

ВЫБОР ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ФИЛЬТРОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ ФИЛЬТРАЦИИ

Степан Эпоян, Андрей Карагяур, Владимир Паболков

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40
E-mail: vk.knuca@ukr.net

Аннотация. Представлены результаты теоретических исследований влияния параметров фильтрующей загрузки на эффективность работы многослойного фильтра с горизонтальным направлением фильтрации.

Ключевые слова: фильтрация, диаметр зерен, пористость, фильтрующая загрузка, многослойный фильтр

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение населения качественной питьевой водой для Украины является приоритетной задачей. Для многих регионов проблема усугубляется дефицитом водных ресурсов. Кроме того, по причине изменения климата и сброса недостаточно очищенных сточных вод различных категорий ухудшается качество воды в водоемах. Большинство существующих очистных сооружений для подготовки питьевой воды из поверхностных источников включают такую важную стадию как фильтрование. В последнее время бурно развиваются и широко внедряются мембранные методы удаления коллоидных и взвешенных веществ. Но установки мембранной микро- и ультрафильтрации работают по принципу процеживания, из-за чего имеют небольшую грязеемкость и требуют частых промывок даже при небольших концентрациях взвеси в исходной воде [1]. Поэтому для станций очистки большой и средней производительности перспективным направлением решения проблемы качественной подготовки воды является интенсификация работы фильтровальных сооружений с зернистой загрузкой, которые являются наиболее сложным элементом всей системы.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Наиболее распространенными фильтровальными сооружениями на станциях водоподготовки с двухступенчатой очисткой являются скорые фильтры с однослойной и двуслойной загрузкой. Основным недостатком однослойных фильтров является накопление загрязнений в верхнем слое фильтрующей загрузки, и быстрый рост по этой причине потерь напора. Фильтр необходимо отключать на промывку, при этом грязеемкость нижних слоев загрузки остается неисчерпанной. Решить данную проблему позволяет применение двухпоточных или многослойных фильтров [5, 8, 9, 20, 22]. Но в двухпоточных фильтрах дренажная система для отвода фильтра

расположена непосредственно в фильтрующей загрузке, что увеличивает вероятность ее кольматации и попадания частиц загрузки в очищенную воду. Кроме того, конструкция таких сооружений и управление их работой значительно сложнее в сравнении с однопоточными фильтрами [8].

Также эффективным решением, но усложняющим технологическую схему очистки, является применение многоступенчатых фильтров с попеременным чередованием каждой ступени [18, 21].

Проблема многослойных фильтров состоит в том, что при промывке фильтрующая загрузка перемешивается и через некоторое время становится однородной. Данное явление наблюдается на многих очистных сооружениях городов Украины, в том числе города Харькова. Это происходит потому, что фильтрация и промывка протекают в параллельных направлениях.

Избежать перемешивания слоев можно, если направления фильтрации и промывки сделать перпендикулярными.

Известны конструкции фильтров, где вода последовательно фильтруется в горизонтальном направлении, а промывка осуществляется в вертикальном направлении. В этих сооружениях слои фильтрующей загрузки разделены пористыми или перфорированными перегородками, что препятствует их перемешиванию при промывке [2, 3].

Анализ конструкции подобных фильтров и выявил их основные недостатки [25]:

- Сбор промывной воды в данных устройствах предусмотрен в той части фильтра, которая непосредственно граничит с одной из перфорированных перегородок. При промывке основной поток воды будет двигаться не через фильтрующую загрузку, а в направлении меньшего сопротивления, т.е. через перегородку непосредственно переходить в камеру сбора промывной воды.
- При промывке невозможно обеспечить движение воды в вертикальном направлении, соответственно, необходимую для каждого слоя

интенсивность промывки. Промывная вода будет двигаться не только в вертикальном направлении, но и по пути наименьшего сопротивления через перфорированные перегородки в сторону загрузки с большей крупностью зерен. Это приводит к неудовлетворительному качеству регенерации фильтра и повышенным расходам промывной воды.

