

ОСОБЕННОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛАХ

В.М. КАПЦЕВИЧ¹, Р.А. КУСИН², В.К. КОРНЕЕВА¹,
Д.И. КРИВАЛЬЦЕВИЧ¹, Е.А. МАРШИНА¹, Е.В. АЛХИМЕНОК¹

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

²Институт порошковой металлургии, Минск, Республика Беларусь

В статье описывается гидродинамический процесс фильтрования осветлением. Рассмотрены основные механизмы осаждения частиц загрязнений в порах фильтрующих материалов. Приведены теоретические исследования процесса осаждения.

In the article hydrodynamical process of filtering by clarification is described. The basic mechanisms of sedimentation of particles of pollution in times of filtering materials are considered. Theoretical researches of process of sedimentation are resulted.

Введение

Процесс фильтрования является наиболее простым и эффективным способом удаления загрязнений из смазочных материалов [1–5]. По современным представлениям способы фильтрования, т.е. разделения суспензии на твердую и жидкую фазы, подразделяют на осветление и фильтрование с образованием осадка [6].

Осветление – наиболее полное удаление всех частиц из смазочных материалов, когда доля твердой фазы в ней невелика ($1-10 \text{ г/м}^3$). В зависимости от размеров удаляемых частиц различают следующие ступени осветления: фильтрование, микрофильтрование и ультрафильтрование (рис. 1). Известными и широко применяемыми примерами осветления являются очистка моторных масел, рабочих жидкостей гидравлических систем, стерилизационное фильтрование напитков, соков, пива, вина, медицинских и биохимических продуктов и др.

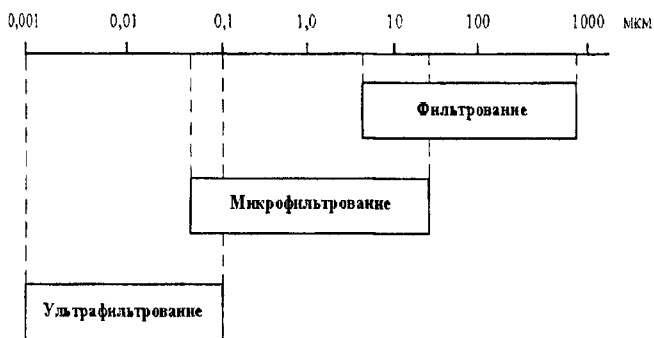


Рис. 1. Классификация диапазонов осветления

Основная часть

Очистка смазочных материалов, конечной целью которого является получение очищенных моторных масел или рабочих жидкостей гидравлических систем, относится к процессу осветления.

Осветление является гидродинамическим процессом, скорость которого прямо пропорциональна разности давлений, создаваемых по обеим сторонам фильтровального элемента, и обратно пропорциональна сопротивлению, испытываемому жидкостью при ее движении через поры элемента и слой образовавшегося осадка. В зависимости от решаемой задачи осветление разделяют на поверхностное (рис. 2а) и глубинное (рис. 2б). При очистке смазочных материалов основным является глубинное осветление.

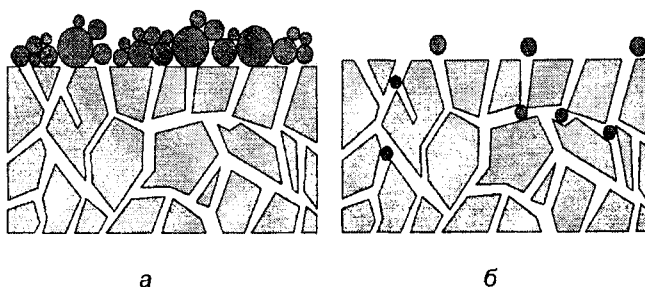


Рис. 2. Поверхностное (а) и глубинное (б) осветление

При глубинном осветлении основными процессами осаждения (кольматации) являются как непосредственный механический захват частиц твердой фазы, так и их адсорбция под действием физических и химических сил на внутренней поверхности пор фильтровального элемента. При этом виде осветления удается отделить значительную долю частиц твердой фазы, размеры которых меньше размеров пор, хотя на основании чисто геометрических соотношений этих размеров кажется, что указанные частицы могли бы свободно пройти через фильтрующий материал (ФМ).

