

В.Л. Поляков

**ФИЛЬТРОВАНИЕ СУСПЕНЗИЙ ЧЕРЕЗ
МНОГОСЛОЙНУЮ ЗАГРУЗКУ ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ
КИНЕТИКЕ МАССООБМЕНА.
2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ**

Изложены результаты количественного анализа фильтрования суспензий через двухслойную загрузку при нелинейной и линейной кинетиках массообмена, постоянной скорости фильтрования, проведенного на базе строгих теоретических зависимостей из первой части общей работы. На многочисленных примерах с типичными исходными данными установлены закономерности изменения выходной концентрации взвеси, потеря напора со временем, а также характерных времен и особенно длительности фильтроцикла в зависимости от важнейших модельных параметров.

Ключевые слова: водоочистка, многослойная загрузка, нелинейная кинетика, суспензия, фильтровальная установка.

Введение. Данное исследование является продолжением работы [1], в которой представлены разнообразные теоретические зависимости, предназначенные для расчета процесса фильтрования суспензии через многослойную загрузку при нелинейной и линейной кинетиках массообмена. В работе обсуждаются результаты количественного анализа на базе указанных зависимостей, а поэтому ниже содержатся систематические ссылки на них без упоминания источника [1]. Благодаря высокой точности и интегральной форме расчетные формулы могут успешно использоваться в практике водоочистки. Они предоставляют широкие возможности для прогноза действия фильтров с неоднородно-слоистой загрузкой и ступенных, обоснования их конструктивных параметров, интенсификации технологий разделения суспензии. С целью иллюстрации отмеченных возможностей и путей их реализации были рассчитаны многочисленные примеры, и в результате определены важнейшие характеристики и параметры фильтрования, а именно: концентрации взвеси и осадка, потери напора, характерные времена. Их относительные величины установлены в зависимости от изменявшихся непрерывно или дискретно переменных (время, высота) и базовых модельных параметров.

Особое внимание уделено параметрам, отражающим специфику работы распространенной на практике двухслойной загрузки естественного (зерна) или искусственного (гранулы) происхождения при осветлении

© В.Л. ПОЛЯКОВ, 2011

умеренно- и сильнозагрязненных вод. Исходная объемная концентрация взвеси C_0 определяет интенсивность накопления осадка и роста потерь напора. Так как повышенные значения C_0 могут стать причиной преждевременного снижения производительности фильтровальной установки, то, несмотря на еще хорошее качество фильтрата, его расход настолько сокращается, что продолжение работы фильтра становится экономически нецелесообразным и промывку приходится начинать раньше момента t_p (время защитного действия загрузки). Чтобы полнее оценить влияние концентрации C_0 на длительность фильтрования, для нее или принимались конкретные и резко отличающиеся значения ($5 \cdot 10^{-6}$, $5 \cdot 10^{-5}$), или же она менялась в значительных пределах (вплоть до 10^{-4}). Также в вычислениях было принято единственное значение коэффициента γ , представляющего отношение объемных концентраций осадка и иммобилизованных частиц суспензии, а именно 20 [3 – 5]. Вообще данный коэффициент отличается значительной изменчивостью, что связано с разным составом загрязняющих веществ, особенностями образования осадка. Однако в нашей работе задача анализа значимости γ не ставилась.

Для выявления закономерных различий в процессе разделения суспензий при нелинейной и линейной кинетиках характеристики фильтрования вычисляли по соответствующим формулам (12) – (20) и (22) – (27) параллельно. При выборе коэффициентов α_{ni} , α_{li} полагали, что они связаны соотношением

$$\bar{\alpha}_{li} = \bar{\alpha}_{ni} \cdot S_{0i}$$

Тем самым обеспечивалась одинаковая скорость прилипания взвешенных частиц в начале фильтроцикла при обеих кинетиках. В относительных величинах это соотношение приобретает вид

$$\bar{\alpha}_{li} = \bar{\alpha}_{ni} \psi_i$$

Коэффициенты ψ_i вычисляли исходя из единственного значения пористости верхнего слоя $n_{01} = 0,4$ и одинаковых грязеемкостей слоев загрузки $S_{0i} = 0,2$.

В первую очередь, усилия были направлены на то, чтобы наглядно продемонстрировать бесспорные преимущества слоистых загрузок пе-

ред однородными. Для этого вышеупомянутые характеристики, рассчитанные применительно к двухслойной и однородной загрузкам, регулярно сравнивали. Кроме того, мощность и поглощающая способность верхнего слоя в примерах плавно менялись, так что двухслойная структура, в конце концов, превращалась в хорошо или умеренно сорбирующую однородную толщу. Так как мобилизация загрязняющих веществ начинает играть ответственную роль в работе фильтра только при накоплении в поровом пространстве значительного осадка, то в примерах этот важный процесс во внимание принимали, но специально не изучали. Поэтому было использовано единое значение коэффициента $\bar{\beta}$ (0,005).

Ключевую роль в оценке качества водоочистки и в целом эффективности фильтровальной установки, а также при определении технологических и конструктивных параметров играет выходная объемная концентрация взвеси C_e . И поэтому прежде всего находили изменение относительной концентрации \bar{C}_e со временем. Рассматривали двухслойную загрузку со слоями одинаковой мощности, т. е. $m_1 = m_2 = \frac{L}{2}$ и однородные загрузки мощностью L .

