

УДК 532.546:

В.Л.ПОЛЯКОВ, доктор технических наук
Институт гидромеханики НАН Украины

О РАЦИОНАЛЬНОМ ВЫБОРЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ ВОДООЧИСТНОГО ФИЛЬТРА

Представлено критеріальні рівняння для розрахунку технологічних часів при плоскорадіальному фільтруванні суспензії. Виконано теоретичний аналіз залежності відносної тривалості фільтроцикла від внутрішнього і зовнішнього радіусів циліндричного шару завантаження при його необмеженому і фіксованому об'ємі. Показано можливість інтенсифікації фільтрування шляхом вибору раціональної геометрії завантаження.

Ключові слова: плоскорадіальне фільтрування; суспензія; шар завантаження; технологічний час; тривалість фільтроциклу.

Представлены критериальные уравнения для расчета технологических времен при плоскорадiallyном фильтровании суспензии. Выполнен теоретический анализ зависимости относительной длительности фильтроцикла от внутреннего и внешнего радиусов цилиндрического слоя загрузки при ее неограниченном и фиксированном объеме. Показана возможность интенсификации фильтрования путем выбора рациональной геометрии загрузки.

Ключевые слова: плоскорадiallyное фильтрование; суспензия; слой загрузки; технологическое время; длительность фильтроцикла.

Criteria equations have been presented to calculate technological times at axial suspension filtration. A theoretical analysis has been performed of the dependence between relative continuous filter operation time and internal, external radiuses of cylindrical medium layer. Possibility has been shown to improve essentially filtration process due to rational choice of filter medium geometry.

Key words: axial deep-bed filtration; suspension; filter medium; technological time; filter time run.

Непрерывную работу водоочистных фильтров в принципе удается существенно продлевать, реализуя плоскорадiallyное фильтрование суспензии через загрузку в форме цилиндрического слоя (рис.1) [1-4].

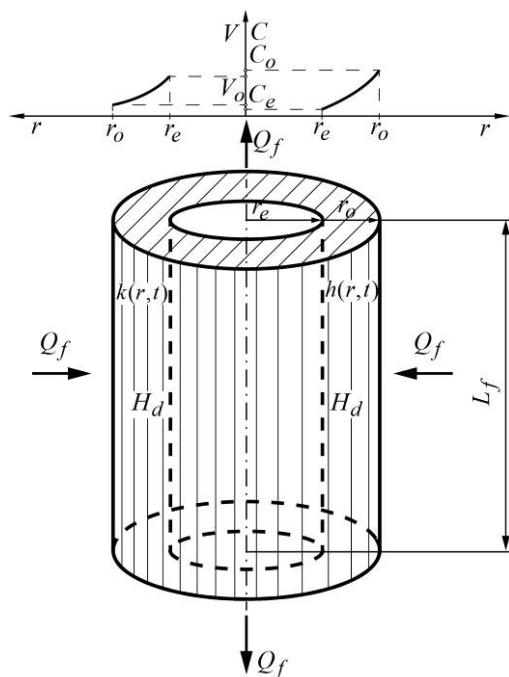


Рис.1. Схема плоскорадиального фильтрования суспензии (подача извне)

Добиться же максимальной отдачи от подобного фильтра позволяет рациональный выбор радиусов внутренней (r_e) и внешней (r_o) поверхностей.

Также к конструктивным параметрам относится высота слоя загрузки L_f , которая подбирается, исходя из технических возможностей эксплуатации высоких (колонн) фильтров, и не отражается на технологическом процессе разделения суспензии. Увеличение L_f дает возможность наращивать производительность фильтра Q_f , причем занимаемая им площадь остается прежней. Ниже детально анализировалась связь вышеупомянутых радиусов с ключевым технологическим параметром – длительностью фильтроцикла t_f [5]. В основе проведенного теоретического обоснования геометрии загрузки лежит приближенное аналитическое решение задачи плоскорадиального фильтрования при постоянной гидравлической нагрузке. Данное решение найдено и показана его высокая точность в работе [6], так что оно является надежным инструментом для разнообразных оценок, выработки рекомендаций по практическому применению нетрадиционного, но перспективного способа фильтрования. Время t_f устанавливается как меньшее из значений двух технологических времен, а именно, времени защитного действия загрузки t_p и времени достижения потерями напора в загрузке предельно допустимой величины t_h . Базовые уравнения для вычисления значений t_p , t_h вытекают из вышеупомянутого решения и представляются сразу в безразмерном виде

