , равной отношению количества частиц N_3 , оказавшихся задержанными на коллекторе, к количеству частиц N_c , столкнувшихся с ним:

$$\alpha = \frac{N_3}{N_c}. \quad (17)$$

Эффективность осаждения определяется параметром η , равным произведению вероятностей столкновения η_0 и осаждения α :

$$\eta = \eta_0 \alpha = \frac{N_3}{N}. \quad (18)$$

При определении значений вероятности столкновения η_0 учитывается роль таких механизмов, как диффузия, прямое столкновение, седиментация и инерция. При этом считается, что:

$$\eta_0 = \eta_{\text{диф}} + \eta_{\text{пр ст}} + \eta_{\text{сед}} + \eta_{\text{ин}}, \quad (19)$$

где $\eta_{\text{диф}}$, $\eta_{\text{пр ст}}$, $\eta_{\text{сед}}$, $\eta_{\text{ин}}$ – вероятности столкновения под действиями механизмов диффузии, прямого столкновения, седиментации и инерции соответственно.

По данным авторов [8–10], вероятность столкновения в результате действия этих механизмов определяется следующими зависимостями, которые в случае радиального фильтрования с учетом изменения скорости фильтрования в радиальном направлении (2) необходимо записать в виде:

диффузия –

$$\eta_{\text{диф}} = 0,9 \left(\frac{k_B T r}{\mu d D v_0 r_0} \right)^{2/3}; \quad (20)$$

прямое столкновение –

$$\eta_{\text{пр ст}} = \frac{3}{2} \left(\frac{d}{D} \right)^2; \quad (21)$$

седиментация –

$$\eta_{\text{сед}} = \frac{(\rho_T - \rho_{\text{ж}}) d^2 g r}{18 \mu v_0 r_0}; \quad (22)$$

инерция –

$$\eta_{\text{ин}} = \frac{\rho_T d^2 v_0 r_0}{18 \mu D r}, \quad (23)$$

где k_B – постоянная Больцмана, равная $1,3804 \times 10^{-23}$, Дж/К; T – абсолютная температура, К; μ – динамическая вязкость очищаемой жидкости, Па·с; d – диаметр частиц загрязнений, м; D – диаметр волокна, м; ρ_T и $\rho_{\text{ж}}$ – соответственно, плотность частиц загрязнений и очищаемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Пусть поток очищаемой жидкости Q со взвешенными в ней частицами загрязнений движется в пористой среде в направлении координаты r и его концентрация на радиальной поверхности $r = r_0$ равна C_0 . Частицы загрязнений, проходя через элемент объема пористой среды толщиной Δr , осаждаются на единичных коллекторах, и их концентрация на радиальной поверхности $r + \Delta r$ уменьшается и оказывается равной $C - \Delta C$ (рис. 1).

Объем осажденных частиц V_B в единицу времени на единичном волокнувом коллекторе длиной l и диаметром D равен:

$$V_B = \eta_0 \alpha v_r \pi l D C. \quad (24)$$

Количество волокнувых коллекторов в элементе объема ΔV равно:

$$N = \frac{(1 - \Pi) 2 \pi r \Delta r H}{\frac{\pi}{4} D^2 l}, \quad (25)$$

где H – высота фильтроэлемента.

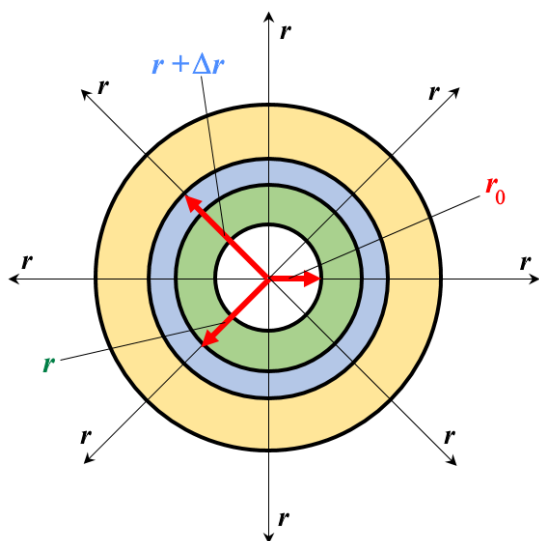


Рис. 1. Схема радиального фильтрования в однослойном ПМ

Тогда объем осажденных частиц в элементе объема ΔV равен $V_B N$ и связан с изменением концентрации загрязнений в текущей жидкости на поверхности $r + \Delta r$ равенством:

$$QC - Q(C - \Delta C) = V_B N. \quad (26)$$

Учитывая, что $Q = v_r 2\pi r H$, используя выражения (24), (25) и при этом полагая, что $\Delta C \rightarrow 0$ и $\Delta r \rightarrow 0$, получим:

$$\frac{dC}{dr} = -\frac{4(1-\Pi)\eta_0\alpha}{D}C. \quad (27)$$

Тогда коэффициент λ , входящий в уравнение (15), для волокновой пористой среды соответственно равен:

$$\lambda = \frac{4(1-\Pi)\eta_0\alpha}{D}. \quad (28)$$

Представим выражение (27) в виде:

$$\frac{dC}{C} = -\frac{4(1-\Pi)\eta_0\alpha}{D}dr. \quad (29)$$

Перепишем выражение (29) в интегральном виде:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = -\frac{4(1-\Pi)\alpha}{D} \int_{r_0}^r \eta_0 dr. \quad (30)$$

Решение уравнения (30) с учетом зависимости η_0 от радиальной координаты r (19) – (23) можно представить в следующем виде:

