

О фильтровании воды с высоким содержанием железа

(Представлено академиком НАН Украины В. Т. Гринченко)

Получено приближенное решение математической задачи физико-химического обезжелезивания воды, изначально содержащей преимущественно окисленное железо, на фильтрах с зернистой загрузкой, которое оказывается точным в отсутствие ионного железа. Зависимости, предназначенные для расчетов концентраций и потерь напора, проиллюстрированы рядом примеров с типичными исходными данными. Также они служат для обоснования технологических, конструктивных параметров и, прежде всего, длительности фильтроцикла на основании двух критериев.

Подземные воды в Украине нередко содержат излишне много железа в различных формах, что представляет серьезную опасность для здоровья людей. Поскольку во многих районах страны такие воды служат основным источником питьевого водоснабжения, то актуальным в настоящее время является вопрос их обезжелезивания. Одним из эффективных методов снижения концентрации железа в воде до нормативного значения признано фильтрование, которое реализуется на напорных и безнапорных фильтрах с пористой загрузкой. Динамика растворенного и дисперсного железа в естественных пористых средах и связанное с ней явление химического коагулянта стали предметом углубленных экспериментальных и теоретических исследований, например, в работах [1–5].

Вместе с тем большое внимание в последнее время уделялось и всестороннему изучению закономерностей поведения железа в водоочистных фильтрах с зернистой загрузкой [6–10]. И в первую очередь следует отметить монографию [1], в которой обстоятельно изложены как теоретические основы переноса и трансформации ионного и окисленного железа, так и данные обстоятельных экспериментальных исследований, а также представлены рекомендации по практическому использованию полученных приближенных решений и эмпирической информации. Следует, однако, заметить, что указанные решения непригодны для инженерных расчетов, если в исходной воде преобладает гидроксид железа. Подобное возможно при ее предварительной аэрации, продолжительном контакте с воздушной средой. Ниже получено эффективное решение базовой математической модели, которое следует применять именно при высоком содержании $\text{Fe}(\text{OH})_3$ в необработанной воде. В предельном же случае, когда ионы Fe^{2+} изначально отсутствуют, оно оказывается точным. Итак, основополагающая модель состоит из двух связанных блоков — осветлительного и фильтрационного. Первый включает следующие систему уравнений [1]:

$$n_e \frac{\partial C_i}{\partial t} + V \frac{\partial C_i}{\partial z} = -K_a C_i - K_s C_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = K_a C_i - K_d S_i, \quad (2)$$

$$V \frac{\partial C_h}{\partial z} + \frac{\partial S_h}{\partial t} = K_s C_i, \quad (3)$$

$$\frac{\partial S_h}{\partial t} = \alpha_0(S_m - S_h)C_h - \beta S_h + K_d S_i \quad (4)$$

и оператор граничных и начальных условий

$$z = 0, \quad C_i = C_{i0}; \quad C_h = C_{h0}; \quad (5)$$

$$t = 0, \quad S_i = S_i^0; \quad S_h = S_h^0. \quad (6)$$

Здесь C_i, C_h — массовые концентрации $\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}(\text{OH})_3$ в жидкой фазе загрузки; S_i, S_h — то же в твердой фазе; n_e — эффективная пористость; V — постоянная скорость фильтрования; K_a — константа скорости адсорбционного процесса; K_s, K_d — константы реакций окисления железа в растворе и твердой фазе; C_{i0}, C_{h0} — концентрации $\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}(\text{OH})_3$ в исходной воде; α_0 — приведенный коэффициент скорости прилипания взвешенных частиц гидроксида; β — коэффициент скорости отрыва осажденных частиц гидроксида; S_m — предельная концентрация осажденного железа.

Гидравлические аспекты действия слоя загрузки отражены в фильтрационном блоке, который включает уравнения

$$V = -k(S_h) \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (7)$$

$$k = k_0 f(S_h) \quad (8)$$

и граничное условие

$$z = L, \quad h = H_d, \quad (9)$$

где k, k_0 — коэффициенты фильтрации загрязненной и чистой загрузки; h — пьезометрический напор; H_d — напор на выходе из загрузки; L — ее высота.

