

С.М. ЭПОЯН, доктор технических наук,
А.С. КАРАГЯУР, доктор технических наук
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
В.Н. ВОЛКОВ
Коммунальное предприятие «Харьководоканал»

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СКОРОГО ФИЛЬТРА С ОТВОДОМ ЧАСТИ ПОТОКА В НИЖНИЕ СЛОИ И ДООЧИСТКОЙ НА ДРЕНАЖНОЙ СИСТЕМЕ

Розроблено математичну модель процесу послідовного фільтрування малокоцентрованої суспензії через шар зернистого завантаження і пористу перегородку з волокнистих полімерних матеріалів з відведенням частини потоку в нижні шари. Розглянуто фільтрування з утворенням шару осаду на пористій перегородці. Обґрунтовано основні напрями вдосконалення конструкції швидкого фільтра і дренажної системи.

Ключові слова: зернисте фільтруюче завантаження, завислі речовини, дренажна система, волокнисті полімерні матеріали, математична модель.

Разработана математическая модель процесса последовательного фильтрования малокоцентрированной суспензии через слой зернистой загрузки и пористую перегородку из волокнистых полимерных материалов с отводом части потока в нижние слои. Рассмотрено фильтрование с образованием слоя осадка на пористой перегородке. Обоснованы основные направления усовершенствования конструкции скорого фильтра и дренажной системы.

Ключевые слова: зернистая фильтрующая загрузка, взвешенные вещества, дренажная система, волокнистые полимерные материалы, математическая модель.

A mathematical model of the consistent filtration process of a low-concentration suspension through a layer of granular media and a fibrous polymeric porous septum with the bypass of part of the flow to the lower layers is developed. The filtration with the formation of a sediment layer on a porous septum is considered. The main directions of improvement of the rapid filter design and drainage system are justified.

Keywords: granular filtering media, suspended solids, drainage system, fibrous polymeric materials, mathematical model

Скорые фильтры с зернистой загрузкой являются важной составляющей в технологической схеме подготовки питьевой воды из поверхностных источников. При эксплуатации данных сооружений

существенной проблемой является обеспечение как можно полного использования грязеемкости фильтрующей загрузки. Это дает возможность увеличить продолжительность фильтроцикла, и соответственно, уменьшить количество промывной воды, необходимой для регенерации, что, в свою очередь, обеспечивает значительное сокращение эксплуатационных затрат [1, 3]. При однослойной загрузке первый по направлению фильтрации слой зачастую быстро кольматируется, потери напора достигают предельных значений, фильтр необходимо отключать на регенерацию. При этом нижние слои остаются практически «чистыми».

Для более равномерного распределения загрязнений по высоте фильтрующего слоя широко используют двухслойную загрузку с убывающей по направлению фильтрации крупностью зерен [2, 1370; 3, 9; 4, 137]. Во избежание перемешивания слоев при промывке они должны иметь разную плотность. Это условие, плюс требования для каждого слоя к высокой пористости, достаточной извлекающей способности, устойчивости к истиранию, а также увеличение расширения слоя при промывке, ограничивает выбор материалов как естественного, так и искусственного происхождения.

В связи с этим извлечение из воды тонкодисперсной взвеси с помощью полимерных волокнистых пористых материалов имеет ряд преимуществ. При том, что обеспечивается качество очистки не хуже, чем на зернистой загрузке из кварцевого песка или пенополистирола [5, 8], исключается вынос частиц волокнистой загрузки, соответственно, ее перемешивание с зернистым слоем, возможно изготовление оболочек в широком диапазоне размеров пор, в том числе переменной величины.

Для интенсификации работы скорых фильтров предлагается проводить доочистку воды после прохождения зернистого слоя на пористых оболочках дренажных систем [6, 102]. Для уменьшения потерь напора при регенерации возможно применение оболочек с порами, расширяющимися при промывке, или отдельных дренажей, работающих только на прием фильтрата. При наличии доочистки крупность зернистой загрузки можно увеличить, подобрав такие параметры, при которых продолжительность фильтроцикла будет максимальна. Если же характеристики существующих зернистых материалов не соответствуют рациональным величинам, то повысить эффективность фильтрации возможно за счет отвода части потока из надфильтрового пространства в нижние слои. Регулируя высоту расположения переливной перегородки и глубину отвода части потока можно добиться равномерного распределения загрязнений по толщине зернистого слоя, а также обеспечить рациональную нагрузку на пористую волокнистую оболочку.