Процесс осаждения частиц загрязнений в ФМ зависит от свойств частиц загрязнений, свойств ФМ и очищаемой жидкости, а также от режимов ее течения. При решении вопросов, связанных с эффективностью осветления, важнейшая роль отводится определению в каждом конкретном случае влияния тех или иных механизмов осаждения [7, 8]. Рассмотрим эти механизмы.

Механизм касания (зацепление). Осаждение частиц загрязнений в результате касания возникает всякий раз, когда линии тока, по которым движутся частицы, проходят рядом с поверхностью препятствия на расстоянии меньшем или равном половине их диаметра. При этом, если размер частицы больше размера поры, происходит ее закупоривание (так называемый ситовой эффект).

Основным параметром касания является отношение d/D , где d — диаметр частиц загрязнений, а D — диаметр частиц, образующих пористый каркас ФМ. Величина этого параметра оказывает существенное воздействие на процесс осаждения. Так, по данным авторов [9], при $d/D > 0,12$ наблюдается быстрое и необратимое забивание ФМ. Если $d/D < 0,12$, то наблюдается обратимый режим забивания — процесс кольматации протекает одновременно с процессом декольматации. Аналогичные результаты были получены авторами [10],

которые экспериментально установили, что при $d/D > 0,15$ пористая среда необратимо забивается, а при $d/D < 0,065$ забивка остается незначительной и происходит лишь частичное осаждение загрязнителя в ФМ, при котором процессы захвата частиц загрязнений (коагуляция) уравниваются их срывом и удалением (декоагуляция) из фильтра.

Анализ многочисленных экспериментальных данных, проведенный С.В. Беловым [11], показывает, что отношение среднего размера пор ФМ к среднему размеру частиц, из которого они изготовлены, при пористости $\Pi = 0,4$ изменяется от 0,25 до 0,5. Учитывая эти данные, нетрудно определить соотношение размеров частиц загрязнений и средних размеров пор ФМ, при которых забивание необратимо. Тогда неравенству $d/D > 0,12$ соответствует

$$\frac{d}{d_{\text{нсп}}} > 0,24-0,48,$$

а $d/D > 0,15$ — неравенству

$$\frac{d}{d_{\text{нсп}}} > 0,3-0,6.$$

Механизм броуновской диффузии. Под действием этого механизма осаждение частиц загрязнений в ФМ происходит в результате их столкновения с молекулами жидкости. В результате этих столкновений частица загрязнений, двигаясь с несущим потоком, испытывает случайные смещения с линий тока, приходит в контакт со стенками поровых каналов и задерживается на них.

Диффузия характеризуется коэффициентом диффузии, который связан со средним квадратичным смещением частицы соотношением [12]

$$\bar{x}^2 = 2D_{\text{бр}}t, \quad (1)$$

$$D_{\text{бр}} = \frac{k_6 T}{3\pi \mu d}, \quad (2)$$

где k_6 — постоянная Больцмана, равная $1,3804 \cdot 10^{-23}$, Дж/К; T — абсолютная температура, К; μ — динамическая вязкость жидкости, Па·с; d — диаметр частиц загрязнений, м.

Броуновская диффузия тем интенсивнее, чем выше температура жидкости, чем меньше ее вязкость и размер частиц загрязнений.

Для оценки влияния броуновской диффузии на процесс осаждения используют результаты расчетов Таусенда [13], который решил задачу об осаждении частиц загрязнений при их движении в круглой трубе. Он предположил, что все частицы имеют одинаковые размеры, а при соударении со стенками трубы прилипают к ним.

Если предположить, что диаметр трубы равен диаметру поры, а длина трубы l равна толщине ФМ, то выражение, полученное Таусендом, можно записать в виде

$$\frac{n}{n_0} = 4[0,1952e^{-7,313\zeta} + 0,0243e^{-44,5\zeta} + \dots], \quad (3)$$

$$\text{где } \zeta = \frac{D_{\text{бр}} \Pi l}{2d_n^2 v_\phi}. \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) n_0 — число частиц, входящих в поровый канал, а n — число частиц, выходящих из него; d_n — диаметр поры, м; v_ϕ — скорость фильтрации, м/с.