Обобщение модели (1)–(9) достигается путем введения безразмерных переменных и параметров: $\bar{C}_{i,h} = C_{i,h}/(C_{i0} + C_{h0})$, $\bar{S}_{i,h} = S_{i,h}/S_m$, $\bar{z} = z/L$, $\bar{t} = Vt/(n_0L)$, $\bar{K}_{a,s} = LK_{a,s}/V$, $\bar{K}_d = n_0LK_d/V$, $\bar{\alpha}_0 = n_0LC_0\alpha_0/V$, $\bar{\beta} = n_0L\beta/V$, $\bar{n}_e = n_e/n_0$, $\psi = S_m/(n_0C_0)$, $\bar{k} = k/k_0$, $\bar{h} = (h - H_d)/\Delta h_0$, Δh_0 — потери напора в чистом слое загрузки, n_0 — его пористость. Тогда осветлительный блок принимает вид

$$\bar{n}_e \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial \bar{z}} = -(\bar{K}_a + \bar{K}_s)\bar{C}_i, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_i}{\partial \bar{t}} = \frac{\bar{K}_a}{\psi} \bar{C}_i - \bar{K}_d \bar{S}_i, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \bar{C}_h}{\partial \bar{z}} + \psi \frac{\partial \bar{S}_h}{\partial \bar{t}} = \bar{K}_s \bar{C}_i, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_h}{\partial \bar{t}} = \bar{\alpha}_0(1 - \bar{S}_h)\bar{C}_h - \bar{\beta} \bar{S}_h + \bar{K}_d \bar{S}_i; \quad (13)$$

$$\bar{z} = 0, \quad \bar{C}_i = \bar{C}_{i0}; \quad \bar{C}_h = \bar{C}_{h0}; \quad (14)$$

$$\bar{t} = 0, \quad \bar{S}_i = \bar{S}_i^0; \quad \bar{S}_h = \bar{S}_h^0. \quad (15)$$

Фильтрационный же блок в соответствии с рекомендациями [11, 12] будет

$$\bar{k}(\bar{S}_h) \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{z}} = -1, \quad (16)$$

$$\bar{k}(\bar{S}_h) = f(\bar{S}_h) = e^{-\bar{a}\bar{S}_h}; \quad (17)$$

$$\bar{z} = 1, \quad \bar{h} = 0, \quad (18)$$

где $\bar{a} = aS_m$, a — эмпирический коэффициент.

Решение уравнений (10), (11) при условиях (14), (15) выражается зависимостями

$$\bar{C}_i(\bar{z}) = \bar{C}_{i0} e^{-(\bar{K}_a + \bar{K}_s)\bar{z}}, \quad (19)$$

$$\bar{S}_i(\bar{z}, \bar{t}) = \frac{\bar{K}_a \bar{C}_{i0}}{\psi \bar{K}_d} e^{-(\bar{K}_a + \bar{K}_s)\bar{z}} (1 - e^{-\bar{K}_d \bar{t}}). \quad (20)$$

Связь \bar{C}_i со временем имеет место только в течение короткой начальной стадии фильтрования и потому может не приниматься во внимание. С учетом (19), (20) уравнения (12), (13) становятся следующими:

$$\frac{\partial \bar{C}_h}{\partial \bar{z}} + \psi \frac{\partial \bar{S}_h}{\partial \bar{t}} = \bar{K}_s \bar{C}_{i0} e^{-(\bar{K}_a + \bar{K}_s)\bar{z}}, \quad (21)$$

$$\frac{\partial \bar{S}_h}{\partial \bar{t}} - \bar{\alpha}_0 (1 - \bar{S}_h) \bar{C}_h + \bar{\beta} \bar{S}_h = \frac{\bar{K}_a \bar{C}_{i0}}{\psi} e^{-(\bar{K}_a + \bar{K}_s)\bar{z}} (1 - e^{-\bar{K}_d \bar{t}}). \quad (22)$$