Целью исследований является усовершенствование математической модели работы скорого фильтра с отводом части потока в нижние слои, где осуществляется последовательная очистка малоконцентрированной суспензии в зернистом слое и на пористой волокнистой перегородке, а также теоретическое обоснование рациональных параметров данного сооружения.

При математическом моделировании процесса последовательной очистки воды на скором фильтре с зернистой и волокнистой загрузкой, а также отводом части потока в нижние слои, приняты следующие допущения и упрощения:

- течение очищаемой жидкости через слой зернистой загрузки и пористую перегородку происходит в ламинарном режиме;
- вклад диффузии в перенос взвешенных веществ при фильтрации в слое зернистой загрузки мал в сравнении с другими составляющими;
- кинетика изменения концентрации взвешенных веществ в зернистой загрузке описывается линейной зависимостью;
- фильтрование через пористую перегородку происходит с образованием слоя несжимаемого осадка, пористая перегородка не коагулируется;
- образование слоя осадка на пористой перегородке происходит равномерно по всей ее площади;
- содержание взвеси в воде, прошедшей через пористую перегородку, зависит от ее рейтинга фильтрации (размеров пор) и не превышает критическое значение для фильтрата;
- подача воды на фильтр не изменяется во времени $Q_0 = const$;
- в начале фильтроцикла остаточная концентрация взвешенных веществ в зернах загрузки и на поверхности пористой перегородки равна нулю.

С учетом принятых допущений основу математической модели работы фильтра с доочисткой на дренажной системе и отводом части потока в нижние слои составляют следующие уравнения и зависимости:

1) уравнение фильтрации

– для потока 1, который фильтруется через верхний слой зернистой загрузки,

$$Q_1(t) = \frac{\rho g}{\mu} \frac{h_w(t) + h_{31} + h_{32}}{\frac{R_{3.3.1}(t)}{F_{3.3.}} + \left(1 + \frac{Q_2(t)}{Q_1(t)}\right) \left(\frac{R_{3.3.2}(t)}{F_{3.3.}} + \frac{R_{oc}(t)}{F_{п.п.}} + \frac{R_{п.п.}}{F_{п.п.}}\right)}; \quad (1)$$

– для потока 2, который отводится в нижний слой зернистой загрузки,

$$Q_2(t) = \frac{\rho g}{\mu} \frac{h_w(t) + h_{31} + h_{32}}{\frac{R_n(t)}{b(h_w(t) - h_n)} + \left(1 + \frac{Q_2(t)}{Q_1(t)}\right) \left(\frac{R_{3.3.2}(t)}{F_{3.3.}} + \frac{R_{oc}(t)}{F_{п.п.}} + \frac{R_{п.п.}}{F_{п.п.}}\right)}; \quad (2)$$

2) зависимость, описывающая изменение толщины слоя воды над слоем фильтрующей загрузки

$$h_w(t) = \frac{Q_0 - (Q_1(t) + Q_2(t))}{F_{3.3.}} t; \quad (3)$$

3) уравнение переноса взвешенных частиц взвеси потоком фильтрующейся жидкости

$$n_3(z,t) \frac{\partial C(z,t)}{\partial t} + V(t) \frac{\partial C(z,t)}{\partial z} + \frac{\partial S(z,t)}{\partial t} = 0; \quad (4)$$

4) уравнение массопередачи частиц взвеси из воды в твердую фазу зернистой загрузки

$$\frac{\partial S(z,t)}{\partial t} = b(t)C(z,t) - a(t)S(z,t); \quad (5)$$

5) зависимости для определения кинетических коэффициентов $a(t)$ и $b(t)$

$$a(t) = \frac{V(t)}{d_{3.3.}} \alpha; \quad b(t) = \frac{\beta}{(V(t))^{0.7} d_{3.3.}^{1.7}}; \quad (6)$$

6) зависимость, учитывающая изменение пористости зернистой загрузки в результате кольматации

$$n_{3.3.}(z,t) = n_{03.3.} - \frac{S(z,t)}{\gamma}; \quad (7)$$

7) зависимость, учитывающая изменение удельного сопротивления зернистой загрузки в результате кольматации

$$r_{3.3.}(z,t) = r_{03.3.} \left(\frac{n_{03.3.}}{n_{3.3.}(z,t)} \right)^3; \quad (8)$$