Анализ полученной зависимости показывает, что при $\zeta > 4,7 \cdot 10^{-2}$ влиянием броуновской диффузии на процесс осаждения можно пренебречь.

Механизм седиментации (гравитационное осаждение). Этот механизм обусловлен вертикальным смещением частиц загрязнений вниз с линией тока под действием силы тяжести во время прохождения их через ФМ.

Если предположить, что сила тяжести при движении частиц уравнивается силой сопротивления Стокса, то скорость седиментации частиц загрязнений можно определить из выражения [14]

$$v_c = \frac{d^2(\rho_r - \rho_{\text{ж}})g}{18\mu}, \quad (5)$$

где ρ_r и $\rho_{\text{ж}}$ — соответственно плотность частиц и очищаемой жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с².

На практике при оценке влияния седиментации на процесс осаждения считают [7], что при $v_c / v \leq 0,01$, где v — действительная скорость жидкости в поровых каналах, осаждением частиц загрязнений под действием седиментации можно пренебречь.

Механизм инерции. Осаждение под действием этого механизма является следствием действия сил инерции, вынуждающих частицы загрязнений отклоняться от линий тока, в результате чего они приходят в столкновение с препятствием и удерживаются на нем.

Механизм инерции характеризуется числом Стокса, которое равно [14, 15]

$$St = \frac{\rho_r d^2 v_\phi}{18\mu D}, \quad (6)$$

где v_ϕ — скорость фильтрации, м/с.

В работе [16] авторы определили критическое значение числа Стокса, меньше которого инерционным осаждением можно пренебречь. Это критическое значение оказалось равным 1/16, т.е. при $St < 1/16$ осаждения частиц загрязнений на препятствии из-за эффекта инерции не происходит.

Реальные процессы осаждения частиц загрязнений в ФМ характеризуются совместным воздействием вышеописанных механизмов осаждения. При этом при различных характеристиках частиц загрязнений, свойств ФМ и режимов течения очищаемой жидкости те или иные механизмы осаждения будут преобладать над другими. Так, например, авторы [17] считают, что основными механизмами осаждения являются касание и диффузия, авторы [15] отдают предпочтение диффузии и инерционному осаждению, а в работе [18] — только одному инерционному осаждению.

Теоретическое описание процесса осаждения частиц загрязнений в пористой среде ФМ основывается на использовании уравнения сохранения массы и кинетических уравнениях, которые имеют вид [7]:

уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial}{\partial t}(\sigma + \Pi C) + v_\phi \frac{\partial C}{\partial x} - D_{\text{бр}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0, \quad (7)$$

кинетические уравнения

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = KC, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{K}{v_\phi} \sigma, \quad (9)$$

где Π – пористость, являющаяся функцией x и t ; σ – объем частиц загрязнений, задержанный в единице объема пористой среды, C – объемная концентрация частиц в очищаемой жидкости; K – параметр осаждения, c^{-1} .

Параметр осаждения K является функцией σ и ее обычно представляют в виде [18]

$$K = K_0 F(\sigma), \quad (10)$$

где K_0 – постоянная, c^{-1} .

Уравнения (7)–(9) представляют собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, аналитическое решение которых невозможно даже для простейших выражений зависимости (10).

Упрощение системы уравнений (7)–(9) возможно после учета конкретных механизмов осаждения и реальных размеров частиц загрязнений.

Для определения закономерности изменения пористой структуры ФМ в процессе осаждения частиц необходимо, во-первых, для элементарного объема пористой среды составить уравнение сохранения массы и, во-вторых, предложить кинетическое уравнение осаждения частиц загрязнений.

Для вывода уравнения сохранения массы рассмотрим единицу объема ФМ, схематично представленную на рис. 3. Здесь Π_0 – начальная пористость; $(1-\Pi_0)$ – объем материала каркаса; σ – объем осаждаемых частиц; Π – пористость среды, изменяющаяся в процессе осаждения частиц загрязнений, равная $\Pi_0 - \sigma$; ΠC – объем незадержанных частиц, прошедших через ФМ; $\Pi(1-C)$ – объем пор ФМ за вычетом объема незадержанных частиц.

