

РАДОВЕНЧИК Я. В., к.т.н., ст. викл.; РАДОВЕНЧИК В. М., д.т.н., проф.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

## ОСОБЛИВОСТІ ОСВІТЛЕННЯ ВОДИ МАТЕРІАЛАМИ З КАПІЛЯРНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

*В роботі приведені результати продовження досліджень ефективності нового способу розділення фаз з використанням матеріалів з капілярними властивостями. Встановлено продуктивність капілярних фільтрів із тканин різного типу, досліджено зміну ефективності відділення твердої фази від води при регулюванні водневого показника та конструктивних особливостей фільтру. Визначено основні умови ефективного процесу розділення фаз при обробці суспензії бентоніту.*

**Ключові слова:** освітлення, фільтрування, бентоніт, матеріали з капілярними властивостями, залишкові концентрації.

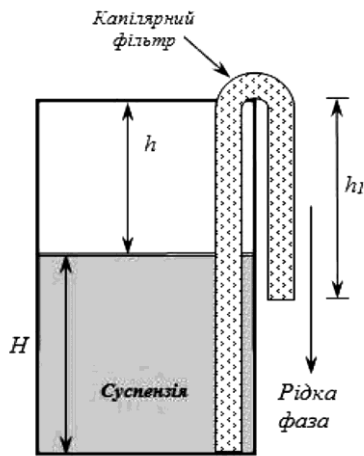
© Радовенчик Я. М., Радовенчик В. М., 2017.

**Постановка проблеми.** В силу різних причин переважна більшість природних та стічних вод забруднена високодисперсними твердими частками різноманітної природи та походження, котрі негативно впливають на людину, живі організми та параметри водних об'єктів. Тому практично всі сучасні технології водоочищення і водопідготовки передбачають етапи видалення твердої фази з водного середовища. Сьогодні нормативні документи України визначають допустиму каламутність питної води на рівні  $0,58 \text{ мг/дм}^3$  [1]. Допустимий вміст завислих та спливаючих речовин в стічних водах при скиді в міську каналізаційну систему, наприклад, м. Києва не повинен перевищувати  $300 \text{ мг/дм}^3$  [2]. Технологічні процеси багатьох галузей промисловості та енергетики жорстко регламентують вміст у воді високодисперсних твердих часток. Тому питання розділення рідкої та твердої фаз є актуальними для багатьох галузей людської діяльності.

Найбільш поширеним методом видалення твердої фази сьогодні вважається відстоювання. Для підвищення ефективності цього процесу в переважній більшості технологій воду обробляють коагулянтами та флокулянтами. Нами на прикладі суспензії бентоніту було розглянуто ефективність відстоювання модельних розчинів з коригуванням рН та додаванням реагентів в різних дозах [3]. Однак, в таких технологіях навіть при найвищій ефективності процесу відстоювання характерні два важливих недоліки – значна тривалість та вторинне забруднення води. Тому використання для обробки вод з підвищеною мутністю різноманітних фізичних методів є актуальним та своєчасним.

**Аналіз попередніх досліджень.** В сучасних технологіях розділення рідкої та твердої фаз значного поширення набули процеси фільтрування і з кожним роком ця галузь продовжує розвиватися. В залежності від фільтруючого шару в процесах фільтрування використовують зернисті, сітчасті, тканинні, наливні та ін. види фільтрів [4]. При цьому фільтр може бути одношаровий чи багатошаровий, напірний, безнапірний чи вакуумний, швидкий, повільний чи надшвидкий і т.і. На сьогодні розроблено величезну кількість конструкцій різноманітних фільтрів, достатньо глибоко вивчені процеси формування пористих середовищ, розроблені математичні моделі процесів фільтрування в різних умовах, що дозволяє досить точно розраховувати основні параметри фільтрів та підбирати фільтруючі матеріали. Разом з тим, загальними науковими проблемами процесу традиційного фільтрування є низька продуктивність та ефективність, необхідність періодичного очищення пористого середовища, необхідність в складному обладнанні, високі капітальні та експлуатаційні витрати і т.п. Відносно недавно було запропоновано проводити процес розділення рідкої та твердої фаз з використанням матеріалів з капілярними властивостями [5]. На сьогодні частково розроблені наукові засади проведення такого процесу, виконані дослідження його ефективності при розділенні фаз в різних умовах та при різному складі суспензій [6, 7]. Було встановлено, що використання в процесах фільтрування високодисперсних суспензій матеріалів з капілярними властивостями дозволяє створювати прості, дешеві та ефективні апарати для розділення рідкої та твердої фаз [8].

