

УДК 628.1/3.067

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИСХІДНОГО ФІЛЬТРУВАННЯ ВОДИ НА ФІЛЬТРАХ З ПЛАВАЮЧИМ БАГАТОШАРОВИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ

**О.В. ПЕТРОЧЕНКО,**

Інститут водних проблем і меліорації НААН

*Наведено результати досліджень процесу висхідного фільтрування води через плаваюче фільтрувальне завантаження водоочисних споруд. Встановлено основні параметри багатошарового плаваючого фільтрувального завантаження та режими фільтрування, які забезпечують підвищення ефективності процесу очищення води за рахунок збільшення питомої брудомісткості фільтрувального завантаження та тривалості фільтроциклу.*

**Ключові слова:** водоочисні споруди, зернисті фільтри, плаваюче фільтрувальне завантаження, висхідне фільтрування, питома брудомісткість фільтра, тривалість фільтроциклу

**Проблема та її актуальність.** Фільтрування вихідної води на зернистих фільтрах – найбільш поширений та дешевий спосіб її очищення в системах питного і господарського водопостачання. По типу завантаження зернисті фільтри поділяються на фільтри з важким завантаженням, у яких щільність зерен перевищує щільність води, і фільтри з плаваючим завантаженням. По напрямку руху потоку води при її фільтруванні розрізняють фільтри з низхідним і висхідним фільтруванням. По кількості фільтрувальних шарів зернисті фільтри бувають одношарові і багатошарові. У попередні роки розроблювали та впроваджували різні конструкції водоочисних споруд із зернистими фільтрами. Ці конструкції та їх окремі елементи постійно вдосконалюються [1-3]. Одним із перспективних напрямів вдосконалення зернистих фільтрів є пошук та наукове обґрунтування нових технічних рішень плаваючих багатошарових фільтрів із висхідним фільтруванням води.

Як відомо [1], тривалість фільтроциклу, тобто час роботи фільтра між його промивками, залежить від робочої питомої брудомісткості фільтра  $\Delta G_{бр}$ , кг/м<sup>2</sup>, що дорівнює різниці між його максимальною і мінімальною питомими брудомісткостями в межах, між якими забезпечується нормативна якість фільтрованої води.

Отже, для збільшення тривалості фільтроциклу і зменшення експлуатаційних витрат на фільтрування води потрібно дослідити доцільність застосування багатошарового плаваючого фільтрувального завантаження.

**Мета досліджень** – обґрунтувати технічні

рішення висхідного фільтрування води на багатошарових плаваючих зернистих фільтрах водоочисних споруд та дослідити ефект збільшення брудомісткості плаваючих багатошарових фільтрів.

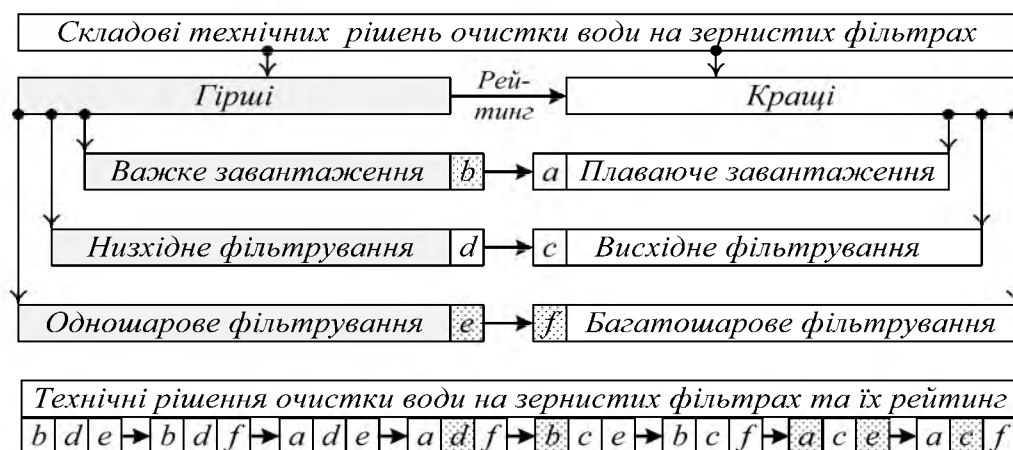
**Результати теоретичних досліджень.** Пошук перспективних конструктивних рішень зернистих фільтрів доцільно здійснювати шляхом їх формування з окремих складових технічних рішень очистки води (рис. 1), аналіз яких свідчить про таке:

- плаваюче фільтрувальне завантаження має переваги перед важким, оскільки між рухомими плаваючими зернами значно швидше і повніше відбувається коагуляція завислих у воді речовин, а також на плаваючому фільтрі створюються кращі умови для його промивки в кінці фільтроциклу;

- висхідне фільтрування краще за низхідне, оскільки у ньому поєднуються два технологічних процеси – осадження бруду силами гравітації і фільтрування;

- багатошарові фільтри мають більшу брудомісткість і більший фільтроцикл.

Шляхом комбінації окремих складових технічних рішень розглянуто вісім технічних рішень очистки води на зернистих фільтрах, які займають певне місце у рейтинговому ряду (рис. 1). Найгірші показники має технічне рішення з умовним позначенням *bde*, а найкращі показники має технічне рішення з умовним позначенням *acf* (рис. 1). Інші варіанти комбінації окремих складових технічних рішень займають проміжні позиції у їхньому рейтинговому ряду на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема утворення варіантів технічних рішень очистки води на зернистих фільтрах та оцінювання їх рейтингу

Проте найбільш перспективне технічне рішення *acf* (рис. 1) на практиці поки що не реалізовано. Це пояснюється особливістю технології виготовлення зерен пінополістиролу, який є основним матеріалом плаваючого фільтрувального завантаження. Зерна пінополістиролу отримують шляхом спінювання вихідної фракції полістиролу (бісеру). З напівпрозорого склоподібного бісеру полістиролу діаметром від 0,2 мм і початковою щільністю 1060 кг/м<sup>3</sup> утворюють зерна пінополістиролу діаметром від 0,3 мм до 10 мм. Очевидно що щільність зерен бісеру полістиролу при спінюванні зменшується пропорційно кубу величини збільшення їх діаметра. Тому у фільтрувальній камері очисної установки зерна пінополістиролу більшого діаметра, маючи меншу щільність, мимовільно займають верхній шар плаваючого фільтрувального завантаження, а за умовою забезпечення висхідного фільтрування повинно бути навпаки. Через це в очисних спорудах з по-

ліфракційним плаваючим фільтрувальним завантаженням на практиці застосовують недостатньо ефективно низхідне фільтрування вихідної води (варіант *adf*) [4, 5].

Нами встановлена технологічна можливість застосування висхідного фільтрування води на багатошарових плаваючих зернистих фільтрах (варіант *acf*, рис. 1) за двома варіантами:

За першим варіантом така можливість досягається встановленням у фільтрувальних камерах водоочисних споруд між шарами плаваючих зерен розділових решіток жорсткої або гнучкої конструкції [6, 7].

За другим варіантом встановлені критерії, за якими фільтрувальні зерна меншого розміру спливають у воді швидше фільтрувальних зерен більшого розміру. За цими критеріями забезпечується мимовільне утворення і розміщення у фільтрувальних камерах водоочисних споруд фільтрувальних шарів із зерен меншого розміру вище фільтрувальних шарів із зерен більшого розміру. Такими критеріями є:

$$\rho_{i+1} < \rho - \left( \frac{d_i}{d_{i+1}} \right)^2 (\rho - \rho_i) \quad (1) \quad \text{або} \quad d_{i+1} > d_i \sqrt{\frac{\rho - \rho_i}{\rho - \rho_{i-1}}}, \quad (2)$$

де  $d_i$  – діаметр  $i$ -го (більшого) зерна, м;  $\rho_i$  – щільність матеріалу  $i$ -го зерна, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{i-1}$  – діаметр  $(i+1)$ -го (меншого) зерна, м;  $\rho_{i-1}$  – щільність матеріалу  $(i+1)$ -го зерна, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – щільність води, кг/м<sup>3</sup>.

