

УДК 628.16:579.222

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.6.111985

О.В. Кравченко, О.С. Панченко\*

ДП “Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства”, Київ, Україна

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕНЬ ПРИ БІОТЕХНОЛОГІЧНО ІНТЕНСИФІКОВАНОМУ ПРОЦЕСІ ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ТА ДЕМАНГАЦІЇ ВОДИ НА ШВИДКИХ ФІЛЬТРАХ

**Background.** The results of investigations of various types of filter beds (zeolite, quartz sand, keramzit, activated carbon), which are used as beds for rapid filters at biotechnological intensification for ground water defferization and demanganation, are presented.

**Objective.** The aim of the paper is to evaluate the effectiveness of different types of filtering materials at biotechnological intensification of processes of water defferization and demanganation on rapid filters, both in terms of microorganism fixation and biomass accumulation in the filter loading, and from the point of view of the possible depth of iron and manganese compound removal.

**Methods.** The research was carried out on the model installation of filters with different types of loading (single and multilayer), artificially populated with microorganisms of the cultures of *Leptothrix* and *Sphaerotillus*. The investigated water was characterized by high level of iron and manganese. After the set biomass rise time, the number of microorganisms per unit volume of filter loading was determined, and the defferization and demanganation effectiveness was evaluated.

**Results.** The obtained results showed a high ability of activated carbon to accumulate the biomass of bacteria during the filtration (4500 CFU/cm<sup>3</sup>), but the defferization and demanganation percentage was low (65 % and 60 %, respectively). When water was filtered through other research materials, less biomass accumulation was observed, as well as the overall efficiency of the treatment process. For sand-zeolite-coal loading, the removal efficiency was up to 90 % for iron, and for manganese – up to 71 %.

**Conclusions.** The obtained results showed the prospects of using three-layer sand-zeolite-coal loading and the need to determine the optimal technological parameters.

**Keywords:** zeolite; biotechnological intensification; activated carbon; deferrization; demanganation.

### Вступ

Залізо та марганець є постійними компонентами природних вод, вміст яких коливається в досить широкому діапазоні: в окремих областях України може сягати для заліза 20–30 мг/дм<sup>3</sup>, для марганцю – 2–3 мг/дм<sup>3</sup>. Видалення цих елементів із води за їх високих концентрацій є досить складною задачею, внаслідок чого і сьогодні, незважаючи на наявність цілої низки фізичних, хімічних і біотехнологічних методів, недорого й ефективна технологія знезалізнення та деманганациї води відсутня.

Учені останніми роками все більше звертають увагу на внесок біологічного фактора видалення заліза при фізико-хімічному очищенні на фільтрах знезалізнення та деманганациї [1–6]. У роботі [1] показано, що бактерії р. *Galionella* на біофільтрах ефективно видаляють залізо при нейтральному рН, і зазначено, що фактор біологічного окиснення заліза був суттєвішим, ніж фізико-хімічного, в умовах повної аерації.

У роботі [3] як завантаження біофільтрів використовувались марганцевий і кварцовий пісок,

заселений залізо- та марганецьокисними бактеріями. Бактерії р. *Galionella* були знайдені у промивній воді після 6 місяців експлуатації фільтрів. Висока ефективність біологічної деманганациї (максимальний ступінь очищення 98,6 %) при застосуванні фільтрів із завантаженням кварцовим піском показана також у [7].

У наших попередніх роботах [8, 9] при дослідженні ефективності видалення заліза та марганцю культурами залізо- і марганецьокисних мікроорганізмів було виявлено, що представники родів *Leptotrix*, *Sphaerotillus*, *Metallogenium* на цеолітовому завантаженні фільтрів здатні видаляли залізо з ефективністю від 90 до 97 %, а марганець – від 74 до 91 %.