Ввиду того, что

$$\frac{\partial \bar{C}_h}{\partial \bar{z}} \gg \bar{K}_s \bar{C}_{i0} e^{-(\bar{K}_a + \bar{K}_s)\bar{z}},$$

правой частью в уравнении (21) можно пренебречь. Тогда замена переменных

$$\bar{C}_h = \frac{\partial \Phi}{\partial \bar{t}}, \quad \bar{S}_h = -\frac{\partial \Phi}{\partial Z}, \quad \Phi = \frac{1}{\bar{\alpha}_0} \ln(u - \bar{\alpha}_0 Z - \bar{\beta} \bar{t}), \quad Z = \psi \bar{z} \quad (23)$$

позволяет свести систему уравнений (21), (22) к одному уравнению относительно введенной функции $u(Z, \bar{t})$, а именно,

$$\frac{1}{\bar{\alpha}_0 u} \frac{\partial^2 u}{\partial Z \partial \bar{t}} = \bar{\beta} - \frac{\bar{K}_a \bar{C}_{i0}}{\psi} e^{-\frac{\bar{K}_a + \bar{K}_s}{\psi} Z} (1 - e^{-\bar{K}_d \bar{t}}). \quad (24)$$

Граничное и начальное условия здесь следуют из уравнений

$$\frac{\partial \ln u}{\partial Z} = \bar{\alpha}_0 (1 - \bar{S}_h), \quad (25)$$

$$\frac{\partial \ln u}{\partial \bar{t}} = \bar{\alpha}_0 \bar{C}_h + \bar{\beta}. \quad (26)$$

В уравнениях (25), (26) последовательно полагается $\bar{t} = 0$ и $Z = 0$, а затем они интегрируются в соответствующих пределах. Таким образом, искомые условия принимают вид

$$u(Z, 0) = u(0, 0) e^{\bar{\alpha}_0 (1 - \bar{S}_h^0) Z}, \quad (27)$$

$$u(0, \bar{t}) = u(0, 0)e^{(\bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} + \bar{\beta})\bar{t}}. \quad (28)$$

Далее ввиду малости оставшегося после промывки фильтра осадка полагается $\bar{S}_h^0 = 0$. Учитывая плавный характер изменения искомых концентраций со временем, свободный член в уравнении (24) осредняется по расчетному периоду $[0, T]$. Тогда математическая задача относительно введенной функции $u(Z, \bar{t})$ включает уравнение

$$\frac{\partial^2 u}{\partial Z \partial \bar{t}} = \left(\bar{\alpha}_0 \bar{\beta} - \theta e^{-\frac{\bar{K}_a + \bar{K}_s}{\psi} Z} \right) u \quad (29)$$

и условия (27), (28), причем

$$\theta(T) = \frac{\bar{\alpha}_0 \bar{K}_a \bar{C}_{i0}}{\psi} \left(1 - \frac{1}{\bar{K}_d T} + \frac{e^{-\bar{K}_d T}}{\bar{K}_d T} \right).$$

После применения преобразования Лапласа задача относительно изображения $u_L(Z, p)$ примет вид

$$\frac{du_L}{dZ} - \frac{\bar{\alpha}_0 \bar{\beta} - \theta e^{-\frac{\bar{K}_a + \bar{K}_s}{\psi} Z}}{p} u_L = \frac{\tilde{\alpha}_0 u(0, 0)}{p} e^{\tilde{\alpha}_0 Z}, \quad (30)$$

$$\bar{u}_L(0, p) = \frac{u(0, 0)}{p - \bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} - \bar{\beta}}; \quad \tilde{\alpha}_0 = \bar{\alpha}_0 (1 - \bar{S}_h^0). \quad (31)$$

Решение задачи (30), (31) представляется в такой форме:

$$u_L(Z, p) = u(0, 0) e^{\frac{\varphi(Z, T)}{p}} \left(\frac{1}{p - \bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} - \bar{\beta}} + \bar{\alpha}_0 \int_0^Z e^{\tilde{\alpha}_0 \xi} \frac{e^{-\frac{\varphi(\xi, T)}{p}}}{p} d\xi \right), \quad (32)$$