- В представленных фильтрах происходит одновременная промывка всех слоев: тех, где уровень загрязнений достиг предела, и тех, грязеемкость которых еще не исчерпана. Это также приводит также к повышенным эксплуатационным расходам.
- Так как большинство представленных фильтров радиальные, то скорость фильтрования в каждом из слоев не будет одинаковой. Это может привести к ухудшению качества фильтрования в слое, близком к центру в результате отрыва частиц взвеси от зерен загрузки вследствие повышенной скорости фильтрования.

Таким образом, конструкции фильтров с перпендикулярными направлениями фильтрации и промывки требуют усовершенствования.

Теоретически обосновать рациональные конструктивные и технологические параметры данных сооружений возможно с помощью математического моделирования.

Большинство существующих моделей работы скорых фильтров базируются на уравнениях, предложенных Д.М. Минцем [10], представляющих собой балансовое уравнение и уравнение кинетики. Скорость фильтрования в данных моделях зачастую принимается величиной постоянной [4, 14]. Влияние кольматации на рост потерь напора или не учитывается [14], или для определения потерь напора по толщине фильтрующей загрузки привлекаются дополнительные эмпирические зависимости, область применения которых ограничена. Данные модели могут усложняться: в [6] получены решения для фильтрации с убывающей скоростью, в [11] - для переменной концентрации взвешенных веществ в очищаемой воде, [14] - для двухслойного фильтра.

В ряде работ для моделирования непосредственно используются уравнения кинетики сорбции взвеси на зернах загрузки, переноса взвеси потоком фильтрующейся жидкости и уравнение фильтрации. Влияние кольматации учитывается привлечением эмпирической зависимости между коэффициентом фильтрации и количеством задержанной взвеси. Несмотря на сложность данных моделей, получены строгие решения при линейной и нелинейной кинетике [17], а также для нелинейного закона фильтрации [16, 19].

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Кроме усовершенствования фильтров с перпендикулярными направлениями фильтрации и промывки важной задачей является выбор фильтрующей загрузки. Ее параметры влияют как на кинетику осаждения взвеси, так и на динамику потока.

Таким образом, целью исследований является разработка методики оценки влияния параметров фильтрующей загрузки на эффективность работы фильтра с горизонтальным направлением фильтрации.