$$2 \exp \left[-2\bar{\alpha}_V \int_{\bar{r}_e}^1 \frac{\xi^{1+q-l} d\xi}{2\xi^q + \bar{\beta}_V \bar{t}_p} \right] = \bar{C}_* + \exp \frac{\bar{\alpha}_V (\bar{r}_e^{2-l} - 1)}{2-l}, \quad (1)$$

$$\int_{\bar{r}_e}^1 \frac{d\xi}{\xi [1 - \bar{\gamma}^{m_1} \bar{S}^{m_1}(\xi, \bar{t}_h)]^{m_2}} = \Delta \bar{h}_* = 2\pi k_0 \frac{L_f \Delta h_*}{Q_f}. \quad (2)$$

Здесь

$$\bar{S}(\bar{r}, \bar{t}) = \frac{2\bar{\alpha}_V \bar{t} \bar{r}^{q-l}}{2\bar{r}^q + \bar{\beta}_V \bar{t}} \exp \left[-2\bar{\alpha}_V \int_{\bar{r}_e}^{\bar{r}} \frac{\xi^{1+q-l} d\xi}{2\xi^q + \bar{\beta}_V \bar{t}} \right], \quad (3)$$

$$\bar{\alpha}_V = r_0^{2-l} \left(\frac{Q_f}{2\pi L_f} \right)^{l-1} \alpha_V, \quad \bar{\beta}_V = r_0^{2-q} \left(\frac{Q_f}{2\pi L_f} \right)^{q-1} n_0 \beta_V, \quad \bar{\gamma} = \gamma C_0, \quad \bar{r} = \frac{r}{r_0}, \quad \bar{r}_e = \frac{r_e}{r_0},$$

$$\bar{t} = \frac{Q_f t}{2\pi L_f n_0 r_0^2}, \quad \bar{t}_{p,h} = \frac{Q_f t_{p,h}}{2\pi L_f n_0 r_0^2};$$

α_V, β_V – приведенные коэффициенты скоростей прилипания и отрыва частиц суспензии в степенных выражениях для коэффициентов скоростей прилипания и отрыва [7-9] $\alpha = \alpha_V V^l, \beta = \beta_V V^q, V$ – скорость фильтрования; $\bar{C}_*, \Delta \bar{h}_*$ – предельно допускаемые нормативными документами относительные объемная концентрация взвеси в фильтрате и потери напора в загрузке; k_0, n_0 – коэффициент фильтрации и пористость чистой загрузки; γ – соотношение объемных концентраций осадка и осажденных частиц; \bar{S} – относительная объемная концентрация осажденных частиц суспензии; C_0 – входная объемная концентрация взвеси; m_1, m_2 – эмпирические коэффициенты [10].

В первой серии примеров уравнения (1)-(3) использовались в исходном виде, поскольку величина r_0 была фиксированной. Радиус же r_e варьировался в максимальной степени – от 0 до r_0 . В двух других сериях радиус r_0 становился переменной величиной и поэтому в принципе не мог служить масштабом. Во второй серии неизменным был радиус r_e , что и предопределило его применение в качестве масштаба длины. Это потребовало незначительной трансформации критериальных уравнений. Наконец, в третьей серии примеров объем загрузки W_f изначально задавался и не зависел от радиусов r_e, r_0 , которые менялись непрерывно и теперь согласованно. Поэтому для получения полной информации о влиянии геометрии загрузки на осветлительный ресурс фильтра достаточно конкретизировать связь между временем t_f и, например, радиусом \bar{r}_e . При необходимости \bar{r}_0 легко вычислить с помощью простой формулы при известных значениях \bar{r}_e и W_f, L_f . В таком случае логично все величины

имеющие размерность длины, соотносить с минимальным здесь значением r_{\min} переменной r_0 , которое отвечает выбранному объему W_f и наименьшему из возможных значений r_e (0).

