

ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВАНИЯ СУСПЕНЗИИ ЧЕРЕЗ ДВУХСЛОЙНУЮ ЗАГРУЗКУ ПРИ ЛИНЕЙНОЙ КИНЕТИКЕ МАССООБМЕНА

Получено простое приближенное решение математической задачи фильтрации малоконцентрированной суспензии через двухслойную пористую загрузку при линейной кинетике массообмена. Проведено его сопоставление с известным строгим решением на многочисленных примерах расчета физико-химических характеристик и технологических параметров, показавшее высокую точность предложенных для практики водоочистки формул.

Ключевые слова: двухслойная загрузка, линейный массообмен, моделирование, суспензия, фильтр, фильтрование.

Введение. Для продления работы фильтровальных установок и, тем самым, удешевления доочистки мутных вод широко применяются фильтры со слоистой пористой (зернистой) загрузкой, зачастую двухслойной [1 – 4]. Менее эффективные сорбционные свойства ее верхнего слоя при нисходящей фильтрации способствуют ослабленному (в сравнении с традиционными однородными хорошосорбирующими загрузками) осаждению частиц взвеси в нем и усиленному – в нижнем слое. В результате незначительно увеличивается проскок частиц суспензии, но вместе с тем за счет более равномерного распределения осадка по высоте загрузки потери напора в ней существенно снижаются. При этом рациональнее используется энергетический ресурс фильтра и повышается эффективность его работы. На практике фильтрование осуществляется в двух режимах – с постоянной и убывающей скоростью (расходом) v . Преимущественно реализуется первый режим с помощью специальных регуляторов скорости.

Постановка и решение математической задачи. В комплексе физико-химических процессов, протекающих в загрузке при осветлении суспензии, ключевую роль играет массообмен между твердой и жидкой фазами, который, согласно [5], включает процессы адгезии взвешенных и отрыва прилипших частиц. Для его описания используют уравнение линейной кинетики, которое применительно к i -тому слою ($i = 1, 2$) имеет следующий вид:

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = \alpha_i C_i - \beta_i S_i, \quad (1)$$

где C_i, S_i – объемные концентрации взвеси и осажденных частиц суспензии; α_i, β_i – коэффициенты скоростей прилипания и отрыва частиц. Массоперенос в i -том слое с учетом небольшого количества примеси в доочищаемой воде, низкой скорости фильтрации и большой продолжительности фильтроцикла может характеризоваться уравнением

$$v \frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{\partial S_i}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

При его выводе принималась система допущений, что позволило, в частности, пренебречь диффузионным переносом, локальными изменениями во времени содержания примеси. Достаточно полно эта система изложена и обоснована в специальной литературе, например [6, 7]. При неизменном количестве взвеси в исходной суспензии, изначально чистой загрузке принимаются следующие начальные и граничные условия:

$$t = 0, S_i = 0; \quad z = 0, C_1 = C_0; \quad z = L_1, C_1 = C_2; \quad (3)$$

где L_1 – мощность верхнего слоя; вертикальная координатная ось с началом на входе в загрузку направлена вниз. Помимо блока (1) – (3), служащего для анализа поведения частиц суспензии, общая математическая модель также содержит и блок, формально отражающий основные особенности динамики жидкости [8]. Блок включает:

уравнение движения

$$v = -k_i (S_{di}) \frac{\partial h_i}{\partial z}, \quad (4)$$

зависимость коэффициента фильтрации от объемной концентрации осадка S_{di}

$$k_i = k_{0i} f(S_{di}) \quad (5)$$

и соотношение между концентрациями S_{di}, S_i

$$S_{di} = \gamma_i S_i. \quad (6)$$

Так как скорость v известна, то для завершения постановки задачи достаточно еще задать такие же условия

$$z = L_1, h_1 = h_2; z = L, h_2 = H_d. \quad (7)$$

Здесь h_1, h_2 – напор в верхнем и нижнем слоях загрузки, k_{0i} – исходный коэффициент фильтрации, γ_1 – эмпирический коэффициент, L – высота загрузки, H_d – напор на выходе из загрузки. Коэффициент γ_1 , согласно (6), показывает доленое содержание в гелеподобном осадке частиц суспензии и связанной воды. Достоверность расчетов потерь напора во многом зависит от аккуратности его экспериментального определения. Строго говоря, коэффициент тесно связан с концентрацией S [9], но в первом приближении его можно считать постоянным. Скорректированные с учетом этого фактора расчетные формулы и оценки его значимости для двух основных режимов эксплуатации фильтров приведены в [10]. В данной работе γ является константой, за исключением специального случая однородной загрузки с меняющимися в серии примеров сорбционными свойствами, когда γ рассматривается как линейная функция от S .