Рассмотрим элемент объема ФМ, представляя его в виде прямоугольного параллелепипеда в ортогональной системе координат x, y, z (рис. 4). Пусть очищаемая жидкость со взвешенными в ней частицами загрязнений движется в направлении оси x и имеет в плоскости $x = x_0$ концентрацию C . Частицы загрязнений, проходя через элемент объема ФМ, осаждаются в нем, и их концентрация в плоскости $x = x_0 + Dx$ уменьшится и окажется равной $C - DC$.

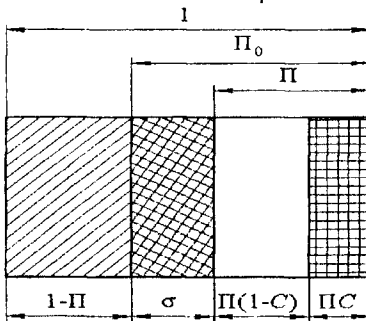


Рис. 3. Схематичное представление единицы объема пористой среды

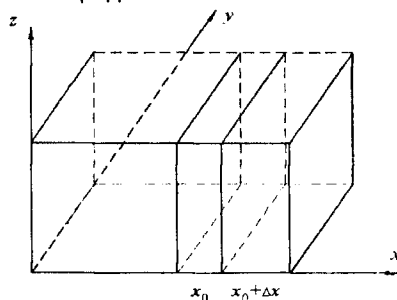


Рис. 4. Элемент объема ФМ в ортогональной системе координат

Выражение для объема частиц загрязнений, задержанных за время Dt элементом объема ФМ, ограниченным параллельными плоскостями, площадью S каж-

дая и имеющими соответственно координаты $x = x_0$ и $x = x_0 + Dx$, можно записать в виде

$$v_\phi CS \Delta t - (C - \Delta C) v_\phi S \Delta t = v_\phi \Delta C S \Delta t. \quad (11)$$

Вследствие осаждения частиц загрязнений пористость выделенного элемента объема ФМ уменьшится на величину $D\Pi$, а объем пор на величину $-D\Pi S Dx$. Приравняв объем частиц загрязнений, задержанных выделенным элементом за время Dt , к изменению объема пор, получим

$$v_\phi \Delta C S \Delta t = \Delta \Pi S \Delta x. \quad (12)$$

Тогда, при Dx и Dt , стремящихся к нулю, выражение (12) примет вид

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} = v_\phi \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (13)$$

Уравнение (13), описывающее изменение объема пор ФМ вследствие осаждения в нем частиц загрязнений, является искомым уравнением сохранения массы.

Выведем кинетическое уравнение осаждения, определяющее кинетику изменения пористости в процессе прохождения частиц загрязнений через элемент объема ФМ. Изменение объема пор DV в выделенном элементе объема пористой среды (рис. 5), расположенном между $x = x_0$ и $x = x_0 + Dx$, за малый отрезок времени Dt определяется выражением

$$\Delta V = \frac{\partial \Pi}{\partial t} S \Delta t \Delta x. \quad (14)$$

За этот промежуток времени Dt объем частиц загрязнений, прошедших через сечение $x = x_0$, равен

$$V = v_\phi C S \Delta t. \quad (15)$$

Тогда вероятность осаждения частиц загрязнений q при прохождении через выделенный элемент пористой среды равна отношению изменения объема пор DV к объему частиц загрязнений V , прошедших через сечение $x = x_0$. Отсюда

$$q = \frac{\Delta x}{v_\phi C} \frac{\partial \Pi}{\partial t}. \quad (16)$$

Разделив полученное выражение на Dx , получим вероятность осаждения на единице длины выделенного элемента пористого тела:

$$\omega_\infty = \frac{1}{v_\phi C} \frac{\partial \Pi}{\partial t}. \quad (17)$$

Выражение (17) можно переписать в виде

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} = \omega_\infty v_\phi C. \quad (18)$$

Выражение (18) является искомым кинетическим уравнением осаждения, в котором ω_∞ учитывает вероятностный характер осаждения частиц загрязнений в объеме ФМ и в общем случае является функцией их свойств, ФМ, а также действующих механизмов осаждения.