Следует подчеркнуть, что все задействованные в технологических расчетах выражения, имеют безразмерную форму. Тем самым, во-первых, несмотря даже на ее усложнение из-за замены масштаба длины существенно сокращается число задаваемых параметров. Во-вторых, можно непосредственно сравнивать данные множества вычислений длительности фильтроцикла, полученные здесь и в цикле работ, посвященных плоскорадиальному фильтрованию.

Исходная информация включает, прежде всего, одинаковые во всех примерах значения модельных параметров $\bar{\beta}_V$ (0.005), q (1), $\bar{\gamma}$ (0.001), m_1 (1), m_2 (3) и критериальных \bar{C}_* (0.1), $\Delta\bar{h}_*$ (8). Адгезионные свойства загрузки характеризуются несколькими типичными значениями коэффициента $\bar{\alpha}_V$ и показателя l (0.7, -0.3), что позволило вести расчеты параллельно для двух с физической точки зрения принципиально различающихся форм влияния фильтрационного процесса на осаждение взвешенных частиц.

Прежде всего рассчитывались технологические времена \bar{t}_p, \bar{t}_h с увеличением радиуса \bar{r}_e от 0 до 1 по уравнениям (1)-(3). Таким образом, цилиндрический слой загрузки в итоге вырождался в поверхность, не имеющую гидравлического сопротивления и не способную задерживать мелкодисперсную примесь. Кривые зависимостей $\bar{t}_p(\bar{r}_e), \bar{t}_h(\bar{r}_e)$ и обобщающей их $\bar{t}_f(\bar{r}_e)$, которые отвечают $\bar{\alpha}_V = 10$ и двум значениям l , показаны на рис.2.

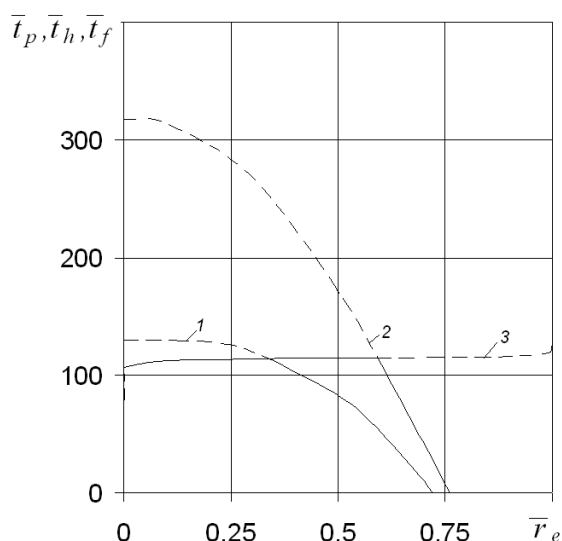


Рис.2. Зависимости $\bar{t}_p(\bar{r}_e), \bar{t}_h(\bar{r}_e), \bar{t}_f(\bar{r}_e)$: сплошная – \bar{t}_f ;

1, 2 – \bar{t}_p ; 3 – \bar{t}_h ; 2, 3 – $l = 0.7$; 1, 3 – $l = -0.3$

Графики $\bar{t}_h(\bar{r}_e)$ для разных l практически сливались и поэтому изображены одной линией (3). Уменьшение толщины фильтрующего слоя резко негативно отражается на его защитных свойствах и слабо позитивно на потерях механической энергии. Последний факт объясняется выраженной неравномерностью распределения осадка, который главным образом сосредотачивается около внешней границы загрузки ($\bar{r} = 1$) даже при малой гидравлической нагрузке, а также существенной нелинейностью зависимости между коэффициентом фильтрации и концентрацией осадка. Быстрый же и неограниченный рост времени \bar{t}_h имеет место только при асимптотическом стремлении \bar{r}_e к 1. Важно отметить существование в каждом конкретном случае такого характерного значения \bar{r}_{e*} , что при $\bar{r}_e \geq \bar{r}_{e*}$ загрузка будет не в состоянии обеспечить требуемое качество фильтрата даже сразу после прохождения через нее фронта загрязнения (в расчетах при $t = 0$). Очевидно, что рекомендуемая при проектировании фильтра величина \bar{r}_e должна быть заметно меньше \bar{r}_{e*} . Фильтрационное течение опосредовано через адгезионный процесс оказывает серьезное влияние на задержку взвеси внутри загрузки, а значит и на время \bar{t}_p . И при этом оно вообще не сказывается на формировании осадка около входной поверхности загрузки, так что время \bar{t}_h практически не зависит от показателя l .