При дослідженні біологічного знезалізнення та деманганациї використовували переважно піщане завантаження фільтрів. У проведених нами дослідженнях [9] було отримано високі показники ефективності (до 98 %) видалення заліза на цеолітовому завантаженні фільтрів. При цьому значну роль грали залізо- та марганецьокисні бактерії: чим більше було значення загального мікробного числа, тим вищою була ефективність

\* corresponding author: elena.panchenko.92@gmail.com

видалення означених сполук. Варто зазначити, що бактерії мають здатність до закріплення, росту та розвитку на завантаженнях із великою питомою поверхнею, особливо на активованому вугіллі.

Тому нами було вирішено оцінити ефективність видалення сполук заліза та марганцю на різних типах завантаження фільтрів (цеоліт, кварцовий пісок, керамзит, активоване вугілля) при біотехнологічно інтенсифікованому процесі знезалізнення і деманганациї підземної води.

### Постановка задачі

Метою роботи є оцінка ефективності застосування різних типів фільтрувальних матеріалів при біотехнологічній інтенсифікації процесів знезалізнення та деманганациї води на швидких фільтрах як з точки зору закріплення мікроорганізмів і накопичення біомаси у фільтрувальному завантаженні, так і з точки зору можливої глибини видалення сполук заліза та марганцю.

### Матеріали і методи дослідження

Дослідження проводились на модельній установці фільтрів із різними типами завантаження (одно- та багат шаровими), штучно заселеними мікроорганізмами культур р. *Leptothrix* і р. *Sphaerotillius*, виділених нами у попередніх дослідженнях [8]. Модельна установка являла собою модельні фільтри (колонки, завантажені досліджуваними матеріалами) діаметром 64, 150 і 300 мм. Висота фільтрувального шару змінювалась у межах 1000–1500 мм для одношарових фільтрів, становила 1100 мм для двошарових (500 мм – нижній шар – керамзит або активоване вугілля і 600 мм – верхній шар – кварцовий пісок) і 1500 мм для тришарових (500 мм – верхній шар – активоване вугілля, 600 мм – кварцовий пісок і 400 мм – нижній шар – керамзит).

Досліджувана вода характеризувалась підвищеним вмістом заліза та марганцю. Концентрація заліза у воді становила 7,9–8,2 мг/дм<sup>3</sup>, марганцю – 0,3–0,4 мг/дм<sup>3</sup>. Після встановленого часу наросування біомаси визначалась кількість мікроорганізмів в одиниці об'єму фільтрувального завантаження, а також оцінювалась ефективність видалення заліза та марганцю.

Для порівняльної характеристики роботи фільтра, завантаженого цеолітом, разом із ним працювали фільтри з фільтрувальними шарами такого складу:

- цеоліт із розміром зерен 1–3 мм;
- кварцовий пісок із розміром зерен 0,8–2,5 мм;
- активоване вугілля;
- керамзит (1,5–3,0 мм);
- керамзит (1,5–3,0 мм) + кварцовий пісок (0,8–2,5 мм);
- активоване вугілля + пісок;
- кварцовий пісок (0,8–2,5 мм) + цеоліт (1–3 мм) + активоване вугілля (3–5 мм).

Аналітичні дослідження концентрації заліза і марганцю, загального мікробного числа (ЗМЧ) під час експериментів проводились за загальноприйнятими методиками, наведеними в ДСанПіН 2.2.4.171–10 “Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною”, а також: для заліза – за ГОСТ 4011–72 “Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа”, для марганцю – за ГОСТ 4974–72 “Вода питьевая. Методы определения содержания марганца”; для ЗМЧ – за МВ 10.2.1-113-2005 “Санітарно-мікробіологічний контроль якості питної води”.

Ефективність застосування різних типів фільтрувальних матеріалів при біотехнологічній інтенсифікації процесів знезалізнення та деманганациї води на швидких фільтрах оцінювали за відношенням різниці початкової та кінцевої концентрацій заліза і марганцю до початкової концентрації зазначених сполук.