Для определенности принята нисходящая фильтрация, хотя это не имеет принципиального значения. Сорбционная способность верхнего и нижнего слоев при нелинейной кинетике характеризовалась значениями комплексных коэффициентов прилипания соответственно $\alpha_{n1}\psi_1 = 4$ и $\alpha_{n2}\psi_2 = 8$. Пояснения по поводу этих и других коэффициентов, величин, которые упоминаются ниже и имеют преимущественно безразмерный вид, приведены в [1]. Аналогичный коэффициент для однородных загрузок $\alpha_n\psi$ принимали равным 4 или 8. В случае линейной кинетики относительные коэффициенты скорости адгезии для обоих слоев были равны $\bar{\alpha}_{i1} = 4$, $\bar{\alpha}_{i2} = 8$. Исходную концентрацию C_0 выбирали умеренной ($5 \cdot 10^{-6}$) или высокой ($5 \cdot 10^{-5}$). Выходные кривые $\bar{C}_e(\bar{t})$, рассчитанные по формулам (17) и (27), представлены на рис. 1. Исходные значения указанной функции вычислены при $\bar{t} \approx 1$, что соответствует моменту достижения фронтом загрязнения основания загрузки в отсутствие ее зарядки, по следующим формулам:

для нелинейной кинетики

$$\bar{C}_e(1) = \exp[-\bar{\alpha}_{n1}\psi_1\bar{m}_1 - \bar{\alpha}_{n2}\psi_2(1 - \bar{m}_1)], \quad (1)$$

для линейной кинетики

$$\bar{C}_e(t) = \exp[-\bar{\alpha}_{l1}\bar{m}_1 - \bar{\alpha}_{l2}(1 - \bar{m}_1)]. \quad (2)$$

Наиболее высокое качество осветления, естественно, достигается при действии однородной загрузки с хорошо сорбирующим материалом и меньшей концентрацией C_0 . Однако такую ситуацию нельзя считать оптимальной, поскольку, как будет показано далее, осадок при этом распределится по высоте чрезвычайно неравномерно и, в конце концов, потери напора могут оказаться большими. Также длительное удаление из суспензии практически всей взвеси наблюдается в двухслойной загрузке при линейной кинетике (рис. 1, кривая б) и нелинейной (кривая 5), если $C_0 = 5 \cdot 10^{-6}$. Следует заметить, что в случае линейного массообмена концентрация C_0 не оказывает влияния на величину \bar{C}_e , и поэтому для разных ее значений (разных масштабов для C) получена единая кривая б. Минимальные отличия между упомянутыми кривыми объясняются сравнительно малым количеством осадка в течение расчетного периода и, как следствие, также малым уменьшением коэффициента α_n в расчетный период. Понятно, что при существенном повышении содержания примеси в суспензии защитное действие загрузки резко ослабевает, что находит выражение в быстром подъеме кривых 1, 2, 4 (см. рис. 1).

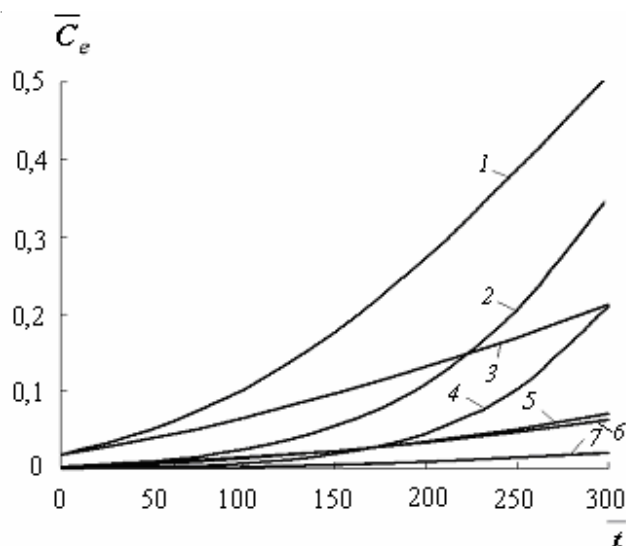


Рис. 1. Изменение относительной концентрации взвеси на выходе из фильтра со временем: 1 – 5, 7 – нелинейная, 6 – линейная кинетики; 2, 5, 6 – двухслойная, 1, 3, 4, 7 – однородная загрузки; 1, 2, 4 – $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$, 3, 5, 7 – $C_0 = 5 \cdot 10^{-6}$; 1, 3 – $\bar{\alpha}_n \psi = 4$, 4, 7 – $\bar{\alpha}_n \psi = 8$

В связи с вопросом об ухудшении пропускной способности загрузки важное значение приобретает расчет распределения в ней осадка, которое, как свидетельствует рис.2, может происходить существенно разными способами.