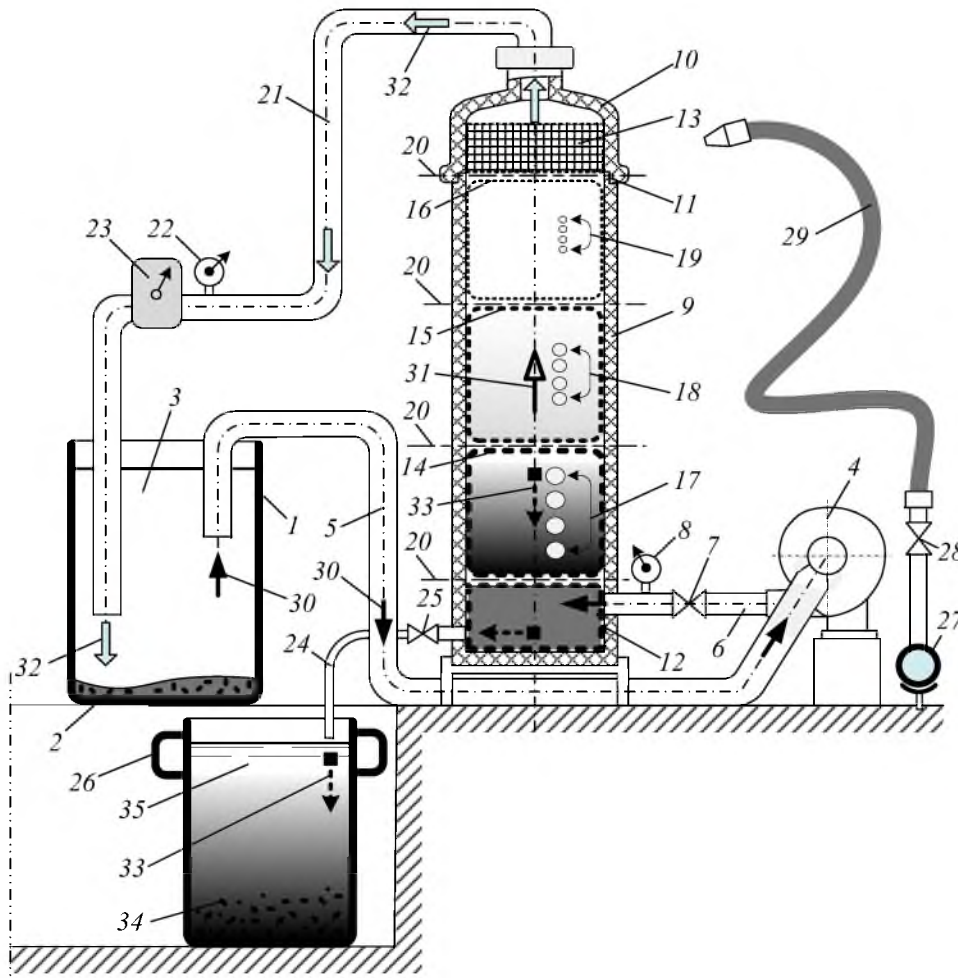
**Методика та результати експериментальних досліджень.** Експериментальні дослідження з визначення ефекту збільшення брудомісткості багатошарових фільтрів порівняно з одношаровими виконували на фільтрувальній установці, схема якої показана на рис. 2.

