

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

О ТЕОРИИ ПЛОСКОРАДИАЛЬНОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ И ЕЕ НЕКОТОРЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Зроблено огляд проведених раніше досліджень аналітичними методами нетрадиційного плоскорадіального фільтрування. Наведено деякі залежності для визначення вмісту суспензії в фільтраті, тривалості фільтроциклу, оптимальних в технологічному відношенні розмірів циліндричного завантаження. Представлено результати розрахунків характерних прикладів.

Ключові слова: плоскорадіальное фільтрування, тривалість фільтроцикла, завантаження, висота, радіус, методики.

Сделан обзор проведенных ранее исследований аналитическими методами нетрадиционного плоскорадiaalного фильтрования. Приведены некоторые зависимости для определения содержания взвеси в фильтрате, длительности фильтроцикла, оптимальных в технологическом отношении размеров цилиндрической загрузки. Даны результаты расчетов характерных примеров.

Ключевые слова: плоскорадiaalное фильтрование, длительность фильтроцикла, загрузка, высота, радиус, методики.

Review was performed of own planar radial filtration studies by analytical methods. A few relationships were given to determine suspension content in filtrate, filter run, optimal sizes of cylindrical filter medium. Characteristic examples were calculated.

Key words: planar radial filtration, filter run, filter medium, height, radius, techniques.

При освітленні слабоконцентрованих суспензій з допомогою прямооточного фільтрування застосування хорошосорбуючих матеріалів нецелесообразно ввиду швидкого заилення входного участка загрузки. Поэтому ускоренно растет ее гидравлическое сопротивление и преждевременно исчерпывается энергетический ресурс водоочистного фильтра. Обеспечить более равномерное распределение осадка в плоской загрузке и тем самым замедлить рост потерь напора в ней удастся благодаря, во-первых, использованию материалов с умеренной адгезионной способностью, во-вторых, устройству загрузок со слоистой структурой и зернами различной крупности. Однако в обоих случаях достигается незначительный положительный эффект. Существенно же продлить время

непрерывной работы фильтра возможно, если организовать движение суспензии в строго радиальном направлении [1, 2]. Тогда, несмотря на постоянство гидравлической нагрузки, что характерно для основного режима фильтрования, скорость фильтрования V будет переменной вдоль фильтрационного течения. Давно известно, что массообменные коэффициенты α , β существенно зависят от V [3, 4] и при математическом моделировании фильтрования оправданно принимать для них обобщенную степенную форму, так что

$$\alpha = \alpha_V V^l, \quad \beta = \beta_V V^q. \quad (1)$$

Следовательно, изменение V обусловит соответствующие изменения указанных коэффициентов. Установлено теоретическим и экспериментальным путем, что показатель степени l может быть и отрицательным, и положительным. С физической точки зрения данный факт означает, что фильтрационный процесс в состоянии соответственно ослаблять или усиливать прилипание частиц суспензии к частицам-коллекторам. Таким образом, подавая исходную воду в зависимости от способа влияния фильтрационного потока на адгезионный процесс снаружи или изнутри, в принципе возможно добиться намного более равномерного отложения взвеси в порах однородной загрузки. Если же ее материал способен интенсивно извлекать взвесь из суспензии, то осветлительный потенциал фильтра удастся реализовывать значительно полнее. О серьезных преимуществах нетрадиционного плоскорадиального фильтрования (ПРФ) перед традиционным прямоточным (ПТФ) свидетельствуют обстоятельные теоретические исследования. Наряду с историей вопроса их результаты обстоятельно изложены в ряде работ, например [5-8]. Ниже дается ретроспективное описание некоторых из них, что позволяет получить общее представление о достоинствах и перспективах ПРФ. Внимание акцентируется на приложениях разработанной теории ПРФ. Дана краткая характеристика двух из них, которые имеют особое значение для практики фильтрования. Первым является методика, предназначенная для вычисления технологических времен – времени защитного действия загрузки t_p , времени достижения потерями напора предельно допустимой величины t_h . Длительность фильтроцикла отождествляется с меньшим из них. Второе приложение представляет собой методику инженерного расчета рациональных в технологическом отношении геометрических параметров цилиндрической загрузки. Здесь под ними понимаются такие высота и радиусы слоя загрузки, при которых с учетом принимаемых ограничений гарантируется максимальная длительность фильтроцикла.