В дальнейшем моделировалось расширение цилиндрической загрузки и в связи с этим возникла необходимость в новых масштабах длины и соответствующем видоизменении критериальных уравнений. Сначала благодаря стабильному положению внутренней поверхности как раз такую роль играл ее радиус, так что $\bar{r}_0 = r_0/r_e$. Расчетные уравнения при этом трансформировались к следующему виду

$$2 \exp \left[-2\bar{\alpha}_{V0}(\bar{r}_0) \int_1^{\bar{r}_0} \frac{\xi^{1+q-l} d\xi}{2\xi^q + \bar{\beta}_{V0}(\bar{r}_0)\bar{t}_{p0}} \right] = \bar{C}_* + \exp \frac{\bar{\alpha}_{V0}(\bar{r}_0)(1 - \bar{r}_0^{2-l})}{2-l}, \quad (4)$$

$$\int_1^{\bar{r}_0} \frac{d\xi}{\xi [1 - \bar{\gamma}^{m_1} \bar{S}^{m_1}(\xi, \bar{t}_{h0}; \bar{r}_0)]^{m_2}} = \Delta \bar{h}_* = 2\pi k_0 \frac{L_f \Delta h_*}{Q_f}. \quad (5)$$

Здесь

$$\bar{S}(\bar{r}, \bar{t}_0; \bar{r}_0) = \frac{2\bar{\alpha}_{V0}(\bar{r}_0)\bar{t}_0\bar{r}^{q-l}}{2\bar{r}^q + \bar{\beta}_{V0}(\bar{r}_0)\bar{t}_0} \exp \left[-2\bar{\alpha}_{V0}(\bar{r}_0) \int_{\bar{r}}^{\bar{r}_0} \frac{\xi^{1+q-l} d\xi}{2\xi^q + \bar{\beta}_{V0}(\bar{r}_0)\bar{t}_0} \right];$$

$$\bar{\alpha}_{V0}(\bar{r}_0) = \bar{r}_0^{l-2} \bar{\alpha}_V, \quad \bar{\beta}_{V0}(\bar{r}_0) = \bar{r}_0^{q-2} \bar{\beta}_V, \quad \bar{t}_0 = \bar{r}_0^2 \bar{t}.$$

В ходе расчетов технологических параметров $\bar{t}_{p0}, \bar{t}_{h0}$, выполнявшихся подбором на базе уравнений (4), (5) также при $\bar{\alpha}_V = 10$, а затем \bar{t}_p, \bar{t}_h конструктивный параметр \bar{r}_0 увеличивался непрерывно от 1 (слой загрузки вырожден в поверхность) в пять раз. Результаты вычислений

демонстрируются на рис.3 уже в конечной форме зависимости длительности \bar{t}_f от \bar{r}_0 , причем и при усиливаемой, и при ослабляемой фильтрационным течением адгезии взвешенного вещества. Отсюда очевидно, что по мере наращивания объема загрузки и удлинения пути фильтрации ее защитная способность сначала очень быстро, а потом все более замедляясь улучшается, причем особенно при сильной адгезии ($l = 0.7$, кривая 1).

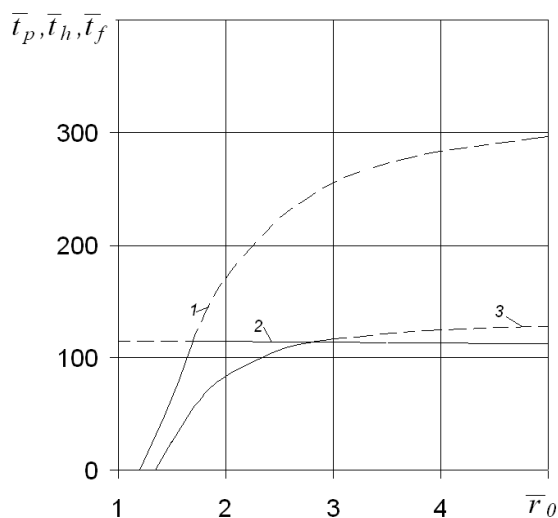


Рис.3. Зависимости $\bar{t}_p(\bar{r}_0)$, $\bar{t}_h(\bar{r}_0)$, $\bar{t}_f(\bar{r}_0)$: сплошная – \bar{t}_f ;