Вследствие постоянства скорости v и несущественности диффузионного механизма массопереноса сформулированную задачу можно решать поэтапно. На первом этапе рассматривается поведение частиц суспензии в верхнем слое, на втором – в нижнем слое, на третьем – предметом изучения становится динамика жидкости и потери напора. Известно строгое решение задачи (1) – (7) в общем случае многослойной загрузки [11]. С практической точки зрения, серьезным недостатком существующих точных решений подобных задач является их сложная интегральная форма. Чтобы облегчить использование теоретических разработок по фильтрованию в приложениях, в работе [12] было построено простое и очень близкое к точному решение аналогичной задачи, но для однородной загрузки. Используя такой же прием частичного осреднения и указанное решение, можно найти эффективное решение задачи (1) – (7). Но прежде конкретизируется вид зависимости $f_i(S_{di})$ [13, 14] и постановка данной задачи преобразуется в связи с введением относительных переменных и параметров, поэтому

$$\frac{\partial \bar{S}_i}{\partial t} = \bar{\alpha}_i \bar{C}_i - \bar{\beta}_i \bar{S}_i, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{C}_i}{\partial z} + \frac{\partial \bar{S}_i}{\partial t} = 0, \quad (9)$$

$$\bar{k}_i(\bar{S}_i) \frac{\partial \tilde{h}_i}{\partial \bar{z}} = -1, \quad (10)$$

$$\bar{k}_i = \bar{k}_{i0} \left[1 - \left(\frac{\gamma_i C_0 \bar{S}_i}{\bar{n}_{0i}} \right)^{m_i} \right]^3; \quad (11)$$

$$\bar{t} = 0, \bar{S}_i = 0; \quad \bar{z} = 0, \bar{C}_1 = 1; \quad \bar{z} = \bar{L}_1, \bar{C}_1 = \bar{C}_2; \quad (12)$$

$$\bar{z} = \bar{L}_1, \tilde{h}_1 = \tilde{h}_2; \quad \bar{z} = 1, \tilde{h}_2 = 0. \quad (13)$$

Здесь $\bar{S}_i = \frac{S_i}{n_{0i} C_0}$, $\bar{C}_i = \frac{C_i}{C_0}$, $\bar{t} = \frac{vt}{n_{01} L}$, $\bar{z} = \frac{z}{L}$, $\bar{\alpha}_i = \frac{\alpha_i L}{v}$, $\bar{\beta}_i = \frac{\beta_i n_{01} L}{v}$,

$\bar{k}_i = \frac{k_i}{k_{01}}$, $\tilde{h}_i = \frac{h_i - H_d}{\Delta h_0}$, $\bar{n}_{0i} = \frac{n_{0i}}{n_{01}}$, $\bar{L}_1 = \frac{L_1}{L}$, n_{0i} – пористость чистого i -

того слоя, следовательно, $\bar{n}_{01} = 1$ (как и $\bar{k}_{10} = 1$), Δh_0 – потери напора в чистой загрузке, которые можно вычислить по формуле

$$\Delta h_0 = v \left(\frac{L - L_1}{k_{02}} + \frac{L_1}{k_{01}} \right).$$

На первом из вышеперечисленных этапов установлены закономерности изменения концентраций в верхнем слое в соответствии с [10]:

$$\bar{C}_1 = 2e^{\frac{2\bar{\alpha}_1 \bar{z}}{2+\bar{\beta}_1 \bar{t}}} - e^{-\bar{\alpha}_1 \bar{z}}, \quad \bar{S}_1 = \frac{2\bar{\alpha}_1 \bar{t}}{2+\bar{\beta}_1 \bar{t}} e^{-\frac{2\bar{\alpha}_1 \bar{z}}{2+\bar{\beta}_1 \bar{t}}}. \quad (14)$$

Из (3) и (14) вытекает условие на границе между слоями

$$\bar{z} = \bar{L}_1, \quad \bar{C}_2 = \bar{C}_{1e}(\bar{t}) = 2e^{-\frac{2\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1}{2+\bar{\beta}_1 \bar{t}}} - e^{-\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1}. \quad (15)$$

Оно позволяет определить искомые концентрации уже в нижнем слое и, что особенно важно, содержание взвеси в фильтрате.