8) зависимости для определения удельного сопротивления незакольматированной загрузки, осадка и пористой перегородки (для пористой перегородки зависимость Козени-Кармана модифицирована, т.к. расчетным параметром является размер не зерна, а поры)

$$r_{03.3.} = k_1 F_{уд.3.3.}^2 \frac{(1-n_{03.3.})^2}{n_{03.3.}^3}, \quad r_{ос} = k_1 F_{уд.ос.}^2 \frac{(1-n_{ос})^2}{n_{ос}^3}, \quad r_{п.п.} = \frac{k_1 F_{уд.п.п.}^2}{n_{п.п.}}; \quad (9)$$

9) зависимость для определения толщины слоя осадка, образующегося на поверхности пористой перегородки

$$h_{ос}(t) = \frac{(Q_1(t) + Q_2(t))E(d_{ос})C(h_{3.3.1}(t))}{\rho_{ос} F_{п.п.} n_{03.3.}} t; \quad (10)$$

10) зависимость для расчета концентрации взвешенных веществ в воде в месте соединения потоков Q_1 и Q_2

$$C(h_{3.3.1}(t)) = \frac{C_1(h_{3.3.1}(t))Q_1(t) + C_0 Q_2(t)}{Q_1(t) + Q_2(t)}, \quad (11)$$

где t – время, с; Q_1 – расход воды, который фильтруется через верхний слой, м³/с; Q_2 – расход воды, который отводится в нижний слой, м³/с; Q_0 – расход воды, который подается на фильтр, м³/с; $F_{3.3.}$ – площадь фильтрации зернистой загрузки, м²; $F_{п.п.}$ – площадь фильтрации пористой перегородки,

м²; R_n – сопротивление переливной перегородки, м⁻¹; $R_{3.3.1}(t) = \int_0^{h_{3.3.1}} r_{3.3.}(z,t) dz$,

$R_{3.3.2}(t) = \int_{h_{3.3.1}}^{h_{3.3.2}} r_{3.3.}(z,t) dz$ – сопротивление верхнего и нижнего слоя зернистой

загрузки m^{-1} ; $R_{п.п.} = \sum_{i=1}^k h_{п.п.i} r_{п.п.i}$ – сопротивление пористой перегородки m^{-1} ;

$R_{ос}(t) = h_{ос}(t) r_{ос}$ – сопротивление слоя осадка, m^{-1} ; $r_{з.з.}(z, t)$ – удельное сопротивление зернистой загрузки, m^{-2} ; $r_{0з.з.}$ – удельное сопротивление незакольтированной зернистой загрузки, m^{-2} ; $r_{п.п.i}$ – удельное сопротивление i -го слоя пористой перегородки, m^{-2} ; $r_{ос}$ – удельное сопротивление слоя осадка, m^{-2} ; μ – динамическая вязкость, Па·с; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; $h_{з.з.1}$ – толщина верхнего слоя зернистой загрузки, м; $h_{з.з.2}$ – толщина нижнего слоя зернистой загрузки, м; $h_{ос}(t)$ – толщина слоя осадка на пористой перегородке, м; $h_{п.п.i}$ – толщина i -го слоя пористой перегородки, м; $h_w(t)$ – толщина слоя воды над слоем зернистой загрузки, м; h_p – высота расположения переливной перегородки над зернистой загрузкой, м; b – ширина переливной перегородки, м; z – вертикальная координата, м, которая изменяется в диапазоне от 0 до $(h_{з.з.1} + h_{з.з.2})$; $C(z, t)$ – концентрация частиц взвеси в фильтрующейся жидкости, $кг/м^3$; $S(z, t)$ – концентрация частиц взвеси, задержанных на зернах фильтрующей загрузки, $кг/м^3$; $V(t)$ – скорость фильтрования, м/с, на участке от 0 до $h_{з.з.1}$ $V(t) = Q_1(t)/F_{з.з.}$, на участке от $h_{з.з.1}$ до $h_{з.з.2}$ $V(t) = (Q_1(t) + Q_2(t))/F_{з.з.}$; $a(t)$ и $b(t)$ – коэффициенты, соответственно, отрыва и прилипания частиц взвеси к зернам загрузки, c^{-1} ; α и β – коэффициенты, учитывающие физико-химические свойства зерен загрузки и фильтрующейся через нее суспензии; $n_{з.з.}(z, t)$ – пористость зернистой загрузки; $n_{0з.з.}$ – пористость незакольтированной зернистой загрузки; $n_{ос}$ – пористость осадка; $n_{п.п.}$ – пористость пористой перегородки; γ – концентрация твердых частиц взвеси в осадке, $кг/м^3$; $F_{уд.} = 6\Phi/d$ – удельная поверхность зерен загрузки (частиц осадка, пор пористой перегородки), m^{-1} ; Φ – коэффициент формы, для шарообразных частиц $\Phi = 1$; k_1 – отношение длины пор к размерам поры (коэффициент извилистости); $d_з$ – эквивалентный диаметр зерен загрузки, м; ρ – плотность фильтруемой суспензии, $кг/м^3$; $\rho_{ос}$ – плотность осадка, $кг/м^3$; $C_1(h_{з.з.1}, t)$ – концентрация взвешенных веществ в потоке Q_1 после фильтрации через верхний слой, $кг/м^3$; $C(h_{з.з.}, t)$ – концентрация взвешенных веществ в воде на входе в пористую перегородку, $кг/м^3$; C_f – концентрация взвешенных веществ в фильтрате, $кг/м^3$; C_0 – концентрация взвешенных веществ в воде, поступающей на фильтр, $кг/м^3$.