1, 3 – \bar{t}_p ; 2 – \bar{t}_h ; 1, 2 – $l = 0.7$; 2, 3 – $l = -0.3$

Вместе с тем при сравнительно малых значениях \bar{r}_0 и отвечающих им толщинах цилиндрического слоя $(\bar{r}_0 - 1)$ последний уже не способен продолжительное время удалять нужное количество взвеси из суспензии и таким образом эффективность работы фильтра оказывается низкой. Кроме того, по аналогии с предыдущей серией примеров и введенном там параметре \bar{r}_{e*} можно указать некоторое предельное значение \bar{r}_{0*} , так что фильтр, для которого справедливо соотношение $\bar{r}_0 \leq \bar{r}_{0*}$, в принципе не может справиться со своей задачей снижения содержания примеси в суспензии до нормативного. Следует подчеркнуть, что при больших значениях r_0 , например, $\bar{r}_0 > 3$ при $l = -0.3$, время непрерывного разделения ограничивается только гидравлическим фактором.

Заключительная серия примеров имеет много общего с первыми, но вместе с тем и важное отличие – объем загрузки W_f теперь постоянная величина. Так как конструктивные радиусы жестко связаны соотношением

$$\pi L_f (r_0^2 - r_e^2) = W_f, \quad (6)$$

то для однозначного определения геометрии загрузки достаточно задаться одним из них. Оба радиуса в данной серии варьируются в широких пределах, и поэтому подходящий масштаб длины приходится выбирать из

дополнительных соображений. Логично исходить из предельной ситуации, когда внутренняя поверхность стягивается в линию (вертикальную ось) и отвечающее ей минимальное значение r_e становится равным 0. Тогда радиус соответствующей внешней поверхности r_{\min} вычисляется по следующей из (6) формуле

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{W_f}{\pi L_f}}.$$

Как раз такое, по сути, исходное значение радиуса r_0 затем применялось для перемасштабирования расчетных уравнений, в результате которого они приняли окончательный вид

$$2 \exp \left[-2\bar{\alpha}_{Ve} \int_{\bar{r}_e}^{\bar{r}_0(\bar{r}_e)} \frac{\xi^{1+q-l} d\xi}{2\xi^q + \bar{\beta}_{Ve} \bar{t}_{pe}} \right] = \bar{C}_* + \exp \frac{\bar{\alpha}_{Ve} \bar{r}_e^{2-l} - \bar{\alpha}_{Ve} \bar{r}_0^{2-l}(\bar{r}_e)}{2-l}, \quad (7)$$

$$\int_{\bar{r}_e}^{\bar{r}_0(\bar{r}_e)} \frac{d\xi}{\xi [1 - \bar{\gamma}^{m_1} \bar{S}^{m_1}(\xi, \bar{t}_{he}; \bar{r}_e)]^{m_2}} = \Delta \bar{h}_*. \quad (8)$$

Здесь $\bar{S}(\bar{r}, \bar{t}_e; \bar{r}_e) = \frac{2\bar{\alpha}_{V2} \bar{t}_e \bar{r}^{q-l}}{2\bar{r}^q + \bar{\beta}_{Ve} \bar{t}_e} \exp \left[-2\bar{\alpha}_{Ve} \int_{\bar{r}}^{\bar{r}_0(\bar{r}_e)} \frac{\xi^{1+q-l} d\xi}{2\xi^q + \bar{\beta}_{Ve} \bar{t}_e} \right]$, $\bar{r}_0 = \sqrt{1 + \bar{r}_e^2}$, индекс «е» у коэффициентов $\bar{\alpha}_V$, $\bar{\beta}_V$ и времени \bar{t} , технологических параметров t_p, t_h , указывает на проведенную замену в соответствующих безразмерных комплексах ранее константы r_0 на характерное частное значение (r_{\min}) в данном случае переменной величины r_0 , так что

$$\bar{\alpha}_{Ve} = r_{\min}^{2-l} \left(\frac{Q_f}{2\pi L_f} \right)^{l-1} \alpha_V, \quad \bar{\beta}_{Ve} = n_0 r_{\min}^{2-q} \left(\frac{Q_f}{2\pi L_f} \right)^{q-1} \beta_V, \quad \bar{t}_e = \frac{Q_f t}{2\pi n_0 L_f r_{\min}^2}.$$