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{4(1-\Pi)\alpha}{D} \left[A(r^{5/3} - r_0^{5/3}) + B + F(r^2 - r_0^2) + G \ln \frac{r}{r_0} \right], \quad (31)$$

где

$$A = 0,54 \left(\frac{k_B T}{\mu d D v_0 r_0} \right)^{2/3}; \quad B = \frac{3}{2} \left(\frac{d}{D} \right)^2; \quad F = \frac{(\rho_T - \rho_{ж}) d^2 g}{36 \mu v_0 r_0}; \quad G = \frac{\rho_T d^2 v_0 r_0}{18 \mu D}. \quad (32)$$

Таким образом, решение уравнения Ивасаки для радиального фильтрования можно представить в виде:

$$C = C_0 \exp \left[-\frac{4(1-\Pi)\alpha}{D} \left(A(r^{5/3} - r_0^{5/3}) + B + F(r^2 - r_0^2) + G \ln \frac{r}{r_0} \right) \right]. \quad (33)$$

Полученные выражения показывают, что при глубинном радиальном фильтровании действие механизмов осаждения частиц загрязнений в ПМ зависит от радиального положения очищаемой среды. Так, вероятность столкновения частиц загрязнений с волокновым коллектором при росте радиальной координаты увеличивается под действием механизмов диффузии и седиментации, уменьшается под действием механизма инерции и не зависит от прямого столкновения.

Литература

1. Реут, О. П. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов / О. П. Реут, Л. М. Богинский, Е. Е. Петюшик. – Минск : Дзэбор, 1998. – 258 с.
2. Проницаемые материалы из металлических волокон: свойства, технологии изготовления, перспективы применения / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2013. – 380 с.

3. *Herzig, J. P.* Flow of suspension through porous media : application to deep bed filtration / J. P. Herzig, D. M. Leclerc, P. LeGoff // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 1970. – № 62 (5). – P. 8–35.
4. *Ison, C. R.* Removal mechanisms in bed filtration / C. R. Ison, K. J. Ives // *Chemical Engineering Science*. – 1969. – Vol. 24. – P. 717–724.
5. *Леонов, А. Н.* Комбинированные фильтрующие системы на основе фильтров с поверхностным и объемным механизмами фильтрации / А. Н. Леонов, В. М. Капцевич, В. К. Корнеева. – Минск : БГАТУ, 2017. – 124 с.
6. *Iwasaki, T.* Some notes on sand filtration / T. Iwasaki // *AWWA*. – 1937. – № 29. – P. 1591–1602.
7. *Шлихтинг, Г.* Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1969. – 742 с.
8. *Water and waste water filtration: concepts and application* / K. Yao [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 1971. – Vol. 5, № 12. – P. 1105–1112.
9. *Левич, В. Г.* Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – М. : Гос. изд-во физ.-хим. лит., 1959. – 700 с.
10. *Bliss, T.* Suspended solids washing overview / T. Bliss, M. Ostojca-Starzewski // *IPST Technical Paper Series*. – 1997. – № 679. – 13 p.

RADIAL DEEP FILTRATION IN FIBER FILTER ELEMENTS

V. K. Korneeva, V. M. Kaptsevich, I. V. Zakrevsky

Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus;
tel.: +375(17) 272-12-54, e-mail: lerakor1974@mail.ru

The process of deep radial filtration in fiber filter elements is considered. It is shown that during deep radial filtration, the action of the mechanisms of sedimentation of pollutant particles in a permeable material depends on the radial position of the medium being cleaned. A solution of the Iwasaki equation for radial filtering is obtained.

УДК 53.097/532.135

ВЫСОКОДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКОВЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ НА ОСНОВЕ АЛЮМОФOSФАТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ БОРНОЙ КИСЛОТОЙ, ДЛЯ ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Е. В. Коробко¹, Л. С. Ещенко², О. В. Понятовский², Л. В. Радкевич¹, Н. А. Журавский¹

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь;*
тел.: 8(017) 350-13-61, e-mail: evkorobko@gmail.com

²*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь;*
тел.: 8(017) 363-92-51, e-mail: yeshchanko@belstu.by

Исследованы особенности получения высокодисперсных порошковых наполнителей на основе алюмофосфатов, модифицированных борной кислотой, для электроуправляемых жидкостей (ЭРЖ). Изучено реологическое поведение ЭРЖ, содержащих 20 мас.% наполнителей, в синтетическом масле Mobil, в постоянном электрическом поле напряженностью 0,5–3,5 кВ/мм. Отмечено, что содержание и состояние бора в структуре термообработанного безводного алюмофосфата влияет на фазовый состав образцов. Установлена зависимость ЭР активности ЭРЖ от содержания модификатора в алюмофосфатных порошковых наполнителях, полученных различными способами.

Введение. Электрореологический (ЭР) эффект представляет собой быстрое обратимое изменение вязкости дисперсий порошков поляризующихся материалов в диэлектрических жидкостях при наложении внешних электрических полей [1; 2]. Такие жидкотекучие материалы (электрореологические жидкости, ЭРЖ) могут стать важными элементами при создании электроуправляемых устройств, основанных на контролируемом сопротивлении приложенной силе в космической технике, робототехнике, медицине. Они проявляют управляемый быстрый отклик на воздействие поля в демпферах, сцеплениях, клапанах, захватах, элементах прецизионного позиционирования, тактильных устройствах и др. [3].

Существенное значение для ЭР эффекта имеют химическая природа и структурная организация материала дисперсной фазы ЭРЖ. В отсутствие электрического поля ЭРЖ ведут себя как ньютоновские или псевдопластические жидкости. В электрическом поле за счет структурирования дисперсной фазы формируются цепочечные структуры вдоль направления поля, что при-