где

$$\varphi(Z, T) = \bar{\alpha}_0 \bar{\beta} Z - \frac{\psi \theta(T)}{\bar{K}_a + \bar{K}_s} (1 - e^{-(\bar{K}_a + \bar{K}_s)Z}).$$

В результате обращения выражения (32) получено

$$\frac{u(\bar{z}, \bar{t}; T)}{u(0, 0)} = I_0(2\sqrt{\psi \bar{t} \varphi_1(\bar{z}, T)}) + (\bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} + \bar{\beta}) G_1(\bar{z}, \bar{t}; T) + \tilde{\alpha}_0 \psi G_2(\bar{z}, \bar{t}; T), \quad (33)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_1(\bar{z}, T) &= \bar{\alpha}_0 \bar{\beta} \bar{z} - \frac{\theta(T)}{\bar{K}_a + \bar{K}_s} [1 - e^{-(\bar{K}_a + \bar{K}_s)\bar{z}}], \\ G_1(\bar{z}, \bar{t}; T) &= \int_0^{\bar{t}} e^{(\bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} + \bar{\beta})\eta} I_0(2\sqrt{\psi \varphi_1(\bar{z}, T)(\bar{t} - \eta)}) d\eta, \\ G_2(\bar{z}, \bar{t}; T) &= \int_0^{\bar{z}} e^{\tilde{\alpha}_0 \psi \xi} I_0(2\sqrt{\psi \bar{t} [\varphi_1(\bar{z}, T) - \varphi_2(\xi, T)]}) d\xi. \end{aligned}$$

Искомые концентрации \bar{C}_h , \bar{S}_h связаны с найденной функцией $u(\bar{z}, \bar{t}; T)$ и ее производными следующим образом:

$$\bar{C}_h(\bar{z}, \bar{t}; T) = -\frac{\bar{\beta}}{\bar{\alpha}_0} + \frac{u_1(\bar{z}, \bar{t}; T)}{\bar{\alpha}_0 u(\bar{z}, \bar{t}; T)}, \quad (34)$$

$$\bar{S}_h(\bar{z}, \bar{t}; T) = 1 - \frac{u_2(\bar{z}, \bar{t}; T)}{\bar{\alpha}_0 \psi u(\bar{z}, \bar{t}; T)}. \quad (35)$$

Здесь

$$\frac{u_1(\bar{z}, \bar{t}; T)}{u(0, 0)} = (\bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} + \bar{\beta}) I_0(2\sqrt{\psi \bar{t} \varphi_1(\bar{z}, T)}) + (\bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} + \bar{\beta})^2 G_1(\bar{z}, \bar{t}; T) + \psi G_3(\bar{z}, \bar{t}; T),$$

$$\frac{u_2(\bar{z}, \bar{t}; T)}{u(0, 0)} = \tilde{\alpha}_0 \psi I_0(2\sqrt{\psi \bar{t} \varphi_1(\bar{z}, T)}) + \psi \varphi_2(\bar{z}, T) G_1(\bar{z}, \bar{t}; T) + (\tilde{\alpha}_0 \psi)^2 G_2(\bar{z}, \bar{t}; T),$$

$$\varphi_2(\bar{z}, T) = \bar{\alpha}_0 \bar{\beta} - \theta(T) e^{-(\bar{K}_a + \bar{K}_s) \bar{z}},$$

$$\begin{aligned} G_3(\bar{z}, \bar{t}; T) &= \int_0^{\bar{z}} e^{\tilde{\alpha}_0 \psi \xi} \varphi_2(\xi, T) I_0 \left(2\sqrt{\psi \bar{t} [\varphi_1(\bar{z}, T) - \varphi_1(\xi, T)]} \right) d\xi = \\ &= \bar{\alpha}_0 \bar{\beta} G_2(\bar{z}, \bar{t}; T) - \theta(T) G_4(\bar{z}, \bar{t}; T), \end{aligned}$$

$$G_4(\bar{z}, \bar{t}; T) = \int_0^{\bar{z}} e^{(\tilde{\alpha}_0 \psi - \bar{K}_a - \bar{K}_s) \xi} I_0(2\sqrt{\psi \bar{t} [\varphi_1(\bar{z}, T) - \varphi_1(\xi, T)]}) d\xi.$$