Итак, важнейший технологический параметр (\bar{t}_f) рассчитывался как функция от радиуса-аргумента \bar{r}_e по представленным в удобной форме уравнениям (7), (8). При этом помимо тех же значений l дискретно менялся ключевой для описания удаления из суспензии взвеси массообменный коэффициент ($\bar{\alpha}_V$), что позволило отчасти отразить разнообразие адгезионных свойств у реальных фильтрующих материалов. Последствиями согласованного увеличения радиусов r_e и r_0 непосредственно являются утоньшение слоя загрузки, уменьшение гидравлической нагрузки (при фиксированной производительности фильтра Q_f) и неравномерности фильтрационного течения. Вследствие сложной «игры» перечисленных факторов и идентификации длительности \bar{t}_f с наименьшим из времен \bar{t}_p, \bar{t}_h зависимость между ней и радиусом \bar{r}_e приобретает специфический характер с выраженным максимумом и существенно отличается при усиленном (рис.4) и ослабленном (рис.5) прилипанию взвеси к элементам (зернам) загрузки.

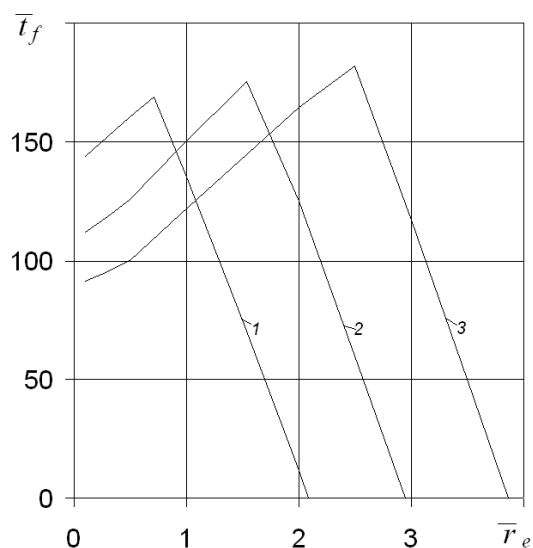


Рис. 4. Зависимость $\bar{t}_f(\bar{r}_e)$ при $l = 0.7$: **1** – $\bar{\alpha}_{ve} = 8$, **2** – $\bar{\alpha}_{ve} = 10$, **3** – $\bar{\alpha}_{ve} = 12$

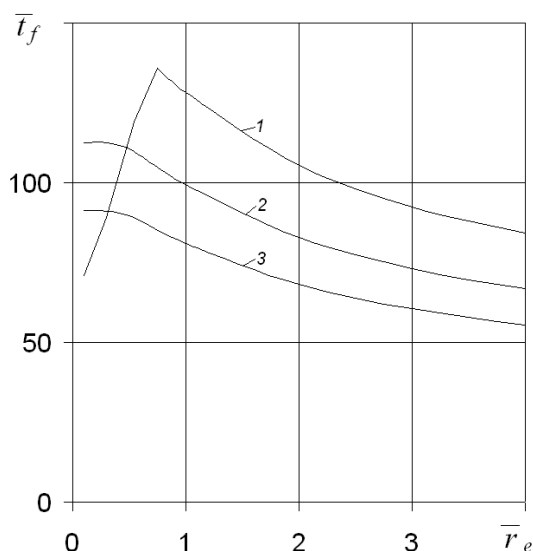


Рис. 5. Зависимость $\bar{t}_f(\bar{r}_e)$ при $l = -0.3$: **1** – $\bar{\alpha}_{ve} = 8$, **2** – $\bar{\alpha}_{ve} = 10$, **3** – $\bar{\alpha}_{ve} = 12$

В частности, при $l = 0.7$ по мере роста \bar{r}_e сначала имеет место значимое продление непрерывной работы фильтра вплоть до максимальной (185.8 при $\bar{\alpha}_{ve} = 12, \bar{r}_e = 2.47$), а затем его эффективность за счет прогрессирующего сокращения толщины цилиндрического слоя и гидравлической нагрузки падает. Более того, при $\bar{r}_e \geq \bar{r}_{e*}$ такая нагрузка вообще оказывается неспособной осветлять суспензию до нужной кондиции, что лишний раз подтверждает необходимость тщательного обоснования плоскорадиального фильтрования. Применение хорошосорбирующего материала при малой внутренней поверхности загрузки может даже осложнить действие фильтра из-за серьезного гидравлического сопротивления слоя относительно большой толщины, но зато благодаря рациональному подбору ее обоих радиусов удастся заметно позже