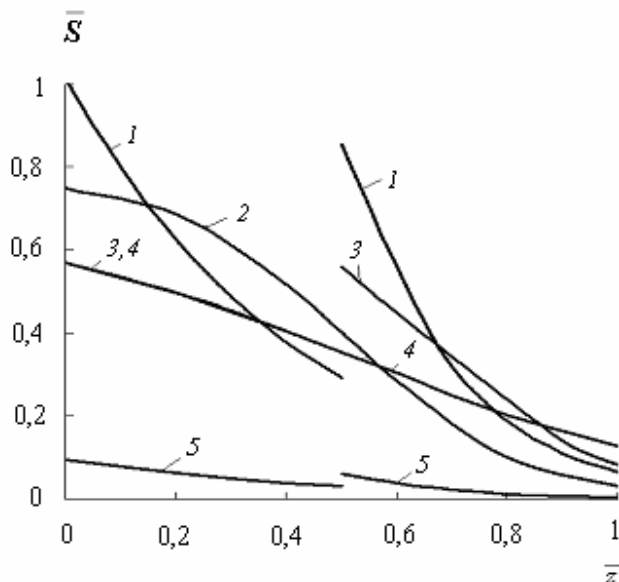


Рис. 2. Профили относительной концентрации осажденных частиц: 1, 5 – линейная, 2–5 – нелинейная кинетики; 1, 3, 5 – двухслойная, 2, 4 – однородная загрузки; 1 – 4 – $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$, 5 – $C_0 = 5 \cdot 10^{-6}$; 2 – $\bar{\alpha}_n \psi = 8$, 4 – $\bar{\alpha}_n \psi = 4$

Профили относительной концентрации осажденных частиц $\bar{S}(\bar{z})$ построены по формулам (13), (20), (23), (26) на момент, соответствующий заключительному этапу осветлительного процесса ($\bar{t} = 200$). Загрузка – двухслойная или однородная, кинетика – нелинейная или линейная, исходная концентрация взвеси – умеренная или высокая. При двухслойной загрузке функция $\bar{S}(\bar{z})$ имеет разрыв первого рода на границе между слоями (см. рис.2, кривые 1, 3, 5). С увеличением сорбционной способности фильтрующего материала осадок все больше сосредотачивается в верхней части загрузки. Усиленно накапливаются отложения в поровом пространстве двухслойной загрузки при линейной кинетике, $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ (прерывистая кривая 1), причем активное участие в водочистке принимает и нижний слой. Такая же картина наблюдается и при нелинейной кинетике, $C_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ (кривая 5). Вблизи верхней границы загрузки при интенсивном осаждении взвеси (кривая 1) имеют место

значения \bar{S} , превосходящие единицу. Это означает, что здесь полностью исчерпывается грязеемкость, и реализованная математическая модель фильтрования, разработанные на ее основе расчетные формулы, строго говоря, становятся некорректными и нуждаются в серьезной доработке. При принятых исходных данных погрешность вследствие игнорирования ограниченности грязеемкости минимальная. Однако с ростом C_0 образование и развитие в верхней части загрузки зоны предельного насыщения осадком уже необходимо учитывать. Тогда появляется неизвестная подвижная граница, что сильно усложняет решение математической задачи.

С концентрацией фильтрата C_e тесно связано время t_p , которое при незначительных потерях напора в загрузке тождественно длительности фильтроцикла t_f . Поэтому в следующей серии примеров анализировали влияние на относительное время \bar{t}_p тех параметров задачи фильтрования через двухслойную загрузку, по отношению к которым оно является особенно чувствительным, а именно коэффициента $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1$, мощности \bar{m}_1 и концентрации C_0 . Здесь и далее устанавливали \bar{t}_p исходя из заданных предельно допустимых для фильтрата значений \bar{C}_{e*} (0,01; 0,05; 0,1) по формулам (18), (28). В первой серии примеров расчета времени \bar{t}_p мощности слоев принимали одинаковыми $\bar{m}_1 = \bar{m}_2 = 0,5$; приведенный коэффициент скорости прилипания частиц для нижнего слоя $\bar{\alpha}_{n2}\psi_2$ равнялся 8, а для верхнего $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1$ увеличивался от 2 до 8; значения C_0 составляли $5 \cdot 10^{-6}$, $5 \cdot 10^{-5}$ и соответственно $\psi_1 = \psi_2 = 5000$ или 500. Результаты вычислений зависимости $\bar{t}_p(\bar{\alpha}_{n1}\psi_1)$ по (14)–(17) показаны на рис.3. Ухудшение сорбционных свойств верхнего слоя, с одной стороны, активизирует осаждение частиц суспензии в нижнем слое, а с другой – способствует проскоку большего их количества, на что указывает ощущаемое ослабление защитного действия загрузки в целом. Так, при $C_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ уменьшение $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1$ в четыре раза вызывает сокращение времени \bar{t}_p в 2,25 раза. Отмеченный эффект сильнее выражен при меньших значениях C_{e*} . Десятикратное снижение исходного содержания взвеси обуславливает примерно двойное увеличение \bar{t}_p . Во второй серии примеров мощность верхнего слоя (менее эффективно сорбирующего

слоя) варьировалась в максимально возможных пределах (от 0 до 1). Как и следовало ожидать, при граничных значениях \bar{m}_1 (0 и 1) имели место наибольшее и наименьшее значения \bar{t}_p , которые соответствуют однородным загрузкам с сильнее ($\bar{\alpha}_n \psi = 8$) и слабее ($\bar{\alpha}_n \psi = 4$) поглощающим материалом.