Для можливості виконання достатньої кількості дослідів за обмежений період часу трива-

лість фільтроциклів скорочували, для цього вихідну водопровідну воду забруднювали процідженим через сито глинистим мулом. У дослідженнях автор використовував зерна пінополістиролу, параметри яких наведені у табл. 1. Зерна пінополістиролу засипали в гнучкі контейнери (сітки), а потім контейнери укладали у фільтрувальну камеру установки (рис. 2).

### 1. Параметри фільтрувальних шарів пінополістирольного завантаження

Показники	Од. виміру	Варіанти фракцій зерен пінополістиролу		
		№1 ( $\lambda=1$ )	№2 ( $\lambda=2$ )	№3 ( $\lambda=3$ )
Діаметр зерен, $d_f$	мм	6,0...8,0	2,0...4,0	0,4...0,6
Товщина фільтрувального шару, $h_f$	м	0,64	0,58	0,51
Об'єм завантаження, $V_f$	дм <sup>3</sup>	20,0	18,0	16,0
Пористість, $m_f$	–	0,43	0,41	0,37
Розмір чарунок контейнера (сітки)	мм×мм	4,5×4,5	1,5×1,5	0,3×0,3



**Рис. 2.** Схема визначення на експериментальній фільтрувальній установці брудомісткості плаваючого фільтрувального завантаження залежно від його параметрів:

1 – резервуар із забрудненою водою; 2 – забруднюючий мул; 3 – забруднена вода; 4 – насос; 5 і 6 – всмоктувальний і напірний трубопроводи подачі забрудненої води; 7 – засувка; 8 – манометр; 9 – корпус фільтрувальної колони; 10 – ковпак фільтрувальної колони; 11 – різьбове з'єднання ковпака з корпусом фільтрувальної колони; 12 – донна об'ємна решітка; 13 – сітчастий фільтр; 14, 15 і 16 – сітчасті фільтрувальні контейнери з плаваючим фільтрувальним завантаженням; 17, 18 і 19 – зерна плаваючого фільтрувального завантаження різної крупності; 20 – межі між фільтрувальними контейнерами; 21 – трубопровід відведення очищеної води; 22 – манометр; 23 – витратомір; 24 – шланг виведення промивної води з осадам; 25 – вентиль; 26 – резервуар прийому промивної води з осадам; 27 – водопровідна мережа; 28 – вентиль; 29 – шланг подачі промивної води; 30 – напрям руху забрудненої води до фільтрувальної колони; 31 – напрям фільтрування забрудненої води; 32 – напрям руху очищеної води; 33 – напрям руху промивної води з осадам; 34 – промивна вода з високим вмістом осаду; 35 – промивна вода, освітлена після відстоювання

Для забезпечення ламінарного режиму руху води обиралась швидкість фільтрування  $v_\phi$ , яка дорівнювала критичній швидкості  $v_{kp}$ , визначеній для параметрів третього фільтрувального шару за формулою М.М. Павловського:

$$v_\phi = v_{kp} = \frac{(0,75m_3k_3 + 0,23)Re_{kp} \nu}{d_3} = 0,0036 \text{ м/с} = 13 \text{ м/год} \quad (3)$$

де  $m_3$  – пористість третього (верхнього) фільтрувального шару;  $k_3=0,1$  – гранично допустимий коефіцієнт зменшення пористості верхнього фільтрувального шару внаслідок його забруднення;  $Re_{kp}=7\dots 9$  – число, аналогічне числу Рейнольдса згідно дослідженням М.М. Павловського;  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості води, м<sup>2</sup>/с;  $d_3$  – діаметр зерен верхнього фільтрувального шару, м.

У подальших дослідах швидкість фільтрування приймалась однаковою і складала  $v_\phi=v_{kp}=13\text{м/год}$ . Для цього забезпечували постійною витрату  $Q_\phi$  відфільтрованої води, що фіксувалась витратоміром 23 (рис. 2), шляхом регулювання величини  $Q_\phi$  за допомогою засувки 7:

$$Q_\phi = v_{kp} \pi d_\phi^2 / 4 = 13 \times 3,14 \times 0,2^2 / 4 = 0,41 \text{ м}^3/\text{год} \quad (4)$$

де  $d_\phi$  – внутрішній діаметр фільтрувальної колони, м.