Окончательный вид формулы (34), (35) принимают после отождествления T с \bar{t} и ряда преобразований, а именно,

$$\begin{aligned} \bar{C}_h(\bar{z}, \bar{t}) &= \\ &= \frac{\bar{C}_{h0} I_0(2\sqrt{\psi \bar{t} \varphi_1(\bar{z}, T)}) + \bar{C}_{h0} (\bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} + \bar{\beta}) G_1(\bar{z}, \bar{t}) + \bar{\beta} \psi \bar{S}_h^0 G_2(\bar{z}, \bar{t}) - \psi \tilde{\theta}(\bar{t}) G_4(\bar{z}, \bar{t})}{I_0(2\sqrt{\psi \bar{t} \varphi_1(\bar{z}, T)}) + (\bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} + \bar{\beta}) G_1(\bar{z}, \bar{t}) + \tilde{\alpha}_0 \psi G_2(\bar{z}, \bar{t})}, \quad (36) \end{aligned}$$

$$\bar{S}_h(\bar{z}, \bar{t}) = \frac{\bar{S}_h^0 I_0(2\sqrt{\psi \bar{t} \varphi_1(\bar{z}, \bar{t})}) + [\bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} + \tilde{\theta}(\bar{t}) e^{-(\bar{K}_a + \bar{K}_s) \bar{z}}] G_1(\bar{z}, \bar{t}) + \bar{\alpha}_0 \psi \bar{S}_h^0 G_2(\bar{z}, \bar{t})}{I_0(2\sqrt{\psi \bar{t} \varphi_1(\bar{z}, \bar{t})}) + (\bar{\alpha}_0 \bar{C}_{h0} + \bar{\beta}) G_1(\bar{z}, \bar{t}) + \tilde{\alpha}_0 \psi G_2(\bar{z}, \bar{t})}. \quad (37)$$

В частном случае $\bar{C}_{h0} = 1$ ($\bar{C}_{i0} = 0$) решение задачи (24), (27), (28) становится точным. Решение фильтрационного блока в общем случае представляется зависимостью

$$\tilde{h}(\bar{z}, \bar{t}) = \int_0^{\bar{z}} \frac{d\bar{\xi}}{f(\bar{S}_h(\bar{\xi}, \bar{t}))}, \quad (38)$$

так что относительные потери напора в слое загрузки составят

$$\Delta \bar{h}(\bar{t}) = \tilde{h}(1, \bar{t}) = \int_0^1 \frac{d\bar{z}}{f(\bar{S}_h(\bar{z}, \bar{t}))} = \int_0^1 e^{\bar{a} \bar{S}_h(\bar{z}, \bar{t})} d\bar{z}. \quad (39)$$

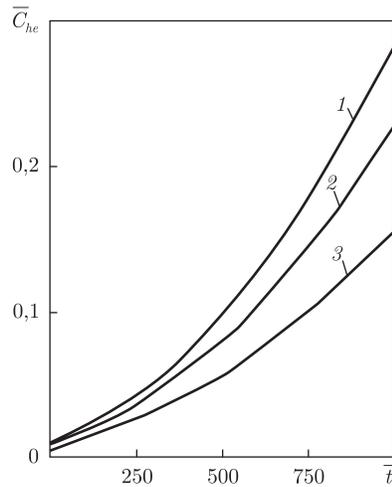


Рис. 1. Рост относительной концентрации гидроксида железа в фильтрате со временем ($C_{h0} > C_{i0}$): 1 — $\bar{C}_{h0} = 1$; 2 — $\bar{C}_{h0} = 0,9$; 3 — $\bar{C}_{h0} = 0,75$