В первую очередь, \bar{C}_2 выражается через \bar{S}_2 , согласно (8), (9), следующим образом:

$$\bar{C}_2(\bar{z}, \bar{t}) = \bar{C}_{1e}(\bar{t}) e^{-\bar{\alpha}_2(\bar{z}-\bar{L}_1)} + \bar{\beta}_2 \int_{\bar{L}_1}^{\bar{z}} e^{\bar{\alpha}_2(\xi-\bar{z})} \cdot \bar{S}_2(\xi, \bar{t}) d\xi. \quad (16)$$

Далее выполняется частичное осреднение интенсивностей процессов массообмена, а по сути – искомым концентраций по расчетному периоду $[0, T]$:

$$\bar{C}_{2c}(\bar{z}, T) = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{C}_2(\bar{z}, \bar{t}) d\bar{t}, \quad \bar{S}_{2c}(\bar{z}, T) = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{S}_2(\bar{z}, \bar{t}) d\bar{t}. \quad (17)$$

Таким образом, в задачу вводится параметр T , который в операциях интегрирования и дифференцирования считается постоянной величиной, а в окончательных расчетных формулах уже рассматривается как переменная и отождествляется с \bar{t} . В результате интегрирования (8) с учетом (16), (17) получено:

$$\begin{aligned} \bar{S}_2(\bar{z}, \bar{t}; T) = & \left[\bar{\alpha}_2 e^{-\bar{\alpha}_2(\bar{z}-\bar{L}_1)} \cdot F(T) + \right. \\ & \left. + \bar{\alpha}_2 \bar{\beta}_2 \int_{\bar{L}_1}^{\bar{z}} e^{\bar{\alpha}_2(\xi-\bar{t})} \bar{S}_{2c}(\xi, T) d\xi - \bar{\beta}_2 \bar{S}_{2c}(\bar{z}, T) \right] \bar{t}, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} F(T) = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{C}_{1e}(\bar{t}) d\bar{t} = \frac{2}{\bar{\beta}_1 T} & \left\{ (2 + \bar{\beta}_1 T) e^{-\frac{2\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1}{2 + \bar{\beta}_1 T}} - 2e^{-\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1} + \right. \\ & \left. + 2\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1 \left[Ei(-\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1) - Ei\left(-\frac{2\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1}{2 + \bar{\beta}_1 T}\right) \right] \right\} e^{-\bar{\alpha}_1 \bar{L}_1}, \end{aligned} \quad (19)$$

Интегральная показательная функция $Ei(-x)$ детально затабулирована [15] и имеет вид $Ei(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-\xi}}{\xi} d\xi$. Для вывода уравнения относительно \bar{S}_{2c} обе части уравнения (18) осредняются аналогичным образом:

$$\bar{S}_{2C}(\bar{z}, T) = \left[\bar{\alpha}_2 e^{-\bar{\alpha}_2(\bar{z}-\bar{L}_1)} \cdot F(T) + \bar{\alpha}_2 \bar{\beta}_2 \int_{\bar{L}_1}^{\bar{z}} e^{\bar{\alpha}_2(\xi-\bar{z})} \bar{S}_{2C}(\xi, T) d\xi - \bar{\beta}_2 \bar{S}_{2C}(\bar{z}, T) \right] \frac{T}{2}.$$

Чтобы свести интегральное уравнение (20) к дифференциальному, ввели замену:

$$y = \int_{\bar{L}_1}^{\bar{z}} e^{\bar{\alpha}_2 \xi} \bar{S}_{2C}(\xi, T) d\xi, \quad \frac{dy}{d\bar{z}} = e^{\bar{\alpha}_2 \bar{z}} \bar{S}_{2C}(\bar{z}, T). \quad (20)$$

$$(21)$$

Тогда уравнение (21) относительно y можно записать в виде

$$\left(1 + \frac{\bar{\beta}_2 T}{2} \right) \frac{dy}{d\bar{z}} - \frac{\bar{\alpha}_2 \bar{\beta}_2 T}{2} y = \frac{\bar{\alpha}_2 T}{2} e^{\bar{\alpha}_2 \bar{L}_1} F(T). \quad (22)$$

К нему присоединяется в соответствии с (21) условие

$$\bar{z} = \bar{L}_1, \quad y = 0. \quad (23)$$

Решение (22), (23) дает

$$y(\bar{z}, T) = \frac{e^{\bar{\alpha}_2 \bar{L}_1} F(T)}{\bar{\beta}_2} \left[e^{\frac{\bar{\alpha}_2 \bar{\beta}_2 T}{2 + \bar{\beta}_2 T} (\bar{z} - \bar{L}_1)} - 1 \right], \quad (24)$$

и, следовательно,

$$\bar{S}_{2C}(\bar{z}, T) = \frac{1}{2} \psi T F(T) e^{-\psi(\bar{z}-\bar{L}_1)}, \quad (25)$$

где $\psi(T) = \frac{2\bar{\alpha}_2}{2 + \bar{\beta}_2 T}$.