Фільтрування забрудненої води досліджували для трьох варіантів фільтрувального завантаження (табл. 1): одношарове,  $\lambda=3$  (№3); двошарове,  $\lambda=2$  (№3+№2); тришарове,  $\lambda=1$  (№3+№2+№1). Фільтрування проводили у прив'язці до єдиного критерію оцінки якості очищеної води, за який був прийнятий показник сухого залишку  $[y]=1473$  мг/дм<sup>3</sup> у водопровідній воді, визначений на початку досліджень згідно [8]. До складу сухого залишку ввійшли як розчинені у воді мінеральні речовини, так і завислі пластівці нероз-

чинних речовин. Подальші дослідження проводили за критерієм досягнення якості очищеної води не нижче якості водопровідної води ( $y \leq [y]=1473$  мг/дм<sup>3</sup>). Для визначення граничних точок 5 (початок фільтрування) і 6 (закінчення фільтрування) були побудовані для кожного  $\lambda$ -го варіанта фільтра графіки 2 (рис. 3) залежності  $y=\Phi(\Delta p)$  по експериментальних точках  $y_j(\Delta p_j)$ , які визначали згідно [8]:

$$y_j = (M_2 - M_1) / V_{\text{H}_2\text{O}} \text{ , г/дм}^3 \quad (5)$$

де  $M_2$  – маса порцелянової чашки з сухим залишком після випаровування води, г;  $M_1$  – початкова маса порцелянової чашки, г;  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  – об'єм аналізованої води, дм<sup>3</sup>.

Залежність  $y=\Phi(\Delta p)$  була апроксимована довірчою параболою виду:

$$y = U_0 + U_1 \Delta p + U_2 \Delta p^2 \quad (6)$$

Коефіцієнти  $U_0$ ,  $U_1$  і  $U_2$  знаходили за методом найменших квадратів:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_2 \sum_{j=1}^n \Delta p_j^4 + U_1 \sum_{j=1}^n \Delta p_j^3 + U_0 \sum_{j=1}^n \Delta p_j^2 = \sum_{j=1}^n \Delta p_j^2 y_j \quad ; \\ U_2 \sum_{j=1}^n \Delta p_j^3 + U_1 \sum_{j=1}^n \Delta p_j^2 + U_0 \sum_{j=1}^n \Delta p_j = \sum_{j=1}^n \Delta p_j y_j \quad ; \\ U_2 \sum_{j=1}^n \Delta p_j^2 + U_1 \sum_{j=1}^n \Delta p_j + U_0 n = \sum_{j=1}^n y_j \quad . \end{array} \right. \quad (7)$$

Оптимальне значення втрати напору  $\Delta p^{opt}$  (точка 3 на рис. 3), за яким забезпечується найбільш якісне очищення води, визначали за умови:

$$\frac{\partial y}{\partial \Delta p} = 0 \quad , \quad \text{звідки} \quad \Delta p^{opt} = - \frac{U_1}{2U_2} \quad . \quad (8)$$