Для решения приведенной системы уравнений приняты следующие краевые условия:

– начальные условия: при $t = 0$ $C(z, 0) = C_f$; $S(z, 0) = 0$;

в начале фильтроцикла толщина слоя воды над слоем загрузки равна $h_w(0) = h_w^{\min}$, где h_w^{\min} – минимальный уровень воды над зернистой загрузкой, м;

– граничные условия:

при $z = 0$ $C(0, t) = C_0$, $S(0, t)$ определяется из уравнения (5):

$$S(0, t) = \frac{b(t)}{a(t)} (1 - e^{-a(t)t}).$$

Фильтр отключается на промывку, когда выполняется условие $h_w(t) \geq h_w^{\max}$, где h_w^{\max} – максимальный уровень воды над зернистой загрузкой, м.

Математическая модель, которая состоит из системы уравнений и зависимостей (1)-(11), реализуется численно методом конечных разностей.

В процессе численного моделирования также было изучено влияние следующих параметров:

– приведенная высота расположения переливной перегородки

$$\eta_{\pi} = \frac{h_{\pi} - h_w^{\min}}{h_w^{\max} - h_w^{\min}};$$

– приведенная глубина (от поверхности зернистой загрузки), на которую отводится с надфильтрового пространства часть потока Q_2

$$\eta_{отв} = \frac{h_{31}}{h_{31} + h_{32}};$$

– приведенный эквивалентный диаметр зерен фильтрующей загрузки $d_{23.3.}/d_{13.3.}$, где $d_{23.3.}$, $d_{13.3.}$ – диаметр зерен загрузки в фильтре, соответственно, усовершенствованной и традиционной конструкции, м.

В качестве критерия эффективности принят параметр W_2/W_1 , представляющий собой отношение объема воды, профильтровавшейся до достижения уровня воды над зернистой загрузкой максимального значения в фильтре усовершенствованной конструкции, к такому же параметру в фильтре традиционной конструкции. Для более объективной оценки эквивалентный диаметр зерен загрузки в сооружении традиционной конструкции подобран таким образом, чтобы время достижения максимального уровня воды в надфильтровом пространстве совпадало со временем, когда качество фильтрата снижается ниже критического, т.е. происходит «проскок» загрязнений.

На рис. 1 представлен пример расчета влияния на эффективность работы фильтра параметра $d_{23.3.}/d_{13.3.}$. Рассмотрен фильтр с доочисткой и отводом части потока в нижние слои (1), а также без перепуска части расхода (2).

С увеличением размера зерен зернистой загрузки часть загрязнений проходит ее транзитом и задерживается на пористой оболочке дренажной системы, коагуляция зернистой загрузки уменьшается, эффективность работы фильтра возрастает до некоторого значения. С дальнейшим увеличением размера зерен основную нагрузку принимает пористая перегородка, образующаяся слой тонкодисперсного осадка создает значительное сопротивление, эффективность доочистки снижается.