Далее из (18) с учетом (25) находим:

$$\bar{S}_2(\bar{z}, \bar{t}; T) = \psi \bar{t} F(T) e^{-\psi(\bar{z}-\bar{L}_1)}. \quad (26)$$

В результате перехода в (26) от T к \bar{t} формула для расчета \bar{S}_2 приобретает вид:

$$\bar{S}_2(\bar{z}, \bar{t}) = \frac{2\bar{\alpha}_2 \bar{t}}{2 + \beta_2 \bar{t}} F(\bar{t}) e^{-\frac{2\bar{\alpha}_2(\bar{z} - \bar{L}_1)}{2 + \beta_2 \bar{t}}}, \quad (27)$$

где $F(\bar{t})$ представлена формулой (19), в которой T формально заменяется на \bar{t} . Расчетную формулу для $\bar{C}_2(\bar{z}, \bar{t})$ можно вывести из (16) с учетом (27):

$$\bar{C}_2(\bar{z}, \bar{t}) = 2F(\bar{t}) e^{-\frac{2\bar{\alpha}_2}{2 + \beta_2 \bar{t}}(\bar{z} - \bar{L}_1)} + [\bar{C}_{1e}(\bar{t}) - 2F(\bar{t})] e^{-\bar{\alpha}_2(\bar{z} - \bar{L}_1)}. \quad (28)$$

Чтобы получить закономерность роста относительной объемной концентрации взвеси на выходе из загрузки, достаточно в (28) положить $\bar{z} = 1$. На основании (28) также легко определить важный технологический параметр – относительное время защитного действия загрузки \bar{t}_p . Его значение находится подбором и должно удовлетворить уравнение

$$\bar{C}_{2e}(\bar{t}_p) = \bar{C}_2(1, \bar{t}_p) = \bar{C}_*, \quad (29)$$

где \bar{C}_* – относительная предельно допустимая выходная концентрация взвеси. Очевидно, что при $\bar{t} > \bar{t}_p$ качество водоочистки уже не отвечает санитарным нормам, поэтому не позже чем в момент времени \bar{t}_p необходимо начинать промывку фильтра.

Сначала устанавливаются относительные потери напора в отдельных слоях загрузки. С этой целью путем решения уравнений (10) при условиях (13) находим выражения для приведенных напоров в обоих слоях:

$$\tilde{h}_1(\bar{z}, \bar{t}) = \int_{\bar{z}}^{\bar{L}_1} \frac{d\bar{z}}{\bar{k}_1(\bar{S}_1(\bar{z}, \bar{t}))} + \frac{1}{k_{02}} \int_{\bar{L}_1}^1 \frac{d\bar{z}}{\bar{k}_2(\bar{S}_2(\bar{z}, \bar{t}))}, \quad (30)$$

$$\tilde{h}_2(\bar{z}, \bar{t}) = \int_{\bar{z}}^1 \frac{d\bar{z}}{\bar{k}_2(\bar{S}_2(\bar{z}, \bar{t}))}. \quad (31)$$

Из (30), (31) вытекает, что указанные потери в первом слое $\Delta\bar{h}_1$ с учетом (11) составят:

$$\Delta\bar{h}_1 = \int_0^{\bar{L}_1} \frac{d\bar{z}}{\left\{1 - \left[\gamma_1 C_0 \bar{S}_1(\bar{z}, \bar{t})\right]^{m_1}\right\}^3} = \frac{1}{\lambda_{12}} \left\{ \ln \frac{e^{\lambda_{12}\bar{L}_1} - \lambda_{11}}{1 - \lambda_{11}} - 2\lambda_{11} \left(\frac{1}{e^{\lambda_{12}\bar{L}_1} - \lambda_{11}} - \frac{1}{1 - \lambda_{11}} \right) - \frac{\lambda_{11}^2}{2} \left[\frac{1}{(e^{\lambda_{12}\bar{L}_1} - \lambda_{11})^2} - \frac{1}{(1 - \lambda_{11})^2} \right] \right\}, \quad (32)$$