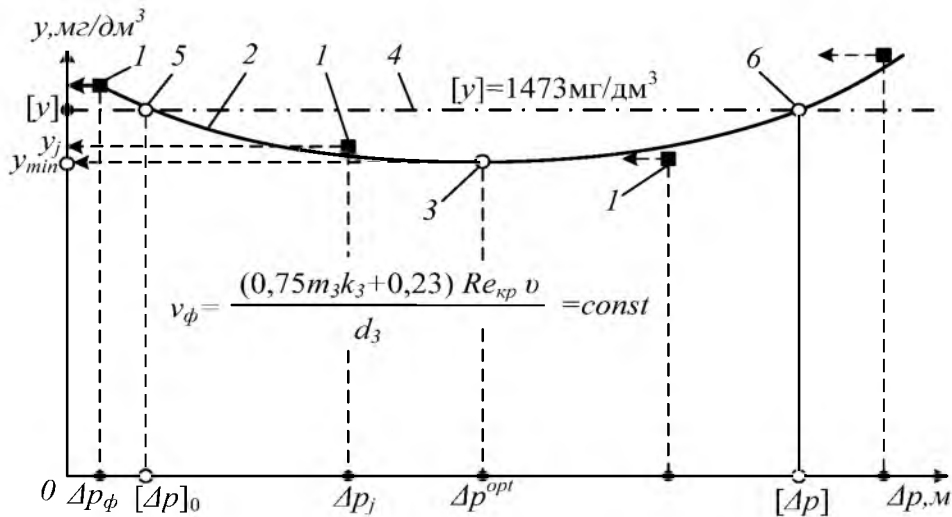


Рис. 3. Схема визначення граничних точок процесу фільтрування води:

1 – експериментальні точки функції  $y=\Phi(\Delta p)$ ; 2 – графік функції  $y$ ; 3 – екстремум функції  $y$ ; 4 – межа нормативного значення  $y$ ; 5 і 6 – нижня і верхня гранична точка процесу фільтрування

Координати точок 5 і 6 перетину кривої 2 лінії 4, яка відображає показник вмісту сухого залишку  $[y]=1473\text{мг/дм}^3$  у воді, що бралась з водопроводу, знаходили шляхом підставлення у рівняння (6) значення  $y=[y]$ :

$$\Delta p_{(5)} = \frac{-U_1 - \sqrt{U_1^2 - 4U_2(U_0 - [y])}}{2U_2}; \quad (10) \quad \Delta p_{(6)} = \frac{-U_1 + \sqrt{U_1^2 - 4U_2(U_0 - [y])}}{2U_2}. \quad (11)$$

У дослідженнях за критеріальну точку закінчення процесу фільтрування приймали точку 6, що забезпечувало однакові умови для порівняння варіантів фільтрів з плаваючим завантаженням:  $v_{\phi}=v_{kp}=13\text{м/год}$ ;  $Q_{\phi}=0,41\text{м}^3/\text{год}$ ;  $y=[y]=1473\text{мг/дм}^3$ .

По закінченню кожного циклу фільтрування з фільтрувальної колони в резервуар 26 (рис. 2) випускали забруднену воду. Після цього фільтрувальну колону розбирали. Контейнери 14, 15 і 16 із зернами пінополістиролу 17, 18 і 19 ретельно промивали в окремих резервуарах. Увесь об'єм  $V_{\lambda}$  промивної води зливали в резервуар 26 та перемішували міксером. З об'єму води  $V_{\lambda}$  брали пробу об'ємом

$$U_2 \Delta p^2 + U_1 \Delta p + (U_0 - [y]) = 0. \quad (9)$$

Шукану координату  $\Delta p_{(5)}$  точки 5 і координату  $\Delta p_{(6)}$  точки 6 визначали шляхом знаходження коренів квадратного рівняння (9):

$V_{\text{H}_2\text{O}}$  та визначали вміст сухого залишку  $y_{\lambda}$  за формулою (5) згідно (8). Маса сухого залишку  $M_{\lambda}$  у об'ємі води  $V_{\lambda}$  визначали за формулою:

$$M_{\lambda} = 10^{-3} y_{\lambda} V_{\lambda}, \text{ кг}, \quad (12)$$

де  $y_{\lambda}$  – вміст сухого залишку у забрудненій воді для  $\lambda$ -го завантаження,  $\text{г/дм}^3$ .

Брудомісткість  $\lambda$ -го типу фільтрувального завантаження визначали:

$$G_{\text{бр}\lambda} = 4M_{\lambda} / \pi d_{\phi}^2, \text{ кг/м}^2. \quad (13)$$

Результати експериментальних дослідів після їх обробки наведені у табл. 2.