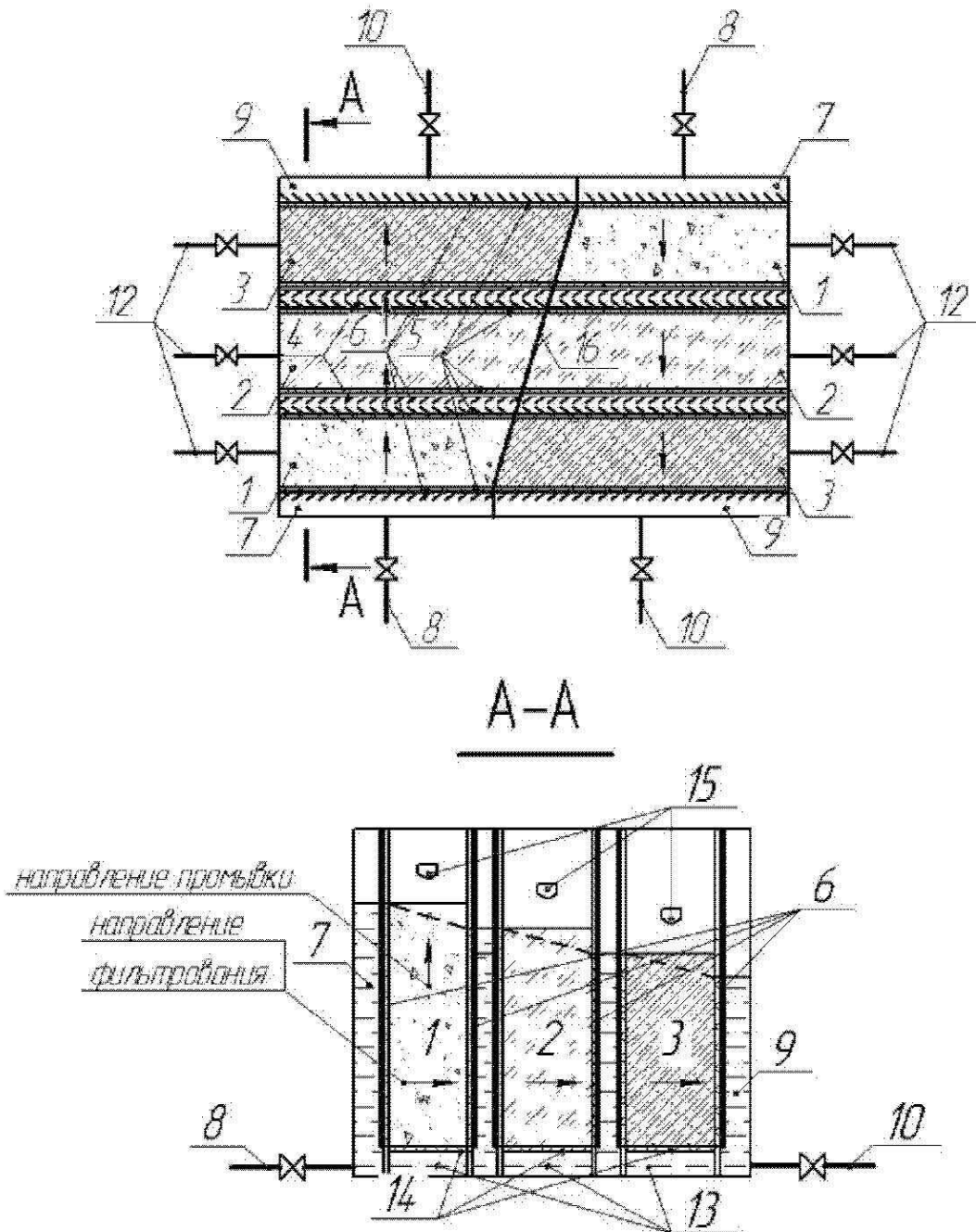
Для этого необходимо расширить систему основных уравнений, описывающих процесс фильтрации и кольматации в фильтре усовершенствованной конструкции, путем добавления зависимости, связывающей коэффициент фильтрации с параметрами фильтрующей загрузки, а также проанализировать влияние диаметра зерен загрузки каждого слоя на эффективность очистки.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

С учетом анализа существующих решений нами предложен фильтр с усовершенствованной конструкции (рисунок 1) [15].

Данный фильтр состоит из двух секций трапециевидной формы. Каждая из секций включает три камеры, рабочая часть которых заполнена фильтрующей загрузкой с уменьшающейся по направлению фильтрования крупностью зерен. Камеры разделены каналами из пористых перегородок, выполненных, например, из полимербетона. В каналах предусмотрены затворы, которые в режиме фильтрования открыты и свободно пропускают воду, а в режиме промывки закрыты. Это препятствует перетеканию промывной воды из одной камеры в другую. Благодаря этому промывке подвергаются только те камеры, грязеемкость загрузки которых исчерпана, что обеспечивает необходимую интенсивность промывки и уменьшает объемы промывной воды [13].

Промывная вода подается в нижнюю часть камер, которая отделена от рабочей части пористыми плитами. Над фильтрующей загрузкой с учетом ее расширения расположены желоба для отвода промывной воды.