а во втором слое потери $\Delta\bar{h}_2$ следующие:

$$\Delta\bar{h}_2 = \frac{1}{\bar{k}_{02}} \int_{\bar{L}_1}^1 \frac{d\bar{z}}{\left\{1 - \left[\frac{\gamma_2 C_0}{\bar{n}_{02}} \bar{S}_2(\bar{z}, \bar{t})\right]^{m_2}\right\}^3} = \frac{1}{\bar{k}_{02} \lambda_{22}} \left\{ \ln \frac{e^{\lambda_{22}} - \lambda_{21}}{1 - \lambda_{21}} - 2\lambda_{21} \left(\frac{1}{e^{\lambda_{22}} - \lambda_{21}} - \frac{1}{e^{\lambda_{22}\bar{L}_1} - \lambda_{21}} \right) - \frac{\lambda_{21}^2}{2} \left[\frac{1}{(e^{\lambda_{22}} - \lambda_{21})^2} - \frac{1}{(e^{\lambda_{22}\bar{L}_1} - \lambda_{21})^2} \right] \right\}. \quad (33)$$

Здесь

$$\lambda_{11} = \left(\frac{2\bar{\alpha}_1 \gamma_1 C_0 \bar{t}}{2 + \bar{\beta}_1 \bar{t}} \right)^{m_1}, \quad \lambda_{12} = \frac{2\bar{\alpha}_1 m_1}{2 + \bar{\beta}_1 \bar{t}},$$

$$\lambda_{21} = \left[\frac{2\bar{\alpha}_2 \gamma_2 C_0 \bar{t} F(\bar{t})}{\bar{n}_{02} (2 + \bar{\beta}_2 \bar{t})} \right]^{m_2}, \quad \lambda_{22} = \frac{2\bar{\alpha}_2 m_2}{2 + \bar{\beta}_2 \bar{t}}.$$

Полные относительные потери напора в загрузке определяются с помощью формул (32), (33) как сумма:

$$\Delta\bar{h}(\bar{t}) = \Delta\bar{h}_1(\bar{t}) + \Delta\bar{h}_2(\bar{t}). \quad (34)$$

Формулы (32) – (34) также можно использовать для вычисления относительного времени \bar{t}_h достижения предельно допустимых потерь $\Delta\bar{h}_*$.

Для этого в (34) перебором значений \bar{t} определяется такое значение \bar{t}_h , при котором обеспечивается равенство

$$\Delta\bar{h}(\bar{t}_h) = \Delta\bar{h}_*. \quad (35)$$

Результаты и их обсуждение. Для того чтобы убедиться в высокой точности построенного выше приближенного решения задачи фильтрования с постоянной скоростью через двухслойную загрузку, был выполнен количественный анализ. Параллельно рассчитывали по представленным выше приближенным и строгим из [11] формулам, а затем сопоставляли основные характеристики фильтрования $(\bar{C}_{2e}, \Delta\bar{h})$ и технологические параметры (\bar{t}_p, \bar{t}_h) . Во множестве примеров мощности обоих слоев или взяты равными ($\bar{L}_1 = 0,5$), или $\bar{L}_1 = 0,25; 0,75$. Исходную концентрацию взвеси C_0 принимали от высокой для доочистки ($C_0 = 7,5 \cdot 10^{-5}$) до низкой ($C_0 = 2,5 \cdot 10^{-5}$), но преимущественно использовали среднее значение $5 \cdot 10^{-5}$. Так как явление отрыва осадка не оценивали, то коэффициенты $\bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2$ имели единственное значение 0,005. Что касается ключевых в исходной математической модели параметров $\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2$, то коэффициент $\bar{\alpha}_2$ фиксировали (8), а $\bar{\alpha}_1$ варьировали от 2 до 8 (однородная хорошосорбирующая загрузка). Если же $\bar{\alpha}_1$ не меняли, то он полагался равным 4.