Основополагающее значение в теории ПРФ имеет математическая модель, состоящая из двух взаимосвязанных блоков, Осветлительный блок включает уравнения массопереноса и массообмена между твердой и жидкой фазами загрузки:

$$V(r) \frac{\partial C}{\partial r} \mp \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \alpha_v V^l(r) C - \beta_v V^q(r) S, \quad (3)$$

граничное и начальное условия:

$$r = r_{0,e}, \quad C = C_0; \quad t = 0, \quad S = 0. \quad (4)$$

Фильтрационный блок содержит уравнение движения (обобщенный закон Дарси) и закон изменения гидравлического сопротивления заиляемой загрузки:

$$V(r) = \pm k(S) \frac{\partial h}{\partial r}, \quad (5)$$

$$k(S) = k_0 \left[1 - \left(\gamma \frac{S}{n_0} \right)^{m_1} \right]^{m_2}; \quad (6)$$

граничное условие

$$r = r_{e,0}, \quad h = H_d. \quad (7)$$

Здесь C , S – объемные концентрации взвешенных и осажденных частиц суспензии; α_v , β_v – приведенные коэффициенты скоростей прилипания и отрыва данных частиц; r_0 , r_e – радиусы внешней и внутренней цилиндрических поверхностей; C_0 , H_d – фиксированная объемная концентрация взвеси на входе в загрузку и напор на выходе из нее; k , k_0 – коэффициенты фильтрации заиленной и чистой загрузки; h – пьезометрический напор; γ – доля по объему осажденных частиц суспензии в осадке; n_0 – пористость чистой загрузки; α_v , l , β_v , q , m_1 , m_2 – эмпирические константы; верхние знаки в (2), (5), первые индексы в (4), (7) относятся к случаю подачи исходной воды извне.

Итак, фактически сформулированы две основополагающие для теории плоскорадиального фильтрования математические задачи. С помощью аналитических методов были получены их частные строгие и общие приближенные решения. Первые пригодны для любых значений показателя l и единственного значения q (0). Вторые же могут использоваться также и при произвольных значениях q . Из указанных решений вытекают зависимости, позволяющие просто прогнозировать пространственно-временные изменения всех характеристик фильтрования. Прежде всего среди них следует выделить зависимости относительно объемных концентраций взвешенных C и осажденных частиц суспензии, а также напора. Для большей общности они давались в безразмерной форме. Их важными следствиями являлись формулы для расчета выходной концентрации взвешенного вещества C_e и потерь напора в загрузке. Ниже множество результатов теоретических исследований ПРФ иллюстрируется

отдельными формулами и уравнениями, благодаря которым удается оперативно отслеживать качество фильтрата и оценивать защитные свойства загрузки. В случае подачи исходной воды извне ключевое значение приобретает следующая приближенная формула [5, 6]

$$\bar{C}_e(\bar{t}) = \frac{C_e(t)}{C_0} = 2 \exp \left[-2\bar{\alpha}_v \int_{\bar{r}_e}^1 \frac{\xi^{1+q-l} d\xi}{2\xi^q + \bar{\beta}_v \bar{t}} \right] - \exp \frac{\bar{\alpha}_v (\bar{r}_e^{2l} - 1)}{2l}, \quad (8)$$

где $\bar{\alpha}_v = r_0 V_o^{l-1} \alpha_v$, $\bar{\beta}_v = n_0 r_0 V_o^{q-1} \beta_v$, $\bar{t} = V_o t / (n_0 r_0)$, $\bar{r}_e = r_e / r_0$; V_o – постоянная гидравлическая нагрузка. Подобная строгая формула была [5, 6]

$$\bar{C}_e(\bar{t}) = e^{-U_0} \left[e^{-\bar{\beta}_v \bar{t}} I_0 \left(2\sqrt{\bar{\beta}_v U_0 \bar{t}} \right) + \bar{\beta}_v \int_0^{\bar{t}} e^{-\bar{\beta}_v \lambda} I_0 \left(2\sqrt{\bar{\beta}_v U_0 \lambda} \right) d\lambda \right], \quad (9)$$

где $U_0 = \bar{\alpha}_v (1 - \bar{r}_e^{2l}) / (2 - l)$, I_0 обозначает функцию Бесселя мнимого аргумента первого рода нулевого порядка.