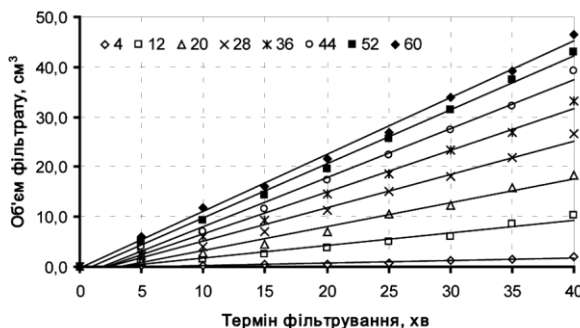
**Метою цієї статті** є подальші дослідження ефективності процесів розділення фаз з використанням матеріалів з капілярними властивостями для відділення від водного середовища часток бентоніту, які є чи не найпоширенішими забруднювачами природних вод. Автори ставили перед собою завдання визначити ефективність процесів розділення фаз при різних параметрах капілярного фільтру та різних значеннях водневого показника.



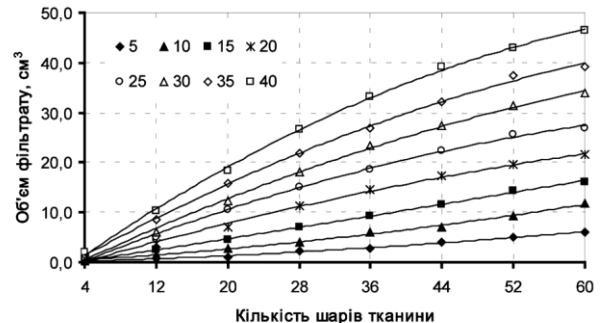
**Рис. 1 – Схема пристрою для розділення рідкої та твердої фаз**

що фільтр в суспензії розміщено вертикально і при фільтруванні суспензії через тканину на її волокна затримуються частки твердої фази, котрі при накопиченні відповідної кількості агрегують та відриваються від волокон, опускаючись в нижню частину посудини. Таким чином відбувається своєрідна регенерація фільтру. Очевидно також, що за таких умов окрім товщини фільтру на його продуктивність буде суттєво впливати і параметр  $\Delta h$ , зміною котрого можна її регулювати.

Щодо впливу товщини фільтру (рис. 3), то видно, що із збільшенням кількості шарів продуктивність фільтру починає знижуватися. Цей факт, на нашу думку, можна пояснити значним тиском верхніх шарів на нижні в точці перегину капілярного фільтру при їх значній кількості та зменшенням розміру пор в нижніх шарах. Крім цього, із збільшенням висоти капілярного фільтру зменшується швидкість перетікання рідини, що також впливає на загальну продуктивність. Як було показано раніше [9], існує критична товщина фільтру, при якій перетікання рідини взагалі не спостерігається. Найбільш важливою перевагою фільтрів з капілярними властивостями є низька залишкова мутність обробленої води.



**Рис. 2 – Зміна об'єму фільтрату в часі для фільтрів з різною кількістю шарів тканини (бавовна,  $C_{тф} = 34$  мг/дм<sup>3</sup>, рН = 8,5,  $\Delta h = 5$  см)**



**Рис. 3 – Залежність об'єму фільтрату від кількості шарів тканини при різних термінах фільтрування (хв.) (бавовна,  $C_{тф} = 34$  мг/дм<sup>3</sup>, рН = 8,5,  $\Delta h = 5$  см)**

Як видно із табл. 1, для більшості проб цей показник нижче вимог нормативних документів України до питної води. Менші значення залишкової мутності води вдалось отримати при товщині фільтру 4 та 36–60 шарів. Але через те, що при незначній товщині фільтру продуктивність фільтрування теж є низькою, більш доцільним, з точки зору максимального очищення суспензій від твердої фази, є застосування фільтрів із товщиною більше, ніж 36 шарів бавовняного матеріалу. Проте, необхідно також враховувати той факт, що подальше збільшення товщини фільтру, як зазначалось раніше, призводить до спадання продуктивності фільтрування.