## 2. Результати експериментальних досліджень питомої брудомісткості фільтра

Показники	Од. виміру	Варіанти завантаження пінополістиролу		
		$\lambda=1$ (№1+№2+№3)	$\lambda=2$ (№2+№3)	$\lambda=3$ (№3)
Втрата напору критична, $\Delta p_{(6)\lambda}$	м	182	163	157
Маса сухого залишку, $M_{\lambda}$	кг	0,741	0,464	0,245
Брудомісткість фільтра, $G_{\text{бр}\lambda}$	кг/м <sup>2</sup>	23,6	14,8	7,8
Ефект збільшення брудомісткості	–	3,0	1,9	1,0

**Висновки.** Найбільш ефективним варіантом очищення води на зернистих фільтрах є висхідне фільтрування на багат шаровому плаваючому завантаженні.

Технологічна можливість застосування висхідного фільтрування на багат шаровому плаваючому фільтрі досягається двома шляхами: встановленням у фільтрувальних камерах водоочисних споруд між фракціями плаваючих зерен розділових решіток жорсткої або гнучкої конструкції; врахуванням критеріїв вибору параметрів, за якими фільтрувальні зерна меншого розміру спливають у воді

швидше фільтрувальних зерен більшого розміру і мимовільно утворюють у фільтрувальних камерах водоочисних споруд верхні фільтрувальні шари.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що брудомісткість та тривалість фільтроциклу одношарового пінополістирольного фільтра можна збільшити у 2 рази, якщо нижче встановити другий фільтрувальний шар із зерен більшого розміру, і у 3 рази, якщо застосувати тришаровий плаваючий фільтр.

### Бібліографія

1. Хоружий П.Д. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. / П.Д. Хоружий, Т.П. Хомутецька, В.П. Хоружий Ресурсозберігаючі технології водопостачання. – К.: Аграрна наука, 2008. – 534 с.
2. Журба М.Г. Очистка воды на зернистых фильтрах / М.Г. Журба. – Львов: Вища школа, 1980. – 200 с.
3. Koy-Ging. Filterability study on secondary effluent filtration / Koy-Ging. – Journal of the Sanitary Engineering Division. Proc. Amer. Soci. of Civ. Eng., 1972, v. v. 98, NSA 3.
4. Журба М.Г. Пенополистирольные фильтры / М.Г. Журба. – М.: Стройиздат, 1992. – 176 с.
5. Журба М.Г. Водоочистные фильтры с плавающей загрузкой. Научное издание / М.Г. Журба. – М.: – 2001. – 536 с.
6. Патент України на корисну модель №102063. Спосіб очистки води в системах водопостачання / Петроченко О.В. – Опубл. 12.10.2015, бюл. №19.
7. Патент України на корисну модель №105189. Береговий водозабір / Петроченко О.В. – Опубл. 10.03.2016, бюл. №5.
8. ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Затверджено Міністерством економічного розвитку і торгівлі України. Наказ від 23 жовтня 2014 року № 1257.

А.В. Петроченко

### Исследование процесса восходящего фильтрования воды на фильтрах с плавающей многослойной загрузкой

Приведены результаты исследований процесса восходящей фильтрации воды через плавающую фильтровальную загрузку водоочистных сооружений. Установлены основные параметры многослойной плавающей фильтровальной загрузки и режимы фильтрования, обеспечивающие повышение эффективности процесса очистки воды за счет увеличения удельной гряземкости фильтровальной загрузки и продолжительности фильтроцикла.

O.V. Petrochenko

### Research of the process of upward water filtration at the filters with floating multilayer media

The research results of the process of upward water filtration through the floating filter media of water treatment facilities are presented. It was determined the main parameters of multilayer floating filter media and filtration modes, which ensure the raising of efficiency of water purification process due to an increase in the specific dirt-holding capacity of the filter media and the duration of the filter cycle.