Исходя из вышеупомянутых решений и двух критериев, были выведены уравнения относительно технологических времен t_p , t_h . Так, в случае подачи исходной воды изнутри безразмерное время \bar{t}_p предложено находить подбором из приближенного уравнения [7]

$$2 \exp \left(-2\bar{\alpha}_v \bar{r}_e^{l-1} \int_{\bar{r}_e}^1 \frac{\xi^{1+q-l} d\xi}{2\xi^q + \bar{\beta}_v \bar{r}_e^q \bar{t}_p} \right) = \bar{C}_* + \exp \frac{\bar{\alpha}_v \bar{r}_e (1 - \bar{r}_e^{l-2})}{2 - l}, \quad (10)$$

где $\bar{C}_* = C_*/C_0$, C_* – предельно допустимая нормативами концентрация взвеси в фильтрате. В некоторых частных случаях удалось уравнение (10) разрешить относительно \bar{t}_p . Кстати, теоретическим путем установлено, что подача осветляемой воды снаружи предпочтительнее, если фильтрационный процесс усиливает адгезионный ($l > 0$) и, наоборот, лучше подавать такую воду изнутри при $l < 0$.

Кроме того, для теоретического обоснования оптимальных в технологическом отношении размеров цилиндрической загрузки разработана специальная методика. Более подходящей для базовых уравнений здесь оказалась размерная форма ввиду варьирования в широких пределах геометрических параметров. Их окончательный вид получен с учетом двух допущений, а именно, объем фильтрующего материала и производительность фильтра Q считались фиксированными. Тогда приближенное уравнение относительно времени t_p как функции от двух независимо меняющихся параметров (высоты загрузки L_r , радиуса r_e) стало таким [8]

$$2 \exp \left[-2\alpha_v Q^{l-1} (2\pi L_r)^{q-l+1} \int_{r_e}^{r_0(r_e, L_r)} \frac{r^{q-l+1} dr}{2(2\pi L_r r)^q + \beta_v t} \right] = \bar{C}_* + \exp \left[-\alpha_v \left(\frac{Q}{2\pi L_r} \right)^{l-1} \frac{r_0^{2-l}(r_e, L_r) - r_e^{2-l}}{2-l} \right], \quad (11)$$

Опираясь на строгие и приближенные зависимости и уравнения, был проведен обстоятельный анализ осветлительного действия плоскорadiaльных фильтров в разнообразных условиях. Предварительно, используя в качестве эталонов точные формализмы, показана высокая точность их приближенных аналогов. Основное же внимание в количественном анализе было уделено длительности фильтроцикла как важнейшему показателю технологической эффективности водоочистных фильтров. На рис.1 и 2 приведены характерные результаты множественных вычислений максимальной длительности t_{fm} при $l=0.333$, $q=0$ в зависимости от соответствующих ей значений высоты L_r (рис.1) и радиуса r_e (рис.1, 2). Очевидно, что при высокой адгезионной способности фильтрующего материала t_{fm} демонстрирует слабую чувствительность по отношению к L_r . Вместе с тем уменьшение L_r вынуждает для сохранения максимального значения t_{fm} резко увеличивать радиусы загрузки (рис.2).

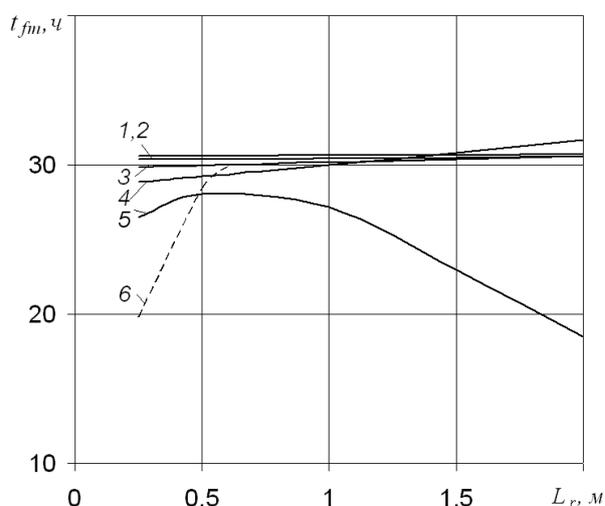


Рис.1. Зависимость $t_{fm}(L_r)$:

- 1** – $\alpha_v=70$, **2** – $\alpha_v=60$,
3,6 – $\alpha_v=50$,
4 – $\alpha_v=40$, **5** – $\alpha_v=30$;
6 – при $r_{e*}=2.5$ м

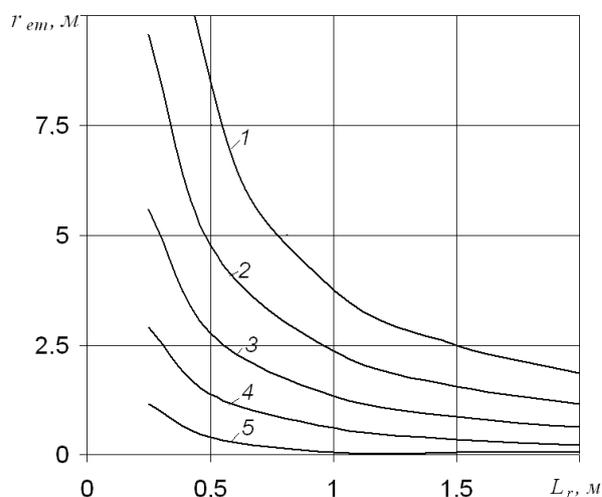


Рис.2. Зависимость $r_{em}(L_r)$:

- 1** – $\alpha_v=70$, **2** – $\alpha_v=60$,
3 – $\alpha_v=50$,
4 – $\alpha_v=40$, **5** – $\alpha_v=30$

Аналогичная методика была разработана для прямоточного фильтрования, что позволило корректно сопоставить действие плоской и цилиндрической загрузок. В итоге выяснилось, что при применении активно

сорбирующего взвесь материала вследствие более равномерного распределения осадка в цилиндрической загрузке возможно значительное продление работы фильтра до очередной промывки. Эффект при этом выражался в увеличении длительности фильтроцикла на многие десятки и даже сотни процентов [8].

В целом можно констатировать, что разработка теории плоскорадиального фильтрования, пока только при постоянной гидравлической нагрузке, позволяет осуществлять надежный прогноз разделения суспензии в плоскорадиальном фильтре. Ее важнейшими приложениями явились методики теоретического обоснования длительности фильтроцикла и размеров цилиндрической загрузки, при которых достигается максимальная отдача от ПРФ.

Список литературы

1. *Войтов Е.П.* 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. *Дзюбо В.В., Алферова Л.И.* Фильтрование природных вод в режиме неравномерных скоростей // Вестник ТГАСУ. – 2007. – № 2. – С.180-190.
3. *Сенявин М.М., Веницианов Е.В., Аюкаев Р.И.* О математических моделях и инженерных методах расчета процесса очистки природных вод фильтрованием // Водн. ресурсы. – 1977. - № 2. – С.157-170.
4. *Rajagopalan R., Tien C.* Trajectory analysis of deep-bed filtration with the sphere-in-cell porous media model // AJChE. – 1976. – 22. – P.523-533.
5. *Поляков В.Л.* Теоретическое обоснование плоскорадиального фильтрования суспензии // Прикладна гідромеханіка. – 2014. – 16 № 3. – С. 52-62.
6. *Поляков В.Л.* Теоретический анализ плоскорадиального фильтрования // Вода и экология, проблемы и решения. – 2015. – 2(62). – С.14-24.
7. *Поляков В.Л.* Расчет плоскорадиального фильтрования при подаче суспензии изнутри // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2015. – № 5 (89). – С.16-21.
8. *Поляков В.Л.* О рациональном выборе формы и размеров загрузки водоочистного фильтра// Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2015. – № 0 (93). – С.8-16.

Надійшло до редакції 17.11.2015