### Результати і їх обговорення

Проведені нами дослідження на одношаровому цеолітовому та піщаному і двошаровому – активоване вугілля + пісок – фільтрах, з висотою завантаження 1100 мм, показали високу ефективність роботи цеолітового завантаження порівняно з піщаним і двошаровим завантаженням.

Залежності, що ілюструють зміну ефективності видалення заліза та марганцю на цеолітовому завантаженні, заселеному залізо- і марганецьокисними бактеріями, під час фільтроциклів, наведені на рис. 1, 2.

Залежності, що ілюструють зміну ефективності видалення заліза та марганцю на фільтрах, завантажених піском, керамзитом, піском і керамзитом, під час фільтроциклів, наведені на рис. 3 і 4. Завантаження модельних фільтрів заселене залізо- та марганецьокисними бактеріями.

На рис. 5 і 6 зображено графіки зміни ефективності видалення сполук заліза та марганцю впродовж фільтроциклів на фільтрах, завантаже-

них активованим вугіллям, активованим вугіллям і піском, активованим вугіллям, піском і керамзитом. Завантаження модельних фільтрів заселене залізо- та марганецьокисними бактеріями.

Як видно з наведених графіків (рис. 1, 2), ефективність видалення заліза при використанні піщаного завантаження не перевищувала 40 %, що нижче, ніж при застосуванні цеоліту; для марганцю – 5 %. Порівняно з роботами інших авторів [6, 7], при застосуванні фільтрів із завантаженням кварцовим піском спостерігалась висока ефективність біологічної деманганзації – максимально 98,6 %. Така

висока ефективність може бути пояснена наявністю інших специфічних бактерій на завантаженні фільтра.

Для активованого вугілля (див. рис. 5) у двох перших фільтроциклах ефективність видалення заліза була не більшою 65 %, що вище, ніж при застосуванні піску (рис. 3), для якого ефективність становила 40 %. Для марганцю спостерігалась аналогічна ситуація – 47 % для активованого вугілля (див. рис. 6) та 7 % для піску (див. рис. 3).

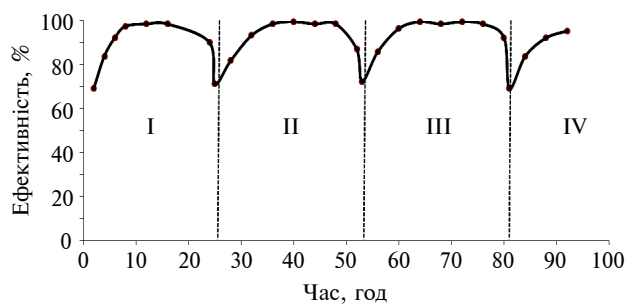


Рис. 1. Ефективність видалення сполук заліза: I, II, III, IV – фільтроцикли

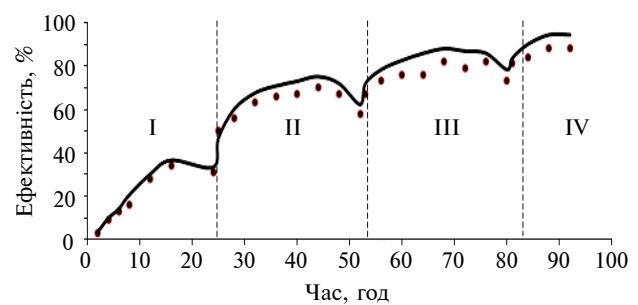


Рис. 2. Ефективність видалення сполук марганцю: I, II, III, IV – фільтроцикли

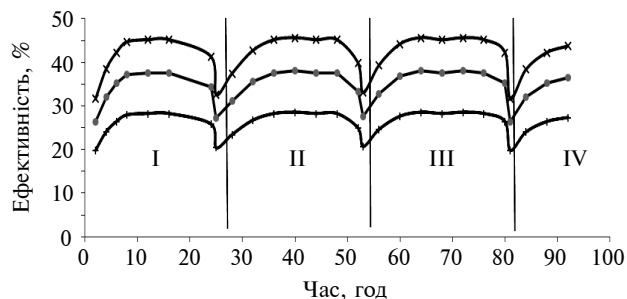


Рис. 3. Ефективність видалення сполук заліза: I, II, III, IV – фільтроцикли; ● – пісок; — – керамзит; × – пісок + керамзит