В качестве примера рассмотрим случай, когда размер частиц загрязнений соизмерим с размерами пор ФМ. Тогда вероятность ω_{oc} пропорциональна относительному сечению захвата, определяемому отношением S_τ/S , где S_τ – площадь, занимаемая ФМ в сечении, перпендикулярном направлению фильтрования, и S – площадь ФМ в этом же сечении [19].

Учитывая [20], что

$$\frac{S_\tau}{S} = 1 - \Pi, \tag{19}$$

кинетическое уравнение можно записать в виде

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} = a(1 - \Pi)v_\phi C, \tag{20}$$

где a – постоянная.

Таким образом, для определения закономерности изменения объема пор ФМ в процессе осаждения необходимо решить систему двух уравнений, включающую в себя уравнение сохранения массы (1.13) и кинетическое уравнение (20).

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ пористость равна Π_0 :

$$\Pi|_{t=0} = \Pi_0, \tag{21}$$

а концентрация частиц загрязнений в сечении $x = 0$ подерживается постоянной и равна C_0 :

$$C|_{x=0} = C_0. \tag{22}$$

Для решения системы уравнений (13) и (20) с начальным и граничным условиями (21), (22) сделаем замену переменных:

$$1 - \Pi = \rho \text{ и } b = -av_\phi. \tag{23}$$

Тогда, с учетом (23), система уравнений (13) и (20) примет вид

$$\frac{\partial C}{\partial x} = a\rho C; \tag{24}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = bC\rho. \tag{25}$$

Вводя обозначения $ax = \xi$ и $bt = t$, из уравнений (24), (25) получаем

$$\frac{\partial C}{\partial \xi} = \rho C; \tag{26}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = C\rho. \tag{27}$$

Из уравнений (26) и (27) следует, что существует бесчисленное множество функций $F(\xi, t)$ таких, как

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} = C; \tag{28}$$

$$\frac{\partial F}{\partial \xi} = \rho. \tag{29}$$

Тогда

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \xi \partial \tau} = \frac{\partial F}{\partial \xi} \frac{\partial F}{\partial \tau}. \tag{30}$$

С учетом уравнения (28), выражение (30) можно переписать в виде

$$\frac{\partial C}{\partial \xi} = C \frac{\partial F}{\partial \xi}. \tag{31}$$

Интегрируя уравнение (31), находим, что

$$C = \psi(\tau)e^{\phi(\xi, \tau)}. \tag{32}$$

Учитывая (28), из последнего выражения (32) можно определить $F(\xi, t)$ как

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} = \psi(\tau)e^{F(\xi, \tau)}. \tag{33}$$

Откуда после интегрирования по t уравнение (33) можно записать

$$F(\xi, \tau) = -\ln \left[W(\xi) - \int_0^\tau \psi(\tau) d\tau \right], \tag{34}$$

где $W(\xi)$ – некоторая функция ξ .

Подставляя (34) в (32), получим, что

$$C(\xi, \tau) = \frac{\psi(\tau)}{W(\xi) - \int_0^\tau \psi(\tau) d\tau}. \tag{35}$$

Для определения значения ρ продифференцируем уравнение (34) по ξ . Тогда, учитывая (29), получим

$$\rho(\xi, \tau) = \frac{-W'(\xi)}{W(\xi) - \int_0^\tau \psi(\tau) d\tau}. \tag{36}$$

В уравнениях (35) в (36) для определения функций ψ и W воспользуемся начальными и граничными условиями (21) и (22), которые в переменных ξ и t имеют вид

$$\rho|_{t=0} = \rho_0 = 1 - \Pi_0; \tag{37}$$

$$C|_{\xi=0} = C_0. \tag{38}$$

Отсюда

$$\psi = \psi_0 e^{-\rho_0 \tau}; \tag{39}$$

$$W(\xi) = W_0 e^{-\rho_0 \xi}. \tag{40}$$

Здесь ψ_0 и W_0 – постоянные, связанные между собой соотношением:

$$\psi_0 = W_0 C_0. \tag{41}$$

Подставляя (39–40) в (35–36) и учитывая (41), получим решение системы уравнений (26) и (27) в виде

$$C(\xi, \tau) = C_0 \frac{e^{-\rho_0 \tau}}{e^{-\rho_0 \tau} + e^{-\rho_0 \xi} - 1}; \tag{42}$$

$$\rho(\xi, \tau) = \rho_0 \frac{e^{-\rho_0 \xi}}{e^{-\rho_0 \tau} + e^{-\rho_0 \xi} - 1}. \tag{43}$$