проводить промывку. Темп изменения длительности \bar{t}_f заметно снижается, если фильтрационный поток препятствует образованию осадка (рис. 5). Тем не менее, в целом величина \bar{t}_f разнится в данном ($l = -0.3$) и первом ($l = 0.7$) случаях не слишком сильно, поскольку уменьшение гидравлической нагрузки и пути фильтрации фактически сказывается только на защитных свойствах слоя загрузки, а в большей степени при выбранных исходных данных работу фильтра лимитируют чрезмерные потери напора.

Алгоритм теоретического обоснования лучших с технологической точки зрения радиусов цилиндрической загрузки излагается на конкретном примере. Исходная информация содержит данные о четырех группах модельных параметров. Первая группа (параметры осветления) включает такие значения: $l = 0.6, q = 1, \alpha_V = 40 \text{ м}^{-1/3} \text{ ч}^{-2/3}, \beta_V = 0.03 \text{ м}^{-1}, \gamma = 28$. Ко второй группе принадлежат фильтрационные параметры со следующими значениями: $k_0 = 10 \text{ м/ч}, n_0 = 0.35, H_d = 0, m_1 = 1, m_2 = 3$. Технология разделения суспензии определяется параметрами: $Q_f (25 \text{ м}^3/\text{ч}), \tilde{N}_0 (2.5 \cdot 10^{-5})$ и $C_* (2.5 \cdot 10^{-6})$, $\Delta h_* = 1.5 \text{ м}$. Конструктивные параметры заданы частично, а именно, имеется в распоряжении фильтрующий материал объемом $W_f = 2.5 \text{ м}^3$ при предельной высоте слоя загрузки $L_f = 2.5 \text{ м}$. Необходимо установить радиусы внутренней (r_e) и внешней (r_0) поверхностей загрузки, при которых длительность непрерывной работы фильтра будет наибольшей.

Так как все расчеты проводились с помощью формул и уравнений в безразмерной форме, а $W_f = const$, то предварительно вычислялись

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{2.5}{\pi \cdot 2.5}} = 0.564 \text{ м},$$

$$\bar{\alpha}_{Ve} = 0.564^{5/6} \left(\frac{25}{2\pi \cdot 2.5} \right)^{-2/3} \cdot 40 = 11.297, \quad \bar{\beta}_{Ve} = 0.35 \cdot 0.564 \cdot 0.03 = 0.006,$$

$$\bar{\gamma} = 28 \cdot 2.5 \cdot 10^{-5} = 7 \cdot 10^{-4}, \quad \bar{C}_* = 0.1, \quad \Delta \bar{h}_* = 2\pi \cdot 10 \frac{2.5 \cdot 1.5}{25} = 9.425.$$

Далее последовательно рассчитывались зависимости времени \bar{t}_p, \bar{t}_h от радиуса \bar{r}_e , исходя из уравнений (7), (8). Соответствующие кривые показаны на рис.6. Видно, что относительная длительность фильтроцикла может достичь значения 244.6, если \bar{r}_e равно 1.647. В размерных величинах это означает, что фильтр с цилиндрической загрузкой, внутренний и внешний радиусы которой $r_e = 0.929 \text{ м}, r_0 = 1.087 \text{ м}$, способен в рассматриваемых условиях работать с высоким качеством и продуктивно максимально долго – в течение 17.1 часов.

В заключение важно отметить, что результаты целенаправленного изучения аналитическими методами связи между геометрией и технологией

фильтрации прежде всего следует расценивать как иллюстративный материал. И, например, иногда достаточно уточнить параметр γ , характеризующий состав осадка как следствие взаимодействия трех фаз (фильтрующий материал, вода и примесь), чтобы соотношение между временами \bar{t}_p, \bar{t}_h стало в принципе другим и вследствие этого скачкообразно изменилась длительность \bar{t}_f . И все-таки, данные наработки позволяют составить общее и главное – реальное представление об интенсификации плоскорадиального фильтрации благодаря варьированию размерами цилиндрической загрузки, а базовое решение является надежным инструментом для их практической реализации.