В первую очередь, по формуле (28) рассчитано, согласно [11], изменение в течение длительного времени относительной выходной концентрации взвеси – как основного показателя качества осветления суспензии – для различных мощностей верхнего слоя. Приближенные и контрольные кривые $\bar{C}_{2e}(\bar{t})$ для $\bar{C}_* = 0,1$ приведены на рис.1. Различия между парами кривых, соответствующих одному и тому же \bar{L}_1 , оказались минимальными даже далеко за пределами фильтроцикла, а в случае $\bar{L}_1 = 0,5$ вообще настолько малыми, что соответствующие ему кривые 3, 4 практически слились. Сходные погрешности имели место и при расчете характерного времени \bar{t}_p как функции от $\bar{\alpha}_1$ (рис.2). При выраженной слоистости структуры загрузки они ничтожно малы, но постепенно растут с увеличением $\bar{\alpha}_1$, достигая максимума в примерах (10%) при $\bar{L}_1 = 0,75, \bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2$. Однако в основном ошибки при определении времени \bar{t}_p намного меньше.

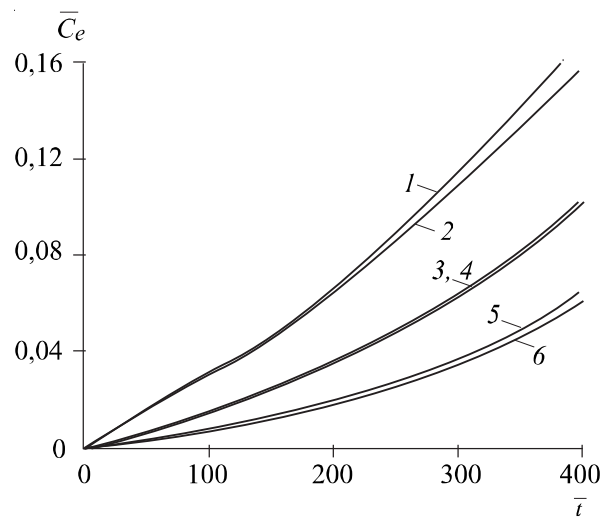


Рис. 1. Рост относительной выходной объемной концентрации взвеси со временем: 1, 3, 6 – точный расчет, 2, 4, 5 – приближенный. 1, 2 – $\bar{L}_1 = 0,75$; 3, 4 – $\bar{L}_1 = 0,5$; 5, 6 – $\bar{L}_1 = 0,25$

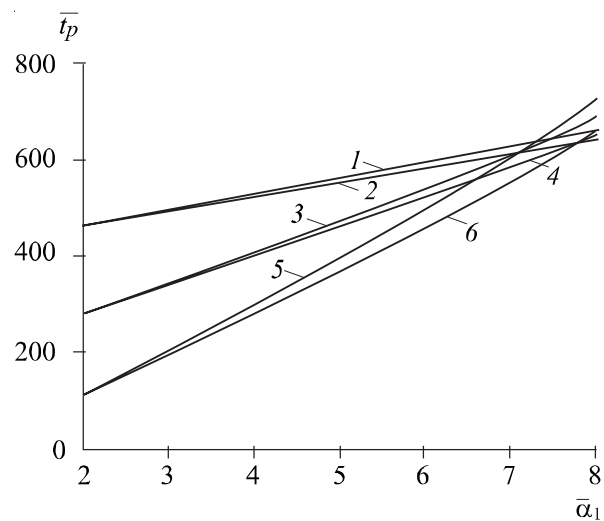


Рис. 2. Зависимость относительного времени защитного действия загрузки от относительного коэффициента скорости прилипания взвеси: 1, 4, 6 – точный расчет, 2, 3, 5 – приближенный. 1, 2 – $\bar{L}_1 = 0,25$; 3, 4 – $\bar{L}_1 = 0,5$; 5, 6 – $\bar{L}_1 = 0,75$

Предметом фильтрационных расчетов стали относительные потери и другое характерное время (\bar{t}_h), причем для упрощения анализа исходные водно-физические свойства обоих слоев полагали одинаковыми, так что $\bar{k}_{02} = \bar{n}_{02} = 1$. Также не принимали во внимание возможные отличия в свойствах и составе осадка ($m_1 = m_2 = 1, \gamma_1 = \gamma_2 = 20$). Рост потерь $\Delta\bar{h}$ со временем для характерных значений C_0 описывается кривыми на рис. 3. Естественно, что они очень чувствительны к исходному содержанию взвеси в суспензии. Несколько худшую точность в расчетах важнейшей гидравлической характеристики обеспечила приближенная формула (34) при сравнительно большом количестве примеси в осветляемой суспензии на входе в загрузку и только в том случае, если происходило интенсивное заиливание загрузки с многократным ростом потерь напора. В других, более интересных для практики случаях приближенные значения $\Delta\bar{h}$ почти совпали с точными.