**Таблиця 1 – Вплив товщини капілярного фільтру на ефективність фільтрування (бавовна,  $C_{тф} = 34$  мг/дм<sup>3</sup>, рН = 8,5,  $\Delta h = 5$  см)**

Параметр	Кількість шарів тканини в капілярному фільтрі, шт							
	4	12	20	28	36	44	52	60
Залишкова мутність води, мг/дм <sup>3</sup>	0,1	1,2	1,2	1,2	0,1	0,3	0,3	0,3

Водневий показник та його вплив на ефективність освітлення води є одним із найголовніших факторів, які необхідно враховувати у технологічних процесах водоочистки та водопідготовки. Саме тому нами було проведено дослідження впливу коригування рН на ефективність фільтрування суспензій бентоніту. Для фільтрування обрали тканини, що характеризуються різною змочуваністю (відповідно, і різними капілярними властивостями) природного та штучного походження – бавовну, льон, штучний шовк та ацетатне волокно.

Як видно із рис. 4, коригування водневого показника досліджуваних суспензій сприяло підвищенню ефективності фільтрування через бавовняний фільтр. Так, при значенні рН = 5,5 об'єм фільтрату зростає більше, ніж удвічі, порівняно із контрольною суспензією (рН = 8,5). Проте, при подальшому коригуванні водневого показника у бік збільшення кислотності (рН = 4), швидкість фільтрування дещо зменшується, проте все ще залишається більшою, ніж у контрольній суспензії. Підвищення лужності суспензії бентоніту до рН = 10 сприяло незначному зростанню швидкості фільтрування через бавовняний фільтр порівняно із контрольною суспензією. Проте, доцільність застосування реагентів для коригування рН визначається не лише можливістю збільшити швидкість фільтрування, але і тим, наскільки зростає чи зменшується ефективність фільтрування. Результати дослідження цього показника наведено у табл. 2.

Ефективність фільтрування контрольної суспензії (рН = 8,5) через бавовняний фільтр склала 95,3 %, а залишкова концентрація твердої фази знизилась до рівня 1,6 мг/дм<sup>3</sup>. Завдяки реагентному коригуванню водневого показника у бік підвищення кислотності вдалось не лише збільшити ефективність фільтрування на 2,5–3,5 %, але і досягнути значного зниження мутності вихідних суспензій – залишкова мутність фільтрату в діапазоні рН 4 ÷ 7 склала менше 1 мг/дм<sup>3</sup>. При підвищенні лужності суспензії бентоніту до рН = 10 ефективність фільтрування істотно знижується (~ на 10 %) порівняно із контрольною суспензією, а залишкова концентрація твердої фази є найвищою серед усіх досліджених зразків і складає 5 мг/дм<sup>3</sup>.

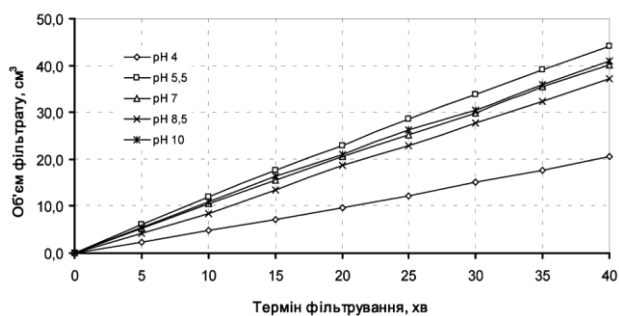
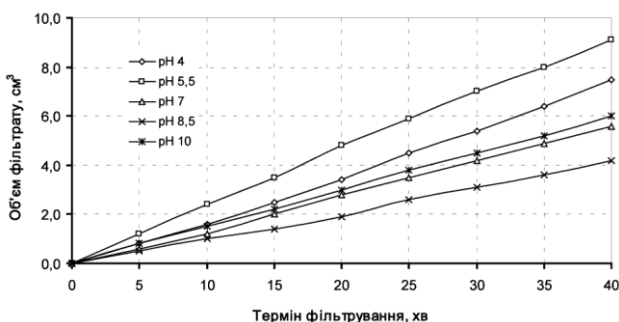
Таким чином, використання таких капілярних матеріалів, як бавовна, для фільтрування вод із високою мутністю є досить ефективним навіть без додавання реагентів, оскільки останні дозволяють збільшити ефективність фільтрування лише на 2,5–3,5 %, що не є суттєвим. Проте, саме коригування водневого показника у бік дещо більшої кислотності порівняно із природними показниками (рН = 7) дозволяє отримати воду, яка відповідає нормативам питної води за показником мутності. Більш того, подальше збільшення кислотності досліджуваних зразків не призводить до значного зростання ефективності фільтрування бентонітових суспензій, тому витрата реагентів у такому випадку є недоцільною.