Выводы

Одним из резервов интенсификации плоскорадиального фильтрации является рациональный выбор внутреннего и внешнего радиусов цилиндрической загрузки с учетом физико-химических свойств фильтрующего (зернистого материала) и суспензии. Опираясь на теоретическое решение указанной задачи и вытекающие из него уравнения относительно технологических времен (защитного действия загрузки и достижения предельных потерь напора) в принципе возможно подобрать такие их значения, что при имеющемся ограниченном количестве материала будет обеспечена наибольшая продолжительность работы фильтра.

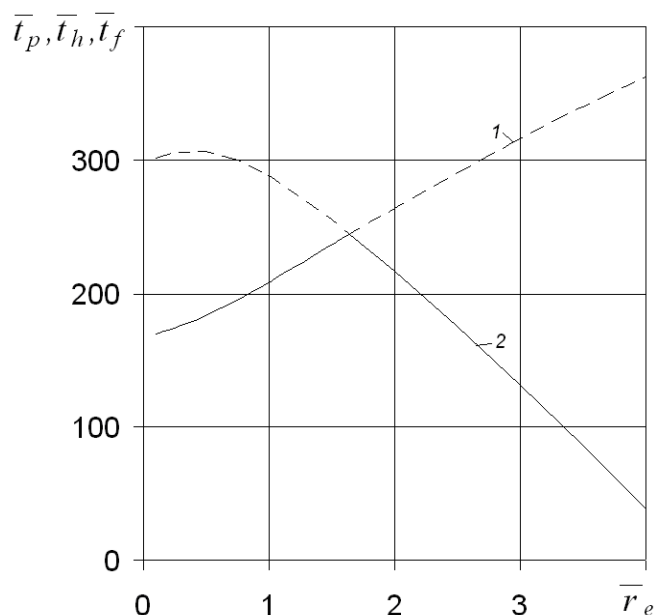


Рис. 6. Зависимости $\bar{t}_p(\bar{r}_e)$, $\bar{t}_h(\bar{r}_e)$, $\bar{t}_f(\bar{r}_e)$: сплошная – \bar{t}_f , 1 – \bar{t}_p , 2 – \bar{t}_h

Список литературы

1. *Войтов Е.Л.* Доочистка биологически очищенных городских сточных вод на радиальных фильтрах. Автореферат дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук (05.23.04). – Новосибирск, 1974. – 27 с.
2. *Грабовский П.А., Ларкина Г.М., Прогульный В.И.* Промывка водоочистных фильтров. – Одесса: Оптимум, 2012. – 240 с.
3. *Дзюбо В.В., Алферова Л.И.* Фильтрация природных вод в режиме неравномерных скоростей // Вестник ТГАСУ. – 2007. – № 2. – С.180-190.
4. *Поляков В.Л.* О теоретическом обосновании интенсификации осветления суспензий безреагентным фильтрованием при постоянной гидравлической нагрузке // Вісник НУВГП. – 2013. – вип.61. – С.52-59.
5. *Поляков В.Л.* Теоретический анализ длительности фильтроцикла // Химия и технология воды – 2009. – 31, № 6. – С.605-618.
6. *Поляков В.Л.* Теоретический анализ плоскорадиального фильтрования суспензии // Доп.НАН Украины. – 2013. – № 12. – С.52-59.
7. *Миц Д.М.* Теоретические основы технологии очистки воды. – Москва: Стройиздат, 1964. – 155 с.
8. *Gross M.J., Albinger O., Jewett D.G., Logan B.E., Bales R.C., Arnold R.G.* Measurement of bacterial collision efficiency in porous media // Water Res. – 1995. – 29, N4. – P.1151-1158.
9. *Ison C.R., Ives K.J.* Removal mechanism in deep bed filtration // Chem. Engng. – 1969. – V.21. – P.337-350.
10. *Сенявин М.М., Веницианов Е.В., Аюкаев Р.И.* О математических моделях и инженерных методах расчета процесса очистки природных вод фильтрованием // Водные ресурсы. – 1977. – № 2. – С.157-170.