Количественный анализ выполнен на целом ряде примеров с типичными исходными данными для иллюстрации выведенных зависимостей и установления закономерностей изменения важных физико-химических характеристик. Предметом вычислений стали относительные величины, а именно, концентрация окисленного железа во взвешенном (\bar{C}_h) и осажденном (\bar{S}_h) состоянии, потери напора в слое загрузки ($\Delta\bar{h}$) и технологические времена ($\bar{t}_p, \bar{t}_h, \bar{t}_f$). В качестве опорных приняты следующие значения безразмерных модельных параметров: 0,0015 — для массообменных коэффициентов $\bar{\alpha}_0, \bar{\beta}$; 8, 0,2 и 0,003 — для констант \bar{K}_a, \bar{K}_s и \bar{K}_d ; 0 и 0,2 — для начальных концентраций \bar{S}_i^0 и \bar{S}_h^0 , а также 3000 — для параметра ψ . Определялись они путем комбинирования реальных средних значений исходных размерных параметров.

Характер пространственно-временных изменений концентраций и гидравлического сопротивления загрузки в случае $C_{h0} \gg C_{i0}$ аналогичен подобным изменениям при фильтровании суспензий с нелинейной массообменной кинетикой, которые рассматривались, например, в работах [13, 14]. Так, выходная концентрация взвешенных частиц гидроксида, как видно из рис. 1, ускоренно растет со временем от соответствующего малого начального значения. Последнее может быть точно найдено путем расчета прохождения через слой загрузки фронта загрязнения. В частности, при $\bar{C}_{h0} = 1$ начальное выходное значение \bar{C}_e составляет $e^{-\bar{\alpha}_0\psi}$ и здесь равно 0,011. Естественно, что качество фильтрата ухудшается медленнее, если в осветляемой воде ионы Fe^{2+} присутствовали и таким образом в удалении железа также принимал участие адсорбционный процесс (кривые 2, 3). От соотношения между C_{h0} и C_{i0} также существенно зависит формирование осадка (рис. 2). При заданных исходных данных темп накопления осадка заметно больше вблизи поверхности загрузки, если $\bar{C}_{h0} = 0,75, \bar{C}_{i0} = 0,25$. Тогда адсорбция двухвалентного железа и последующее его медленное окисление обеспечивают здесь более интенсивное образование осадка. Обратная картина на заключительной стадии фильтрования наблюдается в основной, нижней части загрузки, которая кольматируется намного сильнее уже в случае $C_{h0} = 1$.

На основании результатов вычислений концентрации S_h и с привлечением формулы (39) определялись текущие общие потери напора в слое загрузки (рис. 3). Теперь варьировались и показатель \bar{a} , и состав необработанной воды. Тем самым удалось получить более полное

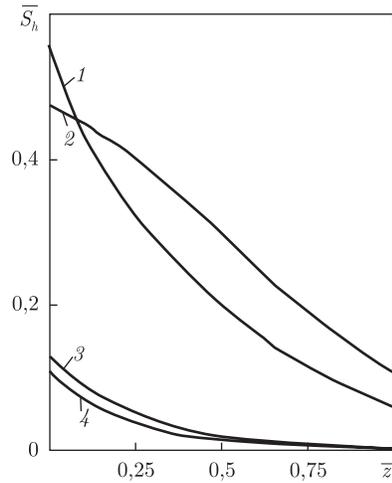


Рис. 2. Профили относительной концентрации осажденного железа ($C_{h0} > C_{i0}$): 1, 4 — $\bar{C}_{h0} = 0,75$; 2, 3 — $\bar{C}_{h0} = 1$; 1, 2 — $\bar{t} = 1000$; 3, 4 — $\bar{t} = 100$