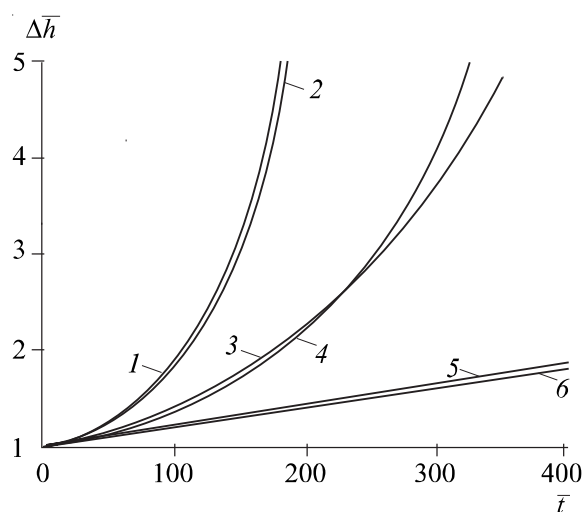


Рис. 3. Рост относительных потерь напора в загрузке со временем: 1, 2 — $C_0 = 7,5 \cdot 10^{-5}$; 3, 4 — $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$; 5, 6 — $C_0 = 2,5 \cdot 10^{-5}$

Наконец, приближенно и строго было вычислено относительное время \bar{t}_h , ограничивающее продолжительность действия фильтра из технико-экономических соображений. Допускалось увеличение исходных потерь (в чистой загрузке) не более чем в три раза ($\Delta\bar{h}_* = 3$). Чтобы способствовать рациональному выбору фильтрующего материала для

верхнего слоя, определяли зависимость ($\Delta\bar{h}_* = 3$) при непрерывном изменении $\bar{\alpha}_1$ в широком диапазоне и дискретном C_0 (рис. 4). Видимое расхождение кривых 1, 2 и 3, 4 имеет место только при минимальных из выбранных значениях $\bar{\alpha}_1$. Однако уже при $\bar{\alpha}_1 > 3,5$ указанные кривые фактически слились.

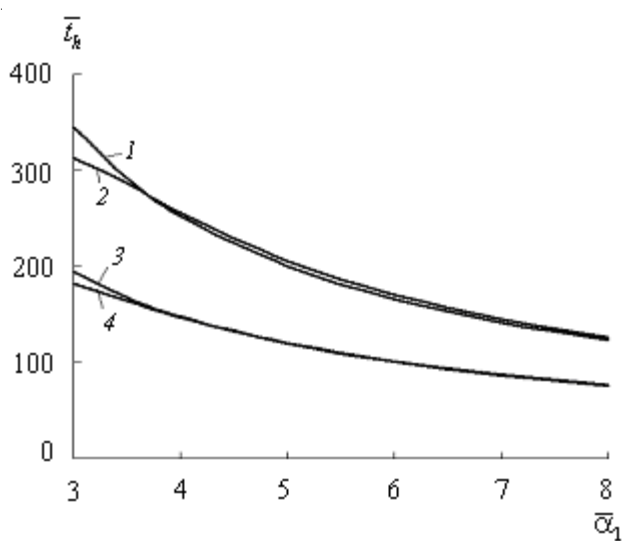


Рис. 4. Зависимость относительного времени достижения предельно допустимых потерь напора загрузки от относительного коэффициента скорости прилипания взвеси: 2, 4 – точный расчет, 1, 3 – приближенный. 1, 2 – $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$; 3, 4 – $C_0 = 7,5 \cdot 10^{-5}$

В заключение была проанализирована значимость изменения состава осадка со временем для разделения суспензии фильтрованием. С этой целью зависимость $\gamma(\bar{S})$ аппроксимировали в виде

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_1 \bar{S}.$$

Данные расчетов относительных потерь напора $\Delta\bar{h}$, согласно [10], при разных величинах $\bar{\alpha}_1$, $C_0 = 2,5 \cdot 10^{-5}$, $\gamma_0 = 25$ и γ_1 из интервала [0; 0,01] на момент времени $\bar{t} = 200$ показаны на рис.5 и свидетельствуют о возможном их значительном приращении в связи с учетом γ_1 при $\bar{\alpha} > 7$ и малосущественном – при $\bar{\alpha} < 6$.