1, 2, 3 – камеры с разной фильтрующей загрузкой; 4, 7, 9 – каналы; 5 – пористая перегородка; 6 – затворы; 8 – трубопровод исходной воды; 10 – трубопровод отвода фильтрата; 11 – трубопровод отвода промывной воды; 12 – трубопровод подачи промывной воды; 13 – нижняя часть камер; 14 – пористая плита; 15 – желоб; 16 – сплошная перегородка

Рис. 1 Скорый многослойный фильтр усовершенствованной конструкции

1, 2, 3 - filter chambers with varying filter loading, 4, 7, 9 - canals; 5 - porous wall, 6 - valves, 8 - pipeline of initial water, 10 - the filtrate discharge pipeline; 11 - outlet pipeline of washing water, 12 - pipeline supplying washing water, 13 - the lower part of the chamber, 14 - porous plate, 15 - canal, 16 - a solid wall

Fig. 1. Fast multilayer filter improved construction

Высота фильтрующей загрузки в каждой последующей по направлению фильтрации камеры имеет меньшее значение приблизительно на величину потерь напора. За счет роста потерь напора уменьшается уровень воды и площадь поперечного сечения. Чтобы сгладить в этом случае рост скорости фильтрации в каждой камере, секции фильтра разделены непроницаемой перегородкой, которая придает им трапециевидную форму. Эта перегородка обеспечивает увеличение ширины каждой последующей камеры, что замедляет рост скорости фильтрующегося потока, соответственно, замедляет перенос примеси и уменьшает вероятность отрыва задержанных частиц взвеси от фильтрующей загрузки [23].

Для описания процесса работы скорого фильтра предложенной конструкции для условий постоянства во времени расхода воды $Q = \text{const}$ выбрана следующая система уравнений [24]:

- уравнение фильтрации:

$$Q = V(x) \cdot h(x, t) \cdot k(x, t) \cdot \frac{\partial h(x, t)}{\partial x};$$

$$v(x, t) = -k(x, t) \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \quad (1)$$

- уравнение переноса взвешенных частиц потоком фильтрующейся жидкости:

$$(n_0 - S(x, t)) \frac{\partial C(x, t)}{\partial t} + v(x, t) \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial S(x, t)}{\partial t} = 0; \quad (2)$$

- уравнение массопередачи между жидкой и твердой фазами:

$$\frac{\partial S(x, t)}{\partial t} = b \cdot C(x, t) - a \cdot S(x, t); \quad (3)$$

где Q - производительность фильтра; $h(x, t)$ - напор (уровень воды) в фильтрующей загрузке; $v(x, t)$ - скорость фильтрации; $k(x, t)$ - коэффициент фильтрации; x - координата вдоль направления фильтрации, t - время; $V(x)$ - ширина фильтра (изменение обусловлено трапециевидностью секции); n_0 - начальная пористость фильтрующей загрузки; $C(x, t)$ - концентрация взвешенных веществ в фильтрующейся жидкости; $S(x, t)$ - концентрация задержанных взвешенных веществ в фильтрующей загрузке; a и b - коэффициенты, соответственно, отрыва и прилипания частиц взвеси к зернам загрузки.

Коэффициенты a и b определяются по зависимостям:

$$a = \frac{\alpha}{d_s}; \quad b = \frac{\beta}{(V(x, t) \cdot d_s)^{0,7}} \quad (4)$$

где α и β - коэффициенты, учитывающие физико-химические свойства загрузки и очищаемой суспензии; d_s - эквивалентный диаметр зерен загрузки.

Дополнительно использована зависимость коэффициента фильтрации от степени закольматированности частицами взвеси фильтрового пространства [12]:

$$k(x, t) = k_0 \left(1 - \frac{S(x, t)}{n_0} \right)^3, \quad (5)$$

где k_0 - коэффициент фильтрации загрузки вначале фильтроцикла (незакольматированной).

Система уравнений (1) - (5) решается при следующих граничных и начальных условиях:

- начальные условия:

$$t = 0; \quad k = k_0; \quad h(x) = \sqrt{h_0^2 - \frac{2 \cdot Q \cdot L}{k_0 \cdot V(x)}}; \quad C = 0; \quad S = 0;$$

- граничные условия:

$x = 0; \quad h = h_0; \quad C = C_0; \quad S$ находится из уравнения (3),

где L - толщина слоя фильтрующей загрузки.