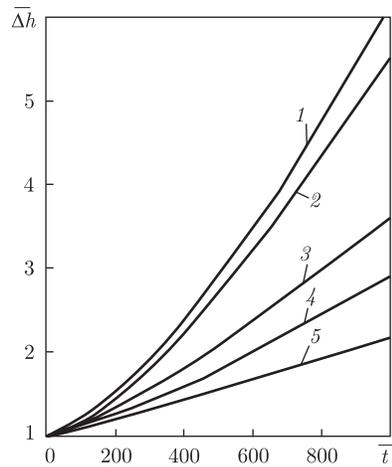


Рис. 3. Рост относительных потерь напора в слое загрузки со временем ($C_{h0} > C_{i0}$): 1–3, 5 — $\bar{C}_{i0} = 0$; 4 — $\bar{C}_{i0} = 0,25$; 1, 3–5 — $\bar{\alpha}_0 = 0,0015$; 2 — $\bar{\alpha}_0 = 0,003$; 1 — $\bar{\alpha} = 5,5$; 2–4 — $\bar{\alpha} = 4$; 5 — $\bar{\alpha} = 2,5$

представление о гидродинамических аспектах работы специализированных водоочистных фильтров. При принятом соотношении между константами реакций увеличение содержания ионов Fe^{2+} в связи с их медленным окислением способствует более плавному росту гидравлического сопротивления (кривые 3, 4). Очевидно, что улучшение адгезионных свойств фильтрующего материала при высоком начальном содержании гидроксида железа ведет к его усиленному отложению в поровом пространстве (кривые 2, 3).

Приведенные выше расчетные зависимости позволяют надежно определять длительность фильтроцикла \bar{t}_f и другие технологические времена на основании предъявляемого к работе фильтра ряда требований. В соответствии с ними должно обеспечиваться высокое качество осветления воды, высокая производительность фильтровального сооружения и эффективность промывки. Таким образом, содержание взвешенного вещества в фильтрате не должно превышать нормативное значение C_* , а потери напора быть больше Δh_* .

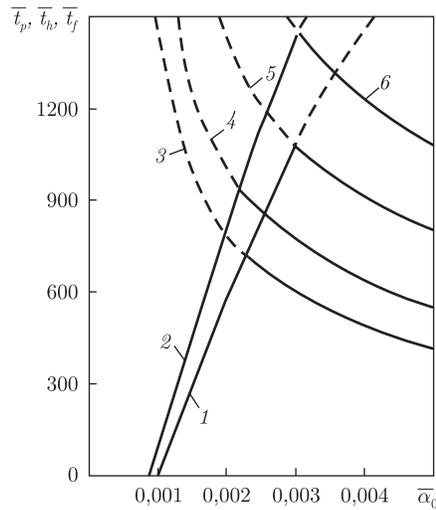


Рис. 4. Зависимости $\bar{t}_p(\bar{\alpha}_0)$, $\bar{t}_h(\bar{\alpha}_0)$, $\bar{t}_f(\bar{\alpha}_0)$ ($C_{h0} > C_{i0}$):

1, 2 – \bar{t}_p ; 3–6 – \bar{t}_h ; 1, 3, 5 – $\bar{C}_{h0} = 1$; 2, 4, 6 – $\bar{C}_{h0} = 0,75$; 3, 4 – $\bar{\alpha} = 5,5$; 5, 6 – $\bar{\alpha} = 4$

Соответствующие относительные моменты достижения \bar{C}_* и $\Delta\bar{h}_*$ (\bar{t}_p , \bar{t}_h) следует вычислять на основании формул (34), (35) и (37). Результаты расчетов \bar{t}_p , \bar{t}_h , \bar{t}_f при разных значения \bar{C}_{h0} и $\bar{\alpha}$, $\Delta\bar{h}_* = 10$ и $\bar{C}_* = 0,05$ показаны на рис. 4. Ломаные сплошные линии 1–3, 1–5 и 2–4 и 2–6 описывают функциональную связь искомого \bar{t}_f с коэффициентом $\bar{\alpha}_0$. В каждой конкретной ситуации существует строго определенное значение $\bar{\alpha}_0$, при котором ключевой технологический параметр достигает максимального значения.