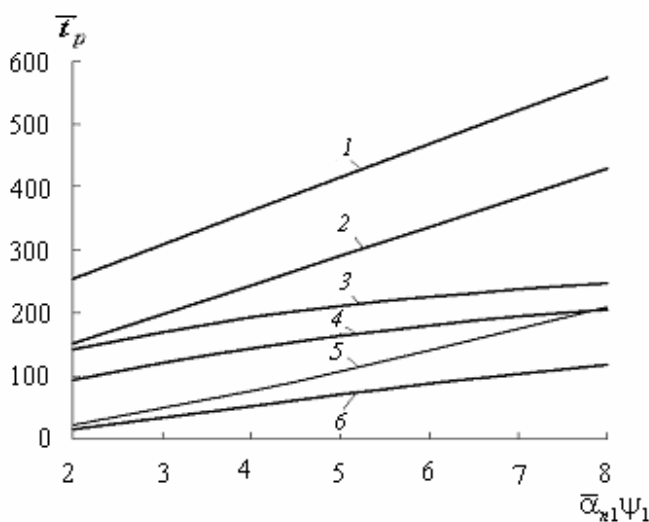


Рис. 3. Зависимость \bar{t}_p от $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1$: 1, 2, 4 – $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$, 3, 5, 6 – $C_0 = 5 \cdot 10^{-6}$; 1, 3 – $\bar{C}_e = 0,1$, 2, 4 – $\bar{C}_e = 0,05$, 5, 6 – $\bar{C}_e = 0,01$

Фактически рассчитаны три примера, различающиеся коэффициентами $\bar{\alpha}_{ni}\psi_i$. В первом примере принимали $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 4$, $\bar{\alpha}_{n2}\psi_2 = 8$, во втором – $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 2$, $\bar{\alpha}_{n2}\psi_2 = 8$, в третьем – $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 2$, $\bar{\alpha}_{n2}\psi_2 = 4$. Данные вычислений \bar{t}_p в форме графиков $\bar{t}_p(m_1)$ представлены на рис. 4. Очевидно, что с увеличением мощности \bar{m}_1 во всех рассмотренных случаях расчетное время резко сокращается, причем практически линейным образом. Кривые 1, 3 во всем интервале значений \bar{m}_1 расположены выше оси абсцисс, что свидетельствует о способности загрузки обеспечить требуемое качество фильтра при любом соотношении между \bar{m}_1 и \bar{m}_2 , хотя при $\bar{m}_1 \rightarrow 1$ время \bar{t}_p уменьшается многократно. Объясняется этот факт сравнительно большим значением коэффициента $\bar{\alpha}_{ni}\psi_i$ в

первом примере и, как следствие, малыми значениями \bar{C}_e после прохождения загрузки фронтом загрязнения, которые при $\bar{t} \approx 1$ вычисляли по (1). Уменьшение данного коэффициента вдвое в остальных примерах ведет к тому, что при маломощном нижнем слое и вследствие достаточно больших нормативных значений \bar{C}_{e^*} (0,05 и 0,1) загрузка вообще не в состоянии обеспечить необходимый уровень водоочистки. Другими словами, даже в момент достижения вышеупомянутым фронтом основания фильтрующей толщи, выходная концентрация взвеси окажется выше допустимой \bar{C}_{e^*} .

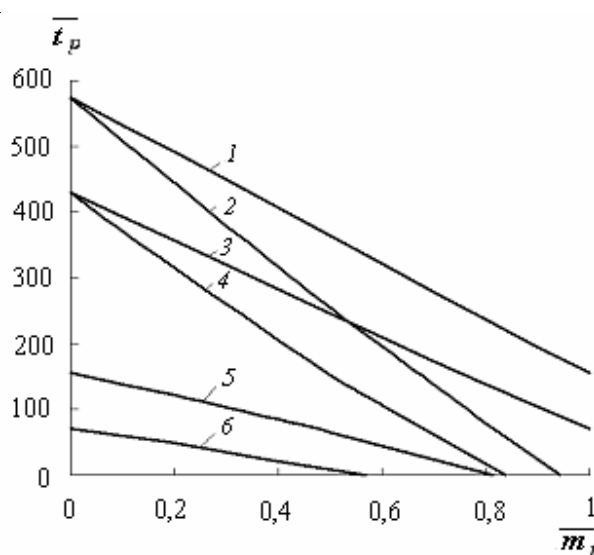


Рис. 4. Зависимость \bar{t}_p от \bar{m}_1 : 1, 2, 5 – $\bar{C}_e = 0,05$, 3, 4, 6 – $\bar{C}_e = 0,1$ (1, 3 – пример 1; 2, 4 – пример 2; 5, 6 – пример 3)

Итак, судя по данным рис. 3, 4, изменение параметров верхнего слоя может существенно сказаться на защитной способности загрузки. Столь же значительное влияние на \bar{t}_p оказывает исходная концентрация C_0 (рис 5). На этом рисунке отражены данные по \bar{t}_p , полученные при $\bar{m}_1 = \bar{m}_2$ и двух видах кинетики массообмена с фиксированными коэффициентами ($\bar{\alpha}_{11} = \bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 4$, $\bar{\alpha}_{12} = \bar{\alpha}_{n2}\psi_2 = 8$). Для \bar{C}_{e^*} выбраны значения 0,05; 0,1; 0,2. Входная концентрация взвеси непрерывно менялась от малой ($5 \cdot 10^{-7}$) до очень высокой (10^{-4}).