Для многослойного фильтра концентрация взвеси в воде и напор на выходе из предшествующего фильтрующего слоя является граничным условием для последующего слоя.

Для анализа влияния таких параметров фильтрующей загрузки как диаметр зерен и пористость на коэффициент фильтрации можно воспользоваться формулой Слихтера [7]:

$$k_0 = A \cdot \left(\frac{n_0}{1 - n_0} \right) \cdot d_s^2 \cdot T_t, \quad (6)$$

где A - условный параметр, T_t - температурный коэффициент.

Следует отметить, что анализ различных расчетных зависимостей для определения коэффициента фильтрации, выполненный в [7], показал, что значения, получаемые с помощью формулы Слихтера, лежат в середине диапазона значений, получаемых с помощью других зависимостей.

Система уравнений (1) - (6) для каждого слоя решается численно конечно-разностным методом. На рисунке 2 представлен пример расчета концентрации взвеси в очищенной воде (C_2), выраженной в процентах от содержания взвеси в исходной воде, при различных эквивалентных диаметрах зерен фильтрующей загрузки первого (d_1) и второго (d_2) слоев.

На рисунке 2 виден минимальный экстремум параметра C_2 . Это можно объяснить следующим образом. Согласно зависимостям (4) вероятность прилипания частицы взвеси к зерну фильтрующей загрузки увеличивается с уменьшением диаметра зерна: зерна меньшего диаметра имеют большую удельную поверхность, что способствует лучшему массообмену. На процесс отрыва частицы диаметр

зерна имеет почти такое же влияние, но в диапазоне скоростей потока при фильтрации преобладает процесс прилипания, поэтому влияние процесса отрыва частиц не так существенно. С другой стороны, чем меньше диаметр зерен загрузки, тем меньше коэффициент фильтрации и больше потери напора (рисунок 3). При этом уровень воды в фильтрующей загрузке падает резко, уменьшая площадь поперечного сечения. При постоянном расходе это обуславливает увеличение скорости фильтрации, соответственно, более быстрый перенос взвеси и ее накопление на зернах загрузки, что еще более усиливает потери напора и приводит к ухудшению качества фильтрата.

На рисунке 4 представлен пример расчета концентрации взвеси в очищенной воде (C_2), выраженной в долях от содержания взвеси в

исходной воде, при различных значениях пористости фильтрующей загрузки первого (n_{01}) и второго (n_{02}) слоев.

Как видно из рисунка 4, наибольшее влияние на качество очистки оказывает пористость первого слоя. Это можно объяснить следующим. При уменьшении пористости первого слоя фильтрующей загрузки с одной стороны уменьшается коэффициент фильтрации, соответственно, падает уровень воды, возрастает скорость потока, в том числе, и во втором слое. Перенос взвеси происходит быстрее. С другой стороны, уменьшение пористости согласно зависимости (5) приводит к более быстрому насыщению фильтрующей загрузки взвешенными веществами, что также обуславливает более резкое увеличение потерь напора (рисунок 5).

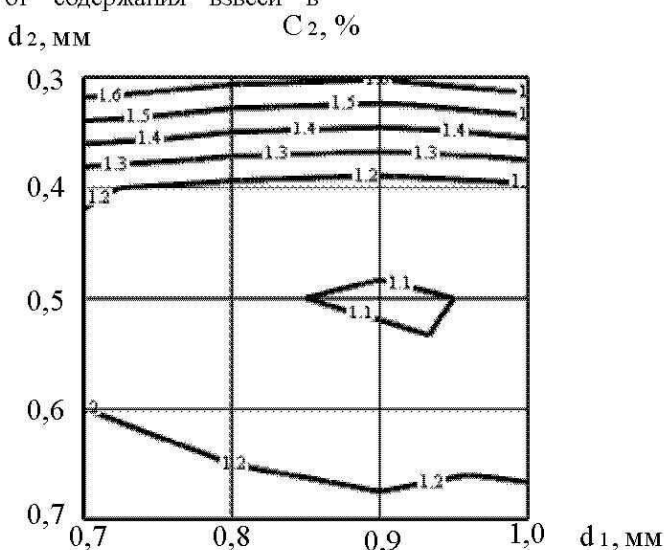


Рис. 2. Зависимость качества очистки от диаметра зерен фильтрующей загрузки

Fig. 2. The dependence of the purification quality on the diameter of the grain filter loading