Дослідження фільтрувальних властивостей льону як матеріалу із капілярними властивостями, показало його ще більшу ефективність порівняно із бавовняним фільтром. Як видно із рис. 5, швидкість фільтрування через льняний фільтр є набагато більшою, а залишкові концентрації фільтрату практично у всіх досліджених зразках є значно меншими, ніж при фільтруванні через бавовняний фільтр.

Коригування показника рН при фільтруванні суспензії бентоніту через льняний фільтр дозволило дещо підвищити ефективність та збільшити швидкість процесу. Так, найбільша швидкість фільтрування спостерігалась при рН = 5,5, що було характерним і для бавовняного фільтра. При незначному коригуванні рН до 7 та збільшенні лужності досліджуваної суспензії до рН = 10 швидкість фільтрування теж зростала порівняно із контрольною суспензією (рН = 8,5). Подальше коригування водневого показника у бік зростання кислотності призвело до зменшення швидкості фільтрування майже вдвічі у порівнянні із контрольним зразком.

Найбільший об'єм фільтрату, а відповідно і найвища швидкість фільтрування суспензії бентоніту через льняний фільтр, спостерігалась при значеннях рН у діапазоні від 5,5 до 10 (рис. 5). Зниження водневого показника до рН = 4 значно знижувало і швидкість процесу.

Залишкові концентрації фільтрату льняного фільтру у всіх досліджених випадках мали значення менше 1,5 мг/дм<sup>3</sup>, причому, найменших значень цього показника вдалось досягнути при коригуванні водневого показника як у більш кислий, так і у більш лужний бік порівняно із контрольним зразком. У всіх досліджених випадках ефективність фільтрування через льняний фільтр не опускалась нижче 95 %. Проте, зниження рН суспензії бентоніту до 4 лише знизило ефективність фільтрування, що свідчить про абсолютну недоцільність застосування реагентного коригування водневого показника до такого рівня з метою збільшення ефективності процесу. Більш того, найбільш ефективним для фільтрування через льняну тканину виявилось значення рН = 7, що дозволило знизити мутність на 99,4 % порівняно із початковим значенням, а подальше зниження рН не призвело до зростання ефективності фільтрування



**Рис. 4 – Зміна продуктивності бавовняного фільтру при коригуванні рН**  
( $C_0 = 34 \text{ мг/дм}^3$ ,  $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta h = 5 \text{ см}$ )

**Таблиця 2 – Ефективність фільтрування суспензій бентоніту через бавовняний фільтр при різних значеннях рН ( $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta h = 5 \text{ см}$ )**

рН	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0
$C_0$ , мг/дм <sup>3</sup>	34,0				
$C_{\text{тф}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	0,4	0,8	0,6	1,6	5,0

Швидкість фільтрування через фільтр із шовку при значенні водневого показника рН = 8,5 була зовсім незначною, порівняно із значеннями, отриманими при збільшенні лужності суспензії до рН = 10 (рис. 6). Майже втричі вдалось збільшити швидкість процесу при зменшенні водневого показника у діапазоні рН 4 ÷ 7, причому, отримані значення досліджуваних параметрів були майже ідентичними.

Найбільший об'єм фільтрату за однакової термін перегіає при значенні водневого показника дещо вищим за його значення у контрольній суспензії. Зменшення водневого показника до рівня рН = 4 та рН = 5,5 не дозволяє значно підвищити швидкість проходження суспензії бентоніту через шовковий фільтр, а якщо взяти до уваги вплив на довкілля та економічну доцільність використання додаткової кількості реагентів, то стає очевидним, що такі коригування не є виправданим. Разом з тим, у випадку використання фільтру із шовку, коригування рН дозволяє значно збільшити швидкість фільтрування навіть при незначній витраті реагентів.