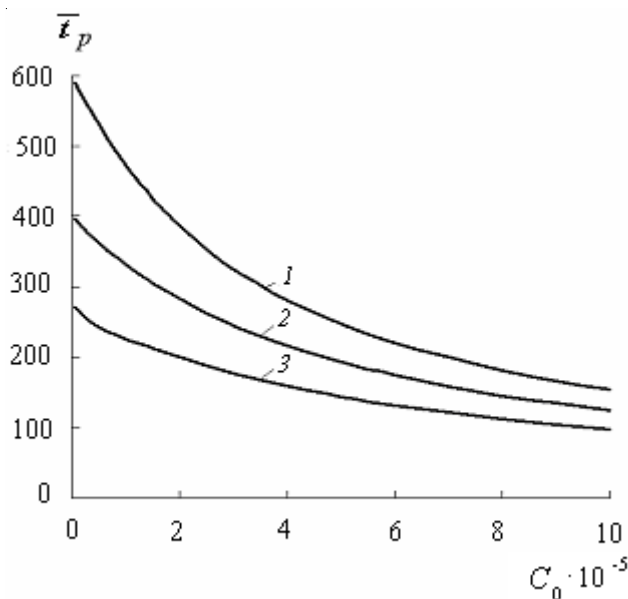


Рис. 5. Зависимость \bar{t}_p от C_0 : 1 – $\bar{C}_e = 0,2$; 2 – $\bar{C}_e = 0,1$; 3 – $\bar{C}_e = 0,05$

На рис. 5 резкое снижение кривых, соответствующих нелинейной кинетике, обусловлено постепенным снижением скорости прилипания загрязняющих веществ к материалу загрузки вследствие сокращения на поверхности последнего количества вакантных мест. В случае же линейной кинетики время \bar{t}_p не зависит от C_0 . Действительно, рост C_0 при сохранении значения \bar{C}_{e*} ведет к аналогичному повышению C_{e*} . При достижении большего значения C_e время \bar{t}_p остается прежним благодаря усиленному осаждению частиц и массопереносу, т.е. при $\bar{C}_{e*} = 0,05 ; 0,1 ; 0,2$ \bar{t}_p составляет соответственно 477; 656 и 907. Заметные отличия в значениях \bar{t}_p при разных формах кинетики указывают на важность правильного выбора уравнения массообмена и его коэффициентов.

Прогрессирующее отложение в порах загрузки загрязнения при длительном фильтровании способно привести к значительному снижению производительности фильтровальной установки. В связи с этим возникает необходимость определения динамики потерь напора и момента времени, когда последующая работа такой установки станет экономически нецелесообразной. Единственно надежный путь прогноза этих показателей заключается в реализации гидродинамического блока общей математической модели фильтрования, что и было осуществлено в [1] применительно к режиму фильтрования с постоянной скоростью и

для произвольной формы зависимости коэффициента фильтрации k от объемной концентрации осажденных частиц S . Благодаря этому формулы для расчета относительных фильтрационных характеристик (приведенный напор, время достижения потерями напора заданного уровня t_h) зависят от вида кинетики не прямо, а опосредованно – через выражения для концентраций S_i , полученные в результате решения деформационного блока. Итак, для вычисления указанных характеристик и, кроме того, длительности фильтроцикла следует конкретизировать связь между коэффициентом фильтрации k_i и S_i . Предложен ряд эмпирических зависимостей $k(S)$, из которых выбрана одна из наиболее известных [2]. Тогда

$$f_i(S_i) = \left(1 - \frac{\gamma_i S_i}{n_{0i}}\right)^3, \quad (3)$$

где \bar{n}_{0i} – пористость чистого i -того слоя, γ_i – коэффициент осадка для i -того слоя. Вследствие использования для концентраций S_i при линейной и нелинейной кинетиках разных масштабов форму функции $f_i(\bar{S}_i)$, с учетом (3), можно записать в виде:

для линейной кинетики

$$f_i(\bar{S}_i) = \left(1 - \frac{\gamma_i C_0 \bar{S}_i}{\bar{n}_{0i}}\right)^3; \quad (4)$$

для нелинейной кинетики

$$f_i(\bar{S}_i) = \left(1 - \frac{\gamma_i \Psi_i C_0 \bar{S}_i}{\bar{n}_{0i}}\right)^3, \quad (5)$$

где $\bar{n}_{0i} = \frac{n_{0i}}{n_{01}}$ и, значит, $\bar{n}_{01} = 1$.

Рост приведенного напора на верхней границе двухслойной загрузки $\tilde{H}_1(0, \bar{t})$ и эквивалентных ему относительных общих потерь напора в загрузке $\Delta \bar{H}$ происходит, как вытекает из (30), следующим образом:

$$\Delta \bar{H} = \frac{1}{\bar{k}_{01}} \int_0^{\bar{m}_1} \frac{d\eta}{f_1(\bar{S}_1(\eta, \bar{t}))} + \frac{1}{\bar{k}_{02}} \int_0^1 \frac{d\eta}{f_2(\bar{S}_2(\eta, \bar{t}))}. \quad (6)$$

Для расчетов функции $\Delta\bar{H}(\bar{t})$ по формуле (6) выбраны такие же исходные данные, как в примерах относительно \bar{C}_e (см. рис. 1). Это двухслойная ($\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 4$, $\bar{\alpha}_{n2}\psi_2 = 8$) и однородные ($\bar{\alpha}_n\psi = 4$ и 8) толщи, $C_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ и $5 \cdot 10^{-5}$, нелинейная, линейная кинетики и соответствующие им выражения (4), (5). Чтобы не переусложнять количественный анализ, обычно существующую разницу между пористостями и особенно проницаемостями слоев во внимание не принимали, так что $\bar{k}_{01} = \bar{k}_{02} = \bar{n}_{02} = 1$.