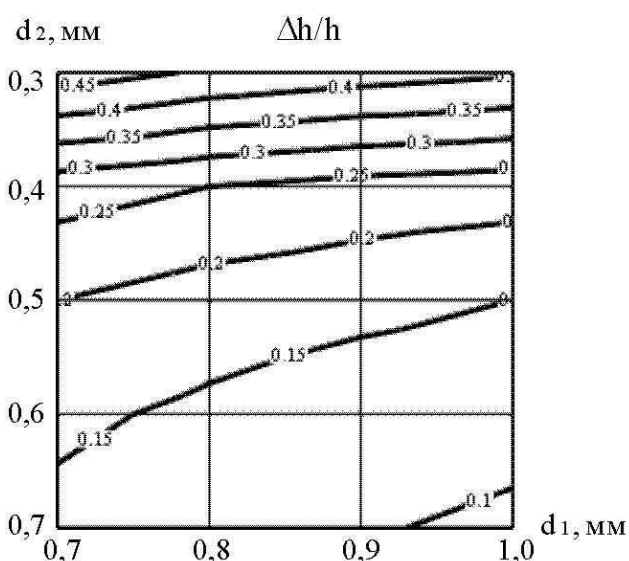


Рис. 3. Зависимость потерь напора от диаметра зерен фильтрующей загрузки

Fig. 3. The dependence of the head loss on the diameter of the grain filter loading

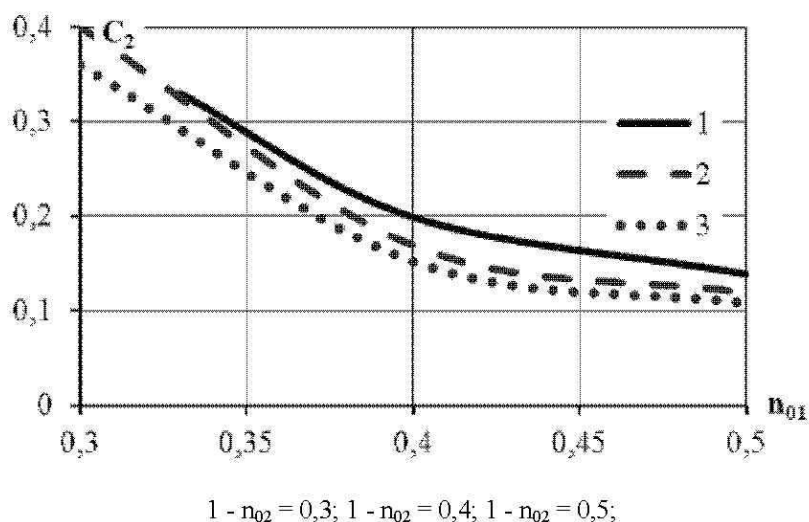


Рис. 4. Зависимость качества очистки от пористости фильтрующей загрузки

Fig. 4. The dependence of the purification quality on the porosity filter loading