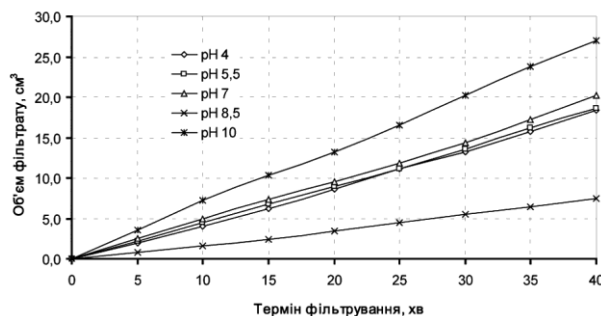
Дослідження впливу коригування водневого показника на ефективність фільтрування через фільтр із шовкової тканини (табл. 4) показало, що на відміну від бавовни та льону, коригування рН суттєво не впливає на ефективність процесу. Значення залишкової мутності при фільтруванні суспензії бентоніту через фільтр із шовкової тканини у всіх випадках коливалось у діапазоні 0,1 ÷ 0,3 мг/дм<sup>3</sup>, причому, найменшим цей показник був при значенні рН = 4 та склав лише 0,1 мг/дм<sup>3</sup>. Аналогічні значення (0,2 мг/дм<sup>3</sup>) досліджуваного параметра було отримано при величині рН = 5,5; рН = 7 та рН = 10. Найбільш доцільним, з урахуванням продуктивності процесу, при фільтруванні води із високим значенням показника мутності через шовковий фільтр є підвищення лужності води до рН = 10, що сприяє значному зростанню швидкості фільтрування та збільшенню його ефективності.

Нами також було досліджено можливість використання тканини із ацетатного волокна як матеріалу з капілярними властивостями, і, як і для трьох інших досліджених тканин, визначено доцільність реагентного коригування рН з метою збільшення швидкості та ефективності фільтрування суспензії бентоніту через фільтр із цього матеріалу.

Як показують результати дослідження таких фільтрів (рис. 7), швидкість фільтрування вдається майже вдвічі збільшити за умови підвищення кислотності вихідної суспензії до рН = 5,5. До того ж, при такому значенні водневого показника зростає і ефективність фільтрування – концентрація твердої фази у освітленій воді зменшується майже втричі, порівняно із значенням даного параметра при рН = 8,5 (табл. 5).

У всіх інших випадках коригування водневого показника майже не збільшувало швидкості фільтрування, а при збільшенні лужності до рН = 10 досліджуваний показник навіть дещо знизився відносно контролю. Таким чином, коригування рН з метою збільшення швидкості фільтрування каламутної води через ацетатну тканину доцільно робити лише у вузькому діапазоні значень, оскільки найбільш оптимальним є лише значення водневого показника, що становить 5,5.

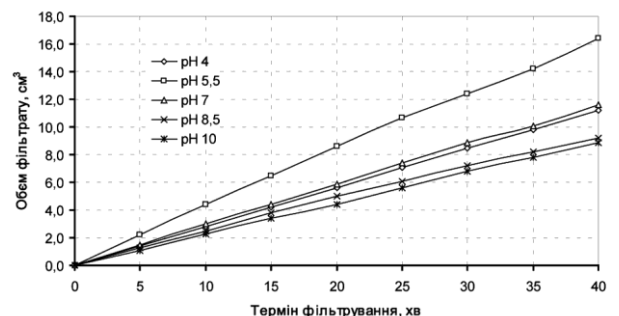
На відміну від попередньо досліджених матеріалів, найвище значення ефективності, якого вдалось досягнути при фільтруванні через ацетатну тканину, склало лише 85,9 %. Збільшення кислотності суспензії до рН = 4 та рН = 7 сприяло навіть зростанню мутності освітленої води порівняно зі зразком, де коригування водневого показника не здійснювалось – концентрація твердої фази у фільтраті склала відповідно 16 та 12,5 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 5). Збільшення рН до 10 дозволяє дещо збільшити ефективність фільтрування, проте концентрація твердої фази у освітленій воді все ще залишається високою і складає 7,6 мг/дм<sup>3</sup>



**Рис. 5 – Зміна продуктивності льняного фільтру при коригуванні рН**  
( $C_0 = 34 \text{ мг/дм}^3$ ,  $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta h = 5 \text{ см}$ )