Кривые изменения относительных потерь напора в загрузке со временем изображены на рис. 6 и демонстрируют их особенно быстрое нарастание при линейной кинетике и $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ (кривая 1) вследствие интенсивного образования осадка в обоих ее слоях. Также резко увеличиваются потери напора в однородной сильносорбирующей толще (кривая 2) – в основном из-за крайне неравномерного по высоте осаждения загрязняющих веществ. Следовательно, со временем, несмотря на высокое качество фильтрата (см. рис. 1, кривые 4, 6), работа такого фильтра может стать неэффективной. Вместе с тем, благодаря более равномерному распределению осадка, а также проскоку большего количества взвеси, потери $\Delta\bar{H}$ в двухслойной загрузке при нелинейной кинетике со временем растут намного медленнее (кривая 4). Снижение содержания примеси в суспензии в 10 раз способствует многократному сокращению затрат механической энергии на фильтрование (кривая 5).

В заключение применительно к двухслойной загрузке (однородные загрузки являются ее частным случаем) и нелинейной кинетике проанализирована значимость таких модельных параметров, как $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1$, \bar{m}_1 и C_0 для важнейшего технологического параметра – относительной продолжительности фильтроцикла \bar{t}_f . В отличие от характерных времен \bar{t}_p , \bar{t}_h , определявшихся исходя из одного критерия оценки работы фильтра, а именно качества фильтрата ($\bar{C}_{e*} = 0,1$) или допустимых потерь напора ($\Delta\bar{H} = 2$), длительность \bar{t}_f обосновывали уже с использованием обоих критериев. В первой серии примеров зафиксировано $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ и, с учетом $\gamma_i S_{0i} = 0,2$, $n_{01} = 0,4$, $\psi_1 = \psi_2 = 500$. Относительная мощность верхнего слоя варьировалась ($\bar{m}_1 = 0,25; 0,5; 0,75; 1$), а коэффициент $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1$ менялся непрерывно от 2 до 8. В случае $\bar{m}_1 = 1$ имела место однородная загрузка с $\bar{\alpha}_n\psi = 2 \div 8$.

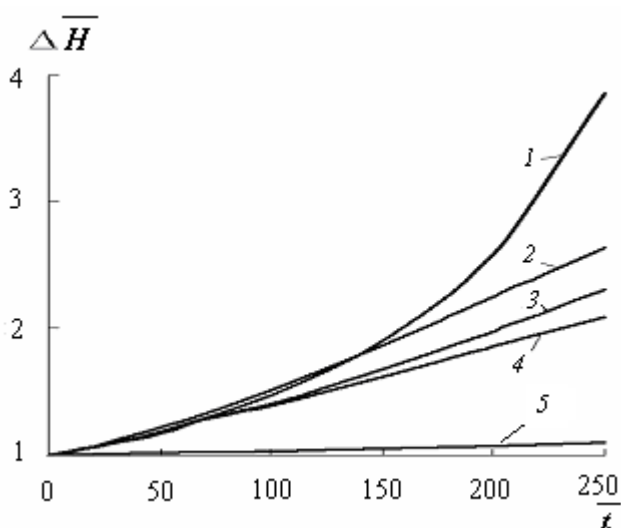


Рис. 6. Рост относительных потерь напора в загрузке со временем: 1 – 4 – $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$, 5 – $C_0 = 5 \cdot 10^{-6}$; 1, 4, 5 – двухслойная, 2 – однородная загрузки, $\bar{\alpha}_n \psi = 8$; 3 – однородная загрузка, $\bar{\alpha}_n \psi = 4$; 1, 5 – линейная, 2 – 4 – нелинейная кинетики

Соответствующая кривая 4 на рис.7, рассчитанная как и другие аналогичные кривые по формулам (17), (30), показывает, что максимальная длительность \bar{t}_f в однородных загрузках будет примерно при $\bar{\alpha}_n \psi = 6$ (следует помнить, что этот результат получен при строго определенных значениях \bar{C}_{e*} и $\Delta \bar{H}_*$). Абсолютный же максимум среди значений \bar{t}_f достигается в том случае, если мощности слоев двухслойной загрузки одинаковые. Тогда при $\bar{\alpha}_{n1} \psi_1 = 4,3$ время \bar{t}_f равно ~ 200 . В несколько меньшей степени эффект перераспределения осадка в глубь загрузки сказывается на продолжительности эффективной работы фильтра при $\bar{m}_1 = 0,75$ (см. рис. 7, кривая 3). Монотонный характер кривой 1 объясняется преимущественной задержкой взвеси в более мощном нижнем слое, где загрязнение осаждается опять-таки очень неравномерно. Это, в свою очередь, обуславливает ощутимые дополнительные потери напора в загрузке, которые, в конечном итоге, и ограничивают продолжительность работы фильтра во всем рассмотренном интервале значений $\bar{\alpha}_{n1} \psi_1$.