Переходя от переменных ξ, τ, k, x, t и учитывая (23), получим окончательные выражения для определения распределения концентрации частиц загрязнений и пористости по толщине ФМ

$$C(x, t) = C_0 \frac{e^{aC_0 v_\phi t}}{e^{aC_0 v_\phi t} + e^{-a(1-\Pi_0)x} - 1}; \tag{44}$$

$$\Pi = \Pi_0 + \frac{1 - \Pi_0}{\Pi_0} \frac{e^{aC_0 v_\phi t} - 1}{e^{aC_0 v_\phi t} + e^{-a(1-\Pi_0)x} - 1} \quad (45)$$

На рис. 5–7 представлены результаты расчетов распределения пористости по сечению ФМ при различных параметрах a (рис. 5), времени осаждения t (рис. 6) и скоростях фильтрации v_ϕ (рис. 7), полученные по формуле (45).

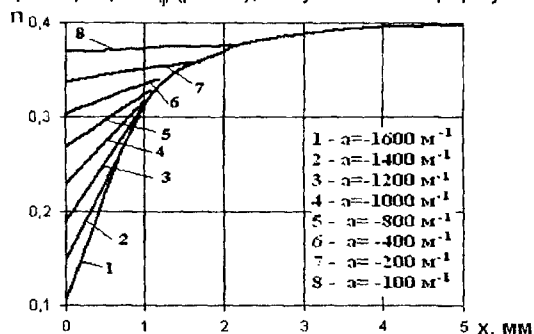


Рис. 5. Распределение пористости по сечению ФМ при $\Pi_0 = 0,4$; $C_0 = 10^{-4}$; $t = 25 \text{ с}$; $v_\phi = 0,1 \text{ м/с}$ и при различных значениях параметра a

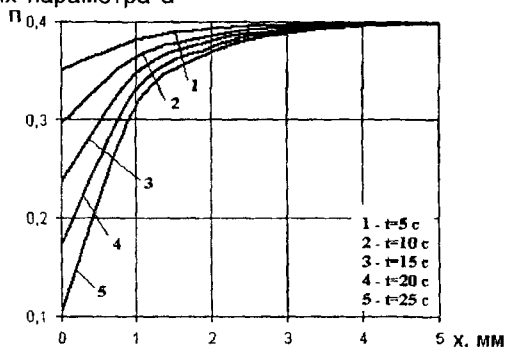


Рис. 6. Распределение пористости по сечению ФМ при $\Pi_0 = 0,4$; $C_0 = 10^{-4}$; $a = -1600 \text{ м}^{-1}$; $v_\phi = 0,1 \text{ м/с}$ в различные моменты времени t

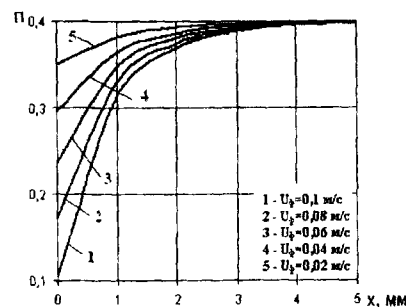


Рис. 7. Распределение пористости по сечению ФМ при $\Pi_0 = 0,4$; $C_0 = 10^{-4}$; $a = -1600 \text{ м}^{-1}$; $t = 25 \text{ с}$ и различных скоростях фильтрации

Проведенные расчеты показывают, что при глубинном осветлении осаждение частиц загрязнителя происходит неравномерно, в результате чего пористость ФМ при входе загрязнителя может существенно уменьшаться, приводя к снижению производительности всего ФМ в целом. Поэтому одним из путей решения проблемы повышения производительности и ресурса ФМ является поиск технических решений, заключающихся в создании ФМ с анизотропной структурой пор, у которых их размеры уменьшаются в направлении течения очищаемой жидкости.