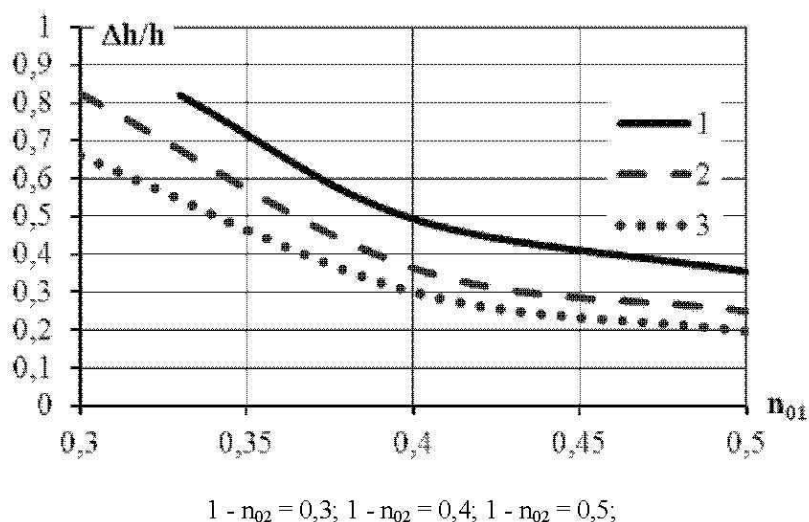


Рис. 5. Зависимость потерь напора от пористости фильтрующей загрузки

Fig. 5. The dependence of the head loss on the porosity filter loading

Следовательно, при использовании многослойных фильтров необходимо стремиться к применению для первых по направлению фильтрации слоев фильтрующих материалов не только с большим эквивалентным диаметром зерен загрузки, но и с большей пористостью.

Таким образом, представленная методика позволяет для многослойного фильтра усовершенствованной конструкции с заданными конструктивными и технологическими характеристиками подобрать фильтрующую

загрузку, обеспечивающую наибольшую эффективность очистки.

ВЫВОДЫ

Представлена конструкция усовершенствованного многослойного фильтра, позволяющая исключить перемешивание зерен фильтрующей загрузки при промывке, и предоставляющая возможность отдельной промывки каждого слоя. Также представлена математическая модель работы данного