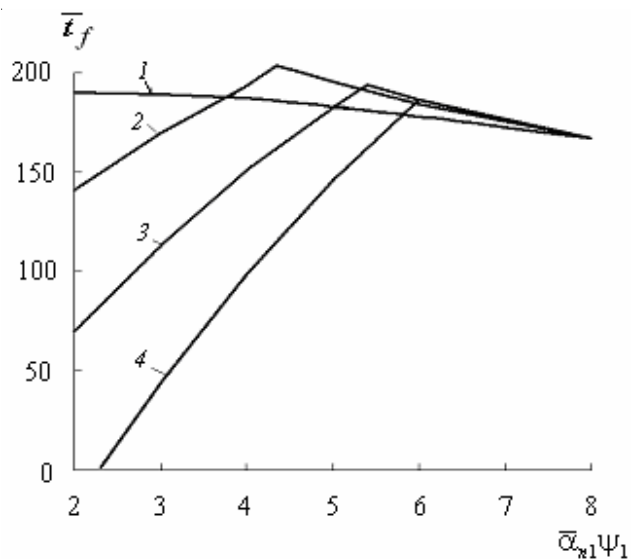


Рис. 7. Зависимость \bar{t}_f от $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1$: 1 – $\bar{m}_1 = 0,25$; 2 – $\bar{m}_1 = 0,5$; 3 – $\bar{m}_1 = 0,75$; 4 – $\bar{m}_1 = 1$

При малых $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1$ последний вариант оказывается среди рассчитанных более предпочтительным, так как с увеличением \bar{m}_1 заметно усиливается проскок частиц суспензии и определяющим для t_f становится время t_p , которое в такой ситуации будет сравнительно небольшим.

Во многом сходный характер имеют графики зависимости длительности \bar{t}_f от мощности \bar{m}_1 (рис.8). Здесь также принимали $\bar{\alpha}_{n2}\psi_2 = 8$, $C_0 = 5 \cdot 10^{-5}$, а, кроме того, $\bar{C}_{e*} = 0,1$, $\Delta\bar{H}_* = 2$. При низкой адгезионной способности верхнего слоя ($\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 2$ или 4) и малых \bar{m}_1 почти вся взвесь, которая не задержалась в нем, осаждалась в нижнем слое.

Таким образом, с одной стороны, защитное действие загрузки благодаря большой мощности второго хорошосорбирующего слоя будет сохраняться долго, а с другой – потери напора окажутся не слишком большими.

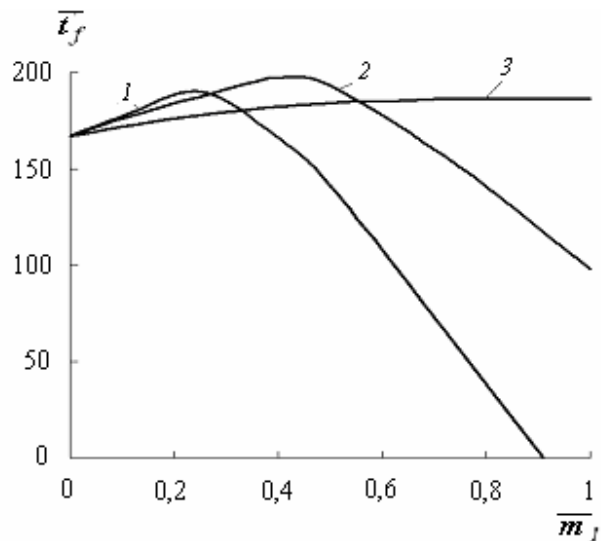


Рис. 8. Зависимость \bar{t}_f от \bar{m}_1 : 1 – $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 4$; 2 – $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 6$; 3 – $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 2$

Поэтому длительность \bar{t}_f при $\bar{m}_1 < 0,2$ будет наибольшей, если $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 2$ (см. рис. 8, кривая 1). С увеличением \bar{m}_1 подстилающий слой удерживает все меньшее количество примеси, так что время \bar{t}_p , а вместе с ним и \bar{t}_f резко уменьшатся. При $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 6$ защитная способность загрузки настолько возрастает, что и для значений \bar{m}_1 , близких к единице, \bar{t}_p оказывается больше t_h . Поэтому соответствующая кривая 3 зависимости $\bar{t}_f(\bar{m}_1)$ монотонно возрастает.

Наконец, последняя серия примеров, результаты вычисления которых представлены на рис. 9, демонстрирует принципиальную возможность определения с помощью формул [1] диапазона значений исходной объемной концентрации C_0 , обеспечивающих продление работы фильтров с двухслойной загрузкой по сравнению с однородной. При этом мощность \bar{m}_1 поочередно принимали равной 0; 0,25; 0,5; 0,75 и 1, параметры осаждения $\bar{\alpha}_{n1}\psi_1 = 4$, $\bar{\alpha}_{n2}\psi_2 = 8$, а характерные времена \bar{t}_f, \bar{t}_p находили исходя из тех же значений $\bar{C}_{e*}, \Delta\bar{H}_*$ (0; 1 и 2). Концентрация C_0 менялась в интервале от $5 \cdot 10^{-7}$ до 10^{-4} . Потери напора в загрузке превысили принятые допустимые $\Delta\bar{H}_*$ в четырех примерах (кривая 2 при $\bar{\alpha}_n\psi = 8$ и кривые 3 – 5 при $\bar{m}_1 = 0,25; 0,5$ и $0,75$) при высоких значениях C_0 . Для таких

ситуаций относительную величину \bar{t}_f устанавливали совместным расчетом времен \bar{t}_p, \bar{t}_h по формулам (18), (31). Как видно из рис. 9, продолжительность \bar{t}_f больше, если загрузка состояла из двух слоев одинаковой мощности ($\bar{m}_1 = 0,5$) и $C_0 > 5 \cdot 10^{-5}$. При $C_0 = 2,5 \cdot 10^{-5}$ времена \bar{t}_p и \bar{t}_h уравнивались, а дальнейшее повышение C_0 вело к ускоренному уменьшению \bar{t}_h , о чем свидетельствовало существенно более высокое расположение кривой 1 по отношению к кривой 2 при $C_0 > 2,5 \cdot 10^{-5}$. Естественно, при $\bar{m}_1 = 0,25$ и $0,75$ слоистость загрузки слабее сказывается на времени работы фильтра. Необходимо отметить, что данные расчетов напоров, их потерь, а значит, времени \bar{t}_h и \bar{t}_f , при высоких значениях C_0 имеют ориентировочный характер из-за принятия начальных проницаемостей и пористостей слоев равными. При углубленном анализе или прогнозе работы конкретных фильтров должны учитываться различия, которые обязательно имеют место между \bar{k}_{01} и \bar{k}_{02} , \bar{n}_{01} и \bar{n}_{02} . На рис. 9 это привело бы к некоторому смещению кривых $\bar{t}_f(C_0)$ в той части, что строится исходя из вычислений \bar{t}_h .