Заключение

Наибольшее влияние на процесс осаждения частиц загрязнителя в ФМ оказывают механизмы касания и инерции. Под действием этих механизмов при глубинном фильтровании осаждение происходит неравномерно, что приводит к быстрому выходу ФМ из строя. Для повышения ресурса ФМ необходимо использование ФМ с анизотропной структурой пор, у которого поры со стороны входа потока имеют максимальный размер, а в направлении движения потока их размеры ступенчато или плавно уменьшаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фильтрующие материалы: перспективные области применения в агропромышленном комплексе и современные технологии получения / В.М. Капцевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2006. – 189 с.
2. Очистка и регенерация смазочных материалов в условиях сельскохозяйственного производства / В.М. Капцевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2007. – 232 с.
3. Витязь, П.А. Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления / П.А. Витязь, В.М. Капцевич, Р.А. Кусин. – Минск: НИИ ГМ с ОП, 1999. – 304 с.
4. Бродский, Г.С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин / Г.С. Бродский. – Москва: «Журнал «Горная промышленность», Издатель НПК «ГЕМОС Лтд.», 2003. – 360 с.
5. Удлер, Э.И. Повышение эффективности очистки нефтепродуктов в сельском хозяйстве средствами фильтрации / Э.И. Удлер. – Томск: Томский инженерно-строительный институт, 1988. – 124 с.
6. Gasper, Horst Handbuch der industriekker Fest / Flüssig-Filtration, hrsg von Horst Gasper. – Heidelberg: Hthig, 1990. – 307 p.
7. Herzig, J.P. Flow of suspensions through porous media / Herzig J.P., Leclerc D.M., Le Goff P. // Application to deep filtration. – Ind. Eng. Chem. – 1970. – V. 62. – № 5. – P. 8–35.
8. Удов, В.Н. Очистка промышленных газов фильтрами / В.Н. Удов, Б.И. Мяков. – Москва: Химия, 1970. – 320 с.
9. Le Goff, P. Etude sur modele du colmatage d'un milieu filtrant. Ecoulement d'une suspension de microspheres a travers un empilement de macrospheres / Le Goff P., Delachambre G. // Revue Francaise des Corps Gras. – 1965. – № 1. – P. 3–11.
10. Maroudas, A. Particle deposition in granular filter media / Maroudas A. // – Pt. II. – Filtr. Separ. – 1965–V. 2. – № 5 – P. 369–372.
11. Белов, С.В. Пористые металлы в машиностроении / С.В. Белов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 248 с.
12. Эйнштейн, А. Собрание научных трудов / А. Эйнштейн. – Москва: Наука, 1966. – Т. 3. – 632 с.
13. Грин, Х. Аэрозоли-пыли, дымы и туманы / Грин Х., Лейн В. – 2-е изд. – Ленинград: Химия. – 428 с.
14. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. – Москва: Издательство АН СССР, 1955. – 352 с.
15. Чен, Ч. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами / Чен Ч. // Успехи химии. – 1956. – Т. 25. – № 3. – С. 368–392.
16. Staimand C.J. Influence of Inertion on the process of Deposition In Granular media / Staimand C.J. // Trans.Inst.Ch.Eng. – 1950. – V. 28. – P. 130.
17. Стечкина, И.Б. Исследование в области волокнистых аэрозольных фильтров. I. Расчет диффузионного осаждения аэрозолей в волокнистых фильтрах / И.Б. Стечкина, Н.А. Фукс // Коллоидный журн. – 1967. – Т. 29. – № 2. – С. 260–263.
18. Кирш, А.А. Инерционное осаждение аэрозолей в модельных фильтрах при малых числах Рейнольдса / А.А. Кирш, И.Б. Стечкина // Коллоидный журн. – 1977. – Т. 39. – № 1. – С. 36–43.
19. Успенский, В.А. К расчету пылеулавливания в тканевых фильтрах / В.А. Успенский, Г.А. Ситницкий, Р.Г. Адамов // Инж.-физ. журнал. – 1975. – Т. 28. – С. 746–748.
20. Лаптев, А.М. Деформирование сферических частиц при уплотнении идеализированного пористого материала / А.М. Лаптев, А.Н. Ульянов // Порошковая металлургия. – 1984. – № 3. – С. 17–20.