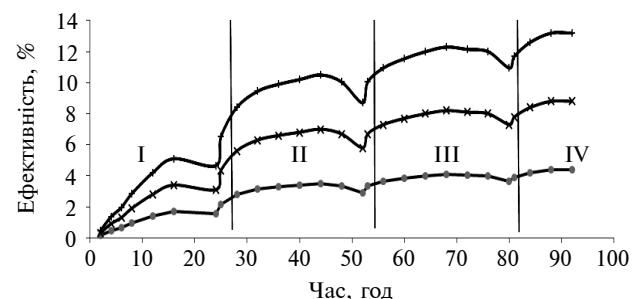


Рис. 4. Ефективність видалення сполук марганцю: I, II, III, IV – фільтроцикли; ● – пісок; — – керамзит; × – пісок + керамзит

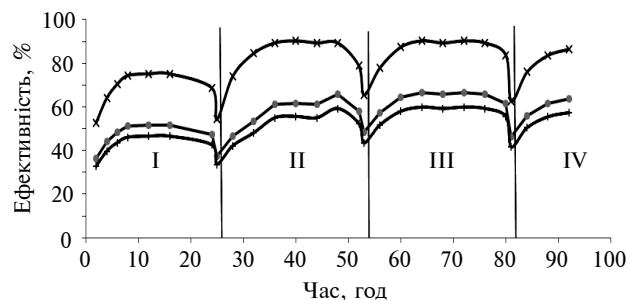


Рис. 5. Ефективність видалення сполук заліза: I, II, III, IV – фільтроцикли; ● – активоване вугілля; — – активоване вугілля + пісок; × – активоване вугілля + пісок + керамзит

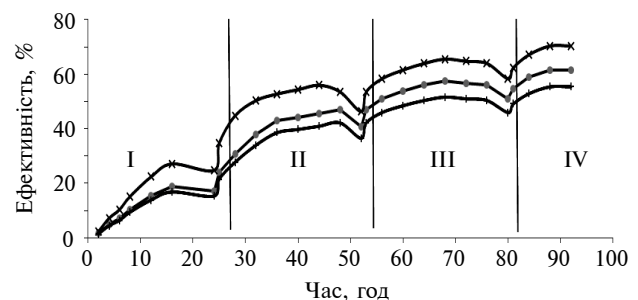


Рис. 6. Ефективність видалення сполук марганцю: I, II, III, IV – фільтроцикли; ● – активоване вугілля; — – активоване вугілля + пісок; × – активоване вугілля + пісок + керамзит

Використання суміші активованого вугілля та піску мало нижчу ефективність, ніж чистого активованого вугілля: для заліза ефективність не перевищувала 60 % (див. рис. 5), для марганцю – 55 % (див. рис. 6).

Ефективність видалення сполук заліза та марганцю на тришаровому завантаженні фільтра (див. рис. 5, 6) для заліза становила до 90 %, для марганцю – до 71 %.

Під час експериментів визначалося також ЗМЧ в одиниці завантаження фільтра для оцінки ефективності саме біологічного процесу видалення заліза та марганцю. Результати наведено в таблиці.

**Таблиця.** Зміна ЗМЧ в одиниці завантаження фільтра

Завантаження	ЗМЧ, КУО <sup>1</sup> /см <sup>3</sup>
Контроль	1050
Активоване вугілля	4500
Двошарове завантаження <sup>