**Таблиця 3 – Ефективність фільтрування суспензій бентоніту через льняний фільтр при різних значеннях рН ( $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta h = 5 \text{ см}$ )**

рН	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0
$C_0$ , мг/дм <sup>3</sup>	34,0				
$C_{\text{тф}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	1,4	0,4	0,2	1,0	0,4



**Рис. 6 – Зміна продуктивності фільтру із шовку при коригуванні рН**  
( $C_0 = 34 \text{ мг/дм}^3$ ,  $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta h = 5 \text{ см}$ )

**Таблиця 4 – Ефективність фільтрування суспензій бентоніту через фільтр із шовку при різних значеннях рН ( $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta h = 5 \text{ см}$ )**

рН	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0
$C_0$ , мг/дм <sup>3</sup>	34,0				
$C_{\text{тф}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2

**Рис. 7 – Зміна продуктивності фільтру із ацетатної тканини при коригуванні рН**  
( $C_0 = 34 \text{ мг/дм}^3$ ,  $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta h = 5 \text{ см}$ )

**Таблиця 5 – Ефективність фільтрування суспензій бентоніту через фільтр із ацетатної тканини при різних значеннях рН ( $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta h = 5 \text{ см}$ )**

рН	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0
$C_0$ , мг/дм <sup>3</sup>	34,0				
$C_{\text{тф}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	16,0	4,6	12,5	11,2	7,6

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що використання в процесах фільтрування високодисперсних суспензій матеріалів з капілярними властивостями дозволяє створювати прості, дешеві та ефективні апарати для розділення рідкої та твердої фаз. При цьому вибір тканини для капілярного фільтру та значення водневого показника суттєво впливають не лише на продуктивність фільтрування, а й на ефективність процесу. Встановлено, що льон є найбільш придатним для формування пористого середовища, оскільки забезпечуватиме найбільшу продуктивність сформованих на його основі фільтрів та високу ефективність процесу розділення фаз. Деяко меншою продуктивністю, але більшою ефективністю відрізняється фільтр, сформований із шовкової тканини. Саме ця тканина забезпечує нормативні вимоги до питної води без використання додаткових реагентів. Інші досліджувані тканини – бавовна та ацетатна тканина, забезпечували досить високі показники, однак вони були суттєво нижчі, ніж для льону чи шовку. Крім того, для виконання вимог нормативних документів необхідно для оброблених такими фільтрами вод передбачати ще один етап обробки або використовувати додаткові реагенти. В цілому, зважаючи на простоту конструкції фільтру, низьку загальну вартість процесу розділення фаз, відсутність втрат енергії досліджений спосіб є досить перспективним для впровадження в промислових масштабах.

#### Список використаної літератури

1. ДСанПіН 2.2.4-171-10 "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною". – Наказ Міністерства охорони здоров'я України 12.05.2010 р. № 400.
2. Правила приймання стічних вод абонентів у систему каналізації міста Києва. – К., 2011. – 30 с.
3. Радовенчик Я. В. Освітлення природних вод з використанням флокулянтів / Я. В. Радовенчик, А. О. Костриця, В. М. Радовенчик // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2013. – № 4. – С. 23–26.
4. Кульський Л. А. Технология очистки природных вод / Л. А. Кульський, П. П. Строкач. – К. : Вища шк., 1986. – 352 с.
5. Радовенчик Я. В. Очищення води з використанням матеріалів з капілярними властивостями / Я. В. Радовенчик, М. Д. Гомеля // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2009. – № 2. – С. 37–39.
6. Радовенчик Я. В. Вивчення умов перетікання рідини в капілярних матеріалах / Я. В. Радовенчик, В. С. Котлярова // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 6. – С. 23–25.
7. Радовенчик Я. В. Обезвоживание осадков ферроцианидов железа / Я. В. Радовенчик, В. С. Котлярова // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – № 5. – С. 32–35.
8. Радовенчик В. М. Новий спосіб освітлення води фільтруванням / В. М. Радовенчик, А. О. Костриця, Я. В. Радовенчик, Л. В. Сіренко // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2013. – № 5. – С. 3–6.
9. Радовенчик Я. В. Моделювання процесів фільтрування з використанням матеріалів з капілярними властивостями / Я. В. Радовенчик, А. О. Костриця, В. М. Радовенчик, Л. В. Сіренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 10. – С. 21–24

Надійшла до редакції 17.09.2016