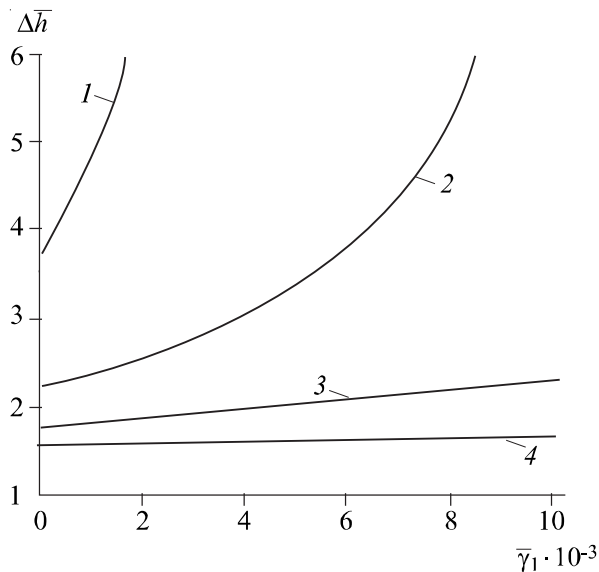


Рис.5. Зависимость относительных потерь напора загрузки от коэффициента $\bar{\gamma}_1$: 1 – $\bar{\alpha} = 10$; 2 – $\bar{\alpha} = 8$; 3 – $\bar{\alpha} = 6$; 4 – $\bar{\alpha} = 4$

Выводы. Построенное приближенное решение математической задачи дает очень близкие к точным результаты, обеспечивая тем самым надежный прогноз разделения суспензий фильтрованием, а благодаря своей простоте может с успехом применяться для обоснования технологических и конструктивных параметров современных фильтров, имеющих двухслойную загрузку или две ступени.

Резюме. Отримано простий наближений розв'язок математичної задачі фільтрування малоконцентрованої суспензії крізь двошарове пористе завантаження за лінійної кінетики масообміну. Виконано його співставлення з відомим строгим розв'язком на багаточисленних прикладах розрахунку фізико-хімічних характеристик і технологічних параметрів, яке засвідчило високу точність запропонованих для практики водоочищення формул.

V.L. Polyakov

CALCULATION OF SUSPENSION FILTRATION THROUGH TWO-LAYER FILTER MEDIUM AT LINEAR MASS-EXCHANGE KINETICS

Summary

A simple approximate solution has been obtained to the mathematical task of low-concentration suspension through two-layer porous filter medium at linear

mass-exchange kinetics. It has been compared with the well-known exact solution using a great number of examples of calculating physical-chemical characteristics, technological parameters and in this way a high accuracy of the solution above has been shown.

1. Орлов В.О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою. – Рівне: НУВГП, 2005. – 163с.
2. Emelko M.B. // Water Res. – 2003. – **37**, N12. – P. 2998 – 3008.
3. Kavamura S. // J. Amer. Water Works Assoc. – 1985. – **77**, N12. – P.42 – 47.
4. Mohanka S.S. // J. Sanit. Eng. Div. ASCE. – 1969. – **95**, N6. – P.1079 – 1095.
5. Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды. – М.: Стройиздат, 1964. – 155с.
6. Алексеев В.С., Коммунар Г.М., Шержуков Б.С. Массоперенос в водонасыщенных горных породах. Итоги науки и техники. Сер. Гидрогеология, Инж. геология. – М.: ВИНТИ, 1989. – 143 с.
7. Тугай А.М., Олійник О.Я., Тугай Я.А. Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу. – Харків: ХНАМГ, 2004. – 240 с.
8. Олейник А.Я., Тугай А.М. // Доп. НАН України. – 2001. – № 9. – С.190 – 194.
9. Ojha C.S.P., Graham N.J.D. // Water Res. – 1993. – **27**, № 3. – P. 377 – 387.
10. Поляков В.Л. // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2009. – Вип.13. – С.104 – 114.
11. Поляков В.Л. // Химия и технология воды. – 2008. – **30**, №1. – С.3 – 31.
12. Поляков В.Л. // Доп. НАН України. – 2010. – № 3. – С.61– 67.
13. Аюкаев Р.И., Мельцер В.З. Производство и применение фильтрующих материалов для очистки воды: Справ. пособие. – Л.: Стройиздат, 1985. – 118 с.
14. Сенявин М.М., Веницианов Е.В., Аюкаев Р.И. // Водные ресурсы. – 1977. – №2. – С.157 –170.
15. Васильев С.В., Веригин Н.Н., Глейзер Б.А. и др. Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем. – М.: Колос, 1970. – 440 с.

Ин-т гидромеханики
НАН Украины, г. Киев

Поступила 03.02.2010