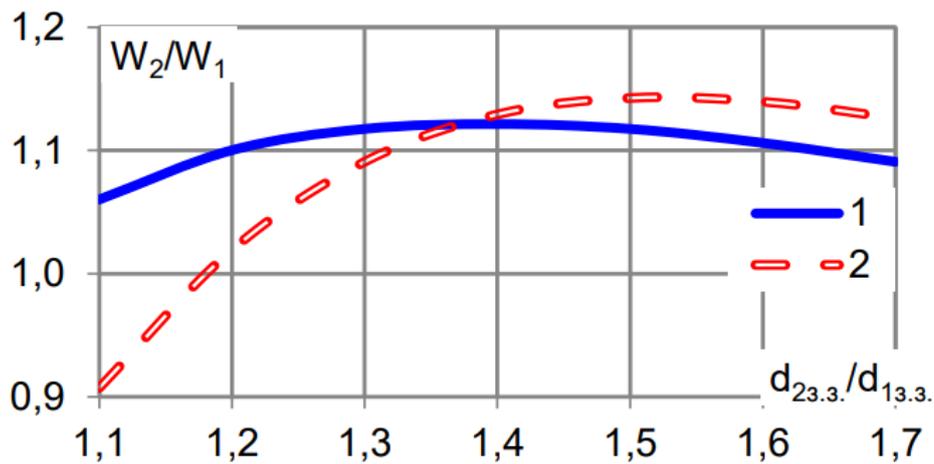


Рис. 1. Влияние размера зерен загрузки на эффективность работы фильтра: **1** – с доочисткой на дренажной системе и отводом части потока в нижние слои; **2** – только с доочисткой на дренажной системе

Следует отметить, что на эффективность доочистки значительно влияют параметры осадка, задерживаемого на оболочке дренажной системы (размер частиц, плотность, пористость, взаимодействие с зернами загрузки в месте расположения дренажной системы и т.д.).

При перепуске части потока, если значение эквивалентного диаметра зерен находится в области, когда более нагруженной является зернистая загрузка, происходит более существенное перераспределение загрязнений на пористую перегородку, эффективность фильтра значительно возрастает. С увеличением диаметра зерен и применением перепуска нагрузка на оболочку дренажной системы возрастает быстрее, чем при отсутствии отвода части потока в нижние слои. Эффективность снижается и становится меньше, чем для фильтра, в котором перепуск части расхода не применяется.

На рис. 2 представлен пример расчета влияния на эффективность работы фильтра параметров η_n и $d_{23.3.}/d_{13.3.}$.

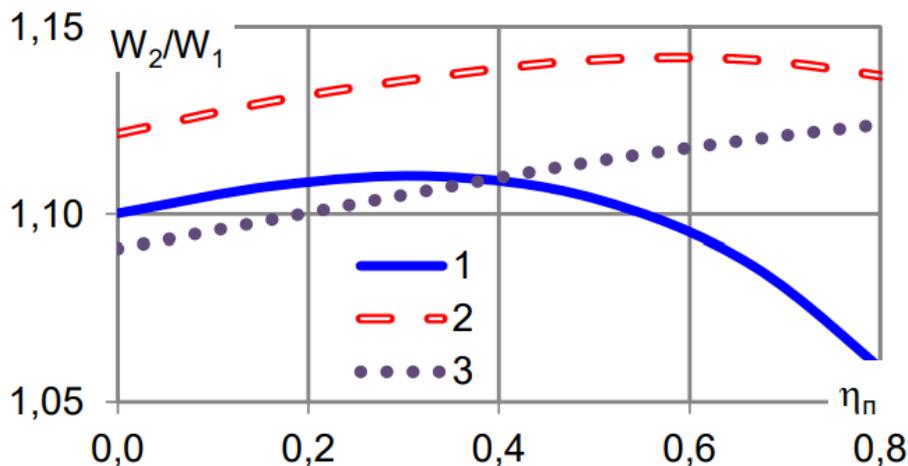


Рис. 2. Влияние высоты расположения переливной перегородки и размера зерен загрузки на эффективность работы фильтра: **1** – $d_{23.3.}/d_{13.3.} = 1,2$; **2** – $d_{23.3.}/d_{13.3.} = 1,4$; **3** – $d_{23.3.}/d_{13.3.} = 1,7$

- Рассмотрены случаи (рис. 2), когда
- более нагружен зернистый слой (1);
 - зернистый слой и пористая оболочка нагружены приблизительно равномерно (2);
 - более нагружена пористая оболочка (3).

В первом случае перепуск эффективен, когда переливная перегородка расположена на небольшой высоте от минимального уровня воды в надфильтровом пространстве, т.е. отвод воды осуществляется практически сразу с началом процесса фильтрования. Дальнейший подъем переливной перегородки не обеспечивает перераспределение загрязнений на пористую оболочку в достаточной степени, зернистая загрузка остается перегруженной и быстро колюматируется.