Полученное решение математической задачи обезжелезивания воды с высоким содержанием окисленного железа является эффективным инструментом для установления закономерностей изменения физико-химических и гидравлических характеристик фильтрования. Оно обеспечивает рациональный выбор конструктивных и технологических параметров, способствует максимальному продлению работы фильтра до его очередной промывки.

1. Тугай А. М., Олійник О. Я., Тугай Я. А. Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу. – Харків: ХНАМГ, 2004. – 240 с.
2. Семеринов Е. С., Векшинская Г. Н. Влияние железистых соединений на работу закрытого дренажа // Вопросы проектирования бестраншейного дренажа. – Ленинград: СевНИИГиМ, 1982. – С. 122–128.
3. Труфанов А. И. Формирование железистых подземных вод. – Москва: Наука, 1982. – 297 с.
4. Гютюнова Ф. И. Физико-химические процессы в подземных водах. – Москва: Наука, 1976. – 283 с.
5. Melikhov I. V., Kozlovskaya E. D., Berliner L. B., Prokofiev V. A. Kinetics of hydroxide Fe(III) solid phase formation // J. Colloid Interface Sci. – 1987. – **117**. – P. 1–9.
6. Лукашевич О. Д., Патрушев Е. И. Очистка воды от соединений железа и марганца: проблемы и перспективы // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2004. – № 1. – С. 66–70.
7. Олійник О. Я., Садчиков О. О. Теоретичні дослідження знезалізнєння води на двошарових фільтрах // Пробл. водопостачання, водовідведення та гідраліки. – Київ: КНУБА, 2013. – Вип. 21. – С. 14–22.
8. Орлов В. О. Знезалізнєння підземних вод спрощеною аерацією та фільтруванням. – Рівне: НУВГП, 2008. – 158 с.
9. Тугай Я. А. Моделювання процесів знезалізнєння на двошарових фільтрах // Коммунальное хозяйство городов. – Вып. 93. – Київ: Техніка, 2010. – С. 266–274.
10. Michalakos G. D., Nieva J. M., Vayenas D. V., Lyberatos G. Removal of iron from potable water using a trickling filter // Water Res. – 1997. – **31**, No 5. – P. 991–996.

11. *Киселев С. К.* Изменение фильтрационных свойств загрузки фильтра при обезжелезивании воды // Мелиорация и водное хозяйство. – Киев: Урожай, 1997. – Вып. 84. – С. 190–194.
12. *Садчиков О. О.* Моделювання і розрахунки втрат напору у двошаровому фільтрі при незалізненні води // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – Вип. 13. – Київ: КНУБА, 2013. – С. 18–23.
13. *Алексеев В. С., Коммунар Г. М., Шершук Б. С.* Массоперенос в водонасыщенных горных породах. Итоги науки и техники. Сер. Гидрогеология, инженерная геология. – Москва: ВИНТИ, 1989. – 143 с.
14. *Поляков В. Л.* Фильтрация суспензий через многослойную загрузку при нелинейной кинетике массообмена. 1. Теория // Химия и технология воды. – 2011. – **33**, № 1. – С. 3–18.

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Поступило в редакцию 26.05.2014

В. Л. Поляков

Про фільтрування води з високим вмістом заліза

Одержано наближений розв'язок математичної задачі фізико-хімічного незалізнення води, що містить переважно окислене залізо, на фільтрах із зернистим завантаженням, який виявляється точним у відсутності іонів заліза. Запропоновані для розрахунків концентрацій і втрат напору залежності проілюстровано прикладами з типовими вихідними даними. Також вони сприяють обґрунтуванню технологічних, конструктивних параметрів і, перш за все, тривалості фільтроциклу на основі двох критеріїв.

V. L. Polyakov

On the deep-bed filtration of water with high iron content

An approximate solution, which becomes exact in absence of iron ions, of the mathematical task of the physico-chemical iron removal from water with mainly ferric hydroxide particles at filter grain media is obtained. Dependences for calculating the concentrations and the head loss are illustrated by a number of examples with typical original information. The dependences promote the substantiation of technological and design parameters, first of all, the run time, on the basis of two criteria.