сооружения, с помощью которой проведен анализ влияния таких параметров фильтрующей загрузки как эквивалентный диаметр зерен загрузки и пористость на эффективность очистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Eroyan, A. Karagiaur, S. Babenko. 2012 Researching the work of membrane ultrafiltration module / MOTROL // Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Motorization and power industry in agriculture. – Lublin. – V. 14, № 5, 53-56.
2. А.с. 1297889 СССР, МКИ В 01 D 23/10. Радиальный фильтр. – 3750826/23-26; Заявл. 06.06.84; Оpubл. 23.03.87, Бюл. №11. – 3 с.
3. А.с. 1722529 СССР, МКИ В 01 D 24/08. Радиальный двухслойный фильтр. – 4764772/26; Заявл. 04.12.89; Оpubл. 30.03.92, Бюл. №12. – 2 с.
4. Грабовський П.О., Гурінчик Н.О. 2006 Чисельна реалізація математичної моделі фільтрування // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. - - Вип. 6. - 4-13.
5. Грабовский П.А., Ларкина Г.М., Прогульный В.И. 2012 Промывка водоочистных фильтров. – Одесса: Оптимум. – 240.
6. Гурінчик Н.О. 2010 Моделювання та розрахунки очищення води фільтруванням зі швидкістю, що спадає : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація». - Одеса. - 21.
7. Довнорович С., Щигала Э. 2007 Определение параметров фильтрации флотационных хвостов обогатительных фабрик комбината «Польская медь» // Обогащение руд. - №3. – 37 – 41.
8. Епоян С.М., Кологитло В.Д., Друшляк О.Г., Сухоруков Г.Г., Айрапетян Т.С. 2010 Водопостачання та очистка природних вод: Навчальний посібник – X: Фактор. - 192.
9. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. 2010 Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. Т.2. Очистка и кондиционирование природных вод. – изд. 3-е, перераб. и доп.: Учеб. пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. – 552.
10. Минц Д.М. 1964 Теоретические основы технологии очистки воды. – М.: Стройиздат. – 156.
11. Нестер А.А., Демчик С.П., Смирнов А.Г. Статистическая интерпретация модели фильтрования // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология: Матер. 3-ей Всероссийской студ. науч.-техн. конф., 23-25 мая 2012 г., Казань [Электронный ресурс]. – Режим доступа к информации: <http://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=47032>
12. Олейник А.Я., Тугай А.М. 2001 Моделирование процессов кольматажа и суффозии в прифильтровой зоне скважин // Доповіди НАН України. - №9. – 190-194.
13. Паболков В.В. 2013 Особенности промывки многослойных фильтров с горизонтальным направлением фильтрации // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – Вип. 72. – 409-413.
14. Папков С.О., Рудов Ю.М. 2003 Математическая модель фильтрования через двухслойный крупнозернистый фильтр // Вестник СевГТУ [Электронный ресурс]. - Севастополь: Изд-во СевНТУ. - Вып. 43:Физика и математика. - 109-114. - Режим доступа до інформації: <http://178.219.241.250/jspui/bitstream/123456789/1682/1/vestn43.2003.Physics.109-114.pdf>
15. Пат. 101111 Україна, МПК В01D24/02. Багатошаровий фільтр для очищення води / Епоян С.М., Карагяур А.С., Паболков В.В.; заявник та патентовласник Харківський нац. ун-т будівництва та архітектури. - № а 2011 13969; заявл. 28.11.2011; опубл. 25.02.2013, Бюл. №4, 2013 р.
16. Поляков В.Л. 2007 Моделирование осветления суспензий в зернистых загрузках при нелинейной фильтрации // Коммунальное хозяйство городов. Научн. техн. сб. ХНАГХ. – К.: Техніка., – Вып. 74. – 222-230.
17. Поляков В.Л. 2009 Теоретический анализ длительности фильтроцикла // Хімія і технологія води [Електронний ресурс]. –Т.31 – №. 6. – 605-618. - Режим доступа до інформації: http://archive.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/khtv/2009_6/pdf/01polyakov.pdf
18. Поляков В.Л., Шевчук Е.А. 2007 Расчет ступенного фильтрования суспензий через зернистые загрузки // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Вип. 4(40), Ч.2, Рівне. – 544-553.
19. Саргсян А.А. 2004 Основные закономерности фильтрования при нелинейном законе фильтрации // Изв. НАН РА и ГИУА, Сер. ТН [Электронный ресурс]. – Т.LVII – №. 3. – 550-554. - Режим доступа до інформації: http://tech.asj-oa.am/2517/1/allN32004_split%2826%29.pdf
20. Тугай А.М., Орлов В.О. 2009 Водопостачання: Підручник. – К.: Знання. – 735.
21. Шевчук О.О. 2010 Інтенсифікація роботи багатоступеневих фільтрів з зернистим завантаженням: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація». - Київ. - 20.
22. Фрог Б.Н., Левченко А.П. 1996 Водоподготовка: Учебн. пособие для вузов – М.: Издательство МГУ. – 680.
23. Епоян С.М., Карагяур А.С., Паболков В.В. 2013 Конструктивные особенности фильтров с

- горизонтальным направлением фильтрации // Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві: Матер. практ. конф., 22-26 квітня 2013 р. м. Миргород. - К.: Товариство «Знання України». – 51-53.
24. Эпоян С.М., Карагяур А.С., Паболков В.В. 2012 Математическая модель работы многослойного фильтра с горизонтальным направлением фильтрации. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – Вип. 69. – 303-307.
25. Эпоян С.М., Карагяур А.С., Паболков В.В., Ушкварок А.Е. 2012 Усовершенствование конструкции многослойного скорого фильтра // Науковий вісник будівництва. – ХНУБА, ХОТВ АБУ. – Вип. 68. – 284-288.
- SELECTION OF FILTER LOADING FOR MULTILAYER FILTERS WITH HORIZONTAL FILTERING
- Summary.** The results of theoretical studies of the influence of filter loading parameters on the efficiency of multilayer filter with horizontal filtering.
- Key words:** filtering, grain diameter, porosity, filter loading, multilayer filter.