Во втором случае высота расположения переливной перегородки практически не влияет на эффективность работы фильтра. Небольшой максимум эффективности реализуется при более высоком расположении переливной перегородки в сравнении с первым случаем.

В третьем случае, как было указано ранее, перепуск только ухудшает эффективность, добавляя нагрузку на перегруженную пористую оболочку. Поэтому максимальное значение эффективности обеспечивается тогда, когда переливная перегородка находится как можно выше и перепуск практически не осуществляется.

Также изучено влияние на эффективность глубины, на которую отводится часть потока, при различном размере зерен загрузки (рис. 3).

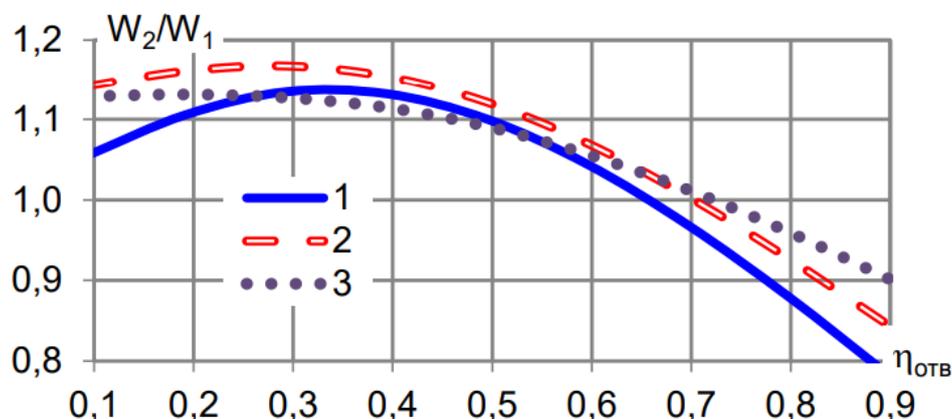


Рис. 2. Влияние параметров $\eta_{отв}$ и $d_{23.3}/d_{13.3}$ на эффективность работы фильтра: **1** – $d_{23.3}/d_{13.3} = 1,2$; **2** – $d_{23.3}/d_{13.3} = 1,4$; **3** – $d_{23.3}/d_{13.3} = 1,7$

Аналогично, с увеличением глубины, на которую отводится часть потока, увеличивается нагрузка на пористую оболочку. При меньших размерах зерен, когда зернистый слой более заколюматирован, максимум эффективности соответствует большей глубине. В этом случае перераспределение на пористую оболочку происходит более интенсивно. С увеличением размеров зерен максимум сдвигается в сторону меньших глубин. При увеличении глубины отвода части потока в толщу загрузки нагрузка на пористую оболочку возрастает, эффективность резко падает.

Выводы

С помощью математического моделирования показана эффективность применения пористой оболочки дренажной системы для доочистки воды, прошедшей слой зернистой загрузки, а также перепуска части потока в нижние слои загрузки для равномерного распределения загрязнений между пористой оболочкой и зернистым слоем.

Список литературы

1. *Грабовский П.А.* Промывка водоочистных фильтров / П.А. Грабовский, Г.М. Ларкина, В.И. Прогульный. Одесса: Оптимум, 2012. 240 с.
2. *Gawade S.* Analysis of PVC rapid sand filter / S. Gawade, Sunil Misal // Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR). 2016. Vol. 2, Issue 9. P. 1370-1373.
3. *Mohanty B.* Design and construction of a modified rapid sand filter for treatment of raw water / B. Mohanty, P. Keval, G. Beran, T. Dhruvit // Journal for Research. 2017. Vol. 3, Issue 3. P. 9-13.
4. *Sanyaolu B.O.* Comparative performance of a charcoal dual media filter and a conventional rapid sand filter / B.O. Sanyaolu // Journal of Natural Sciences Engineering and Technology. 2010. Vol. 9, № 1. P. 137-146.
5. *Бугай Н.Г.*, 2007. Контактная реагентная очистка воды фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена / Н.Г. Бугай, А.И.Кривоног А., В.В. Кривоног // Прикладна гідромеханіка. К., 2007. Т. 9, №1. С. 8–22.
6. *Эпоян С.* Повышение эффективности работы фильтровальных сооружений при применении дренажных систем из пористых полимерных материалов/ С. Эпоян, А. Карагяур, В. Волков, В. Яркин // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow, 2016. Vol. 18, № 6. P. 102-109.

Стаття надійшла до редакції 12.12.17