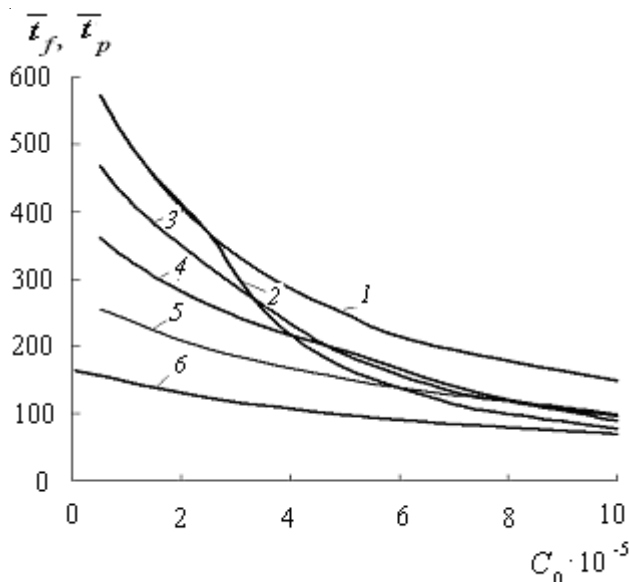


Рис. 9. Зависимости \bar{t}_f, \bar{t}_p от C_0 : 1, 2, 6 – однородная, 3–5 – двухслойная загрузки; 1 – \bar{t}_p , 2–6 – \bar{t}_f ; 1, 2 – $\bar{\alpha}_n \psi = 8$, 6 – $\bar{\alpha}_n \psi = 4$; 3 – $\bar{m}_1 = 0,25$, 4 – $\bar{m}_1 = 0,5$, 5 – $\bar{m}_1 = 0,75$

Выводы. Итак, выполнен развернутый количественный анализ фильтрования суспензии через двухслойную загрузку при постоянной скорости и двух видах кинетики массообмена – нелинейной и линейной. Показана возможность существенного снижения качества водоочистки из-за ухудшения поглотительной способности фильтрующего материала по мере накопления в нем осадка. Исследовано влияние сорбционных свойств и мощности верхнего слоя, исходного содержания взвеси на характерные времена – защитного действия загрузки и достижения предельно допустимых потерь напора, определявшихся на основании двух критериев оценки действия фильтра. При этом построены графики зависимостей относительной длительности фильтроцикла \bar{t}_f от важнейших модельных параметров, которые могут служить основой для выбора рациональных конструктивных и технологических параметров. В частности, установлено, что наиболее выгодными в технологическом отношении являются двухслойные загрузки, состоящие из слоев одинаковой мощности. Сопоставление времени \bar{t}_f для двухслойной и однородной загрузок свидетельствует об ощутимом продлении эффективной работы фильтровальных установок в случае использования загрузок с верхним умеренно- и нижним хорошо сорбирующим слоями.

Резюме. Викладено результати кількісного аналізу фільтрування суспензій крізь двошарове завантаження при нелінійній і лінійній кінетиках масообміну, сталій швидкості фільтрування, який виконано на базі строгих теоретичних залежностей з першої частини загальної роботи. На численних прикладах з типовими вихідними даними встановлено закономірності зміни вихідної концентрації зависі, втрат напору, характерних часів і особливо тривалості фільтроциклу з часом і в залежності від найважливіших модельних параметрів.

V.L. Polyakov

**SUSPENSION FILTRATION THROUGH MULTILAYER FILTER
MEDIUM AT NONLINEAR MASS-EXCHANGE KINETICS.
2. QUANTITATIVE ANALYSIS**

Summary

Based on the theoretical dependencies from the first paper of the general work, the results of quantitative analysis of suspension filtration through two-

layer filter medium at nonlinear and linear kinetics are discussed. The regularities of a change in filtrate concentration, head loss, characteristic times especially filtration period duration are established due to varying time and the most important model parameters.

1. *Поляков В.Л.* // Химия и технология воды. – 2011. – **33**, №1. – С. 3 – 14.
2. *Миңу Т.М.* Теоретические основы технологии очистки воды. – М.: Стройиздат, 1964. – 155 с.
3. *Бугай Н.Г., Кривоног А.И., Кривоног В.В.* // Прикл. гідромеханіка. – 2004. – **6(78)**, № 2. – С.27 – 43.
4. *Boller M.A., Kavanaugh M.C.* // Water Res. – 1995. – **29**, N4. – P. 1139 – 1149.
5. *Ojha C.S.P., Graham N.J.D.* // Ibid. – 1993. – **27**, N3. – P. 377 – 387.

Ин-т гидромеханики НАН Украины,
г. Киев

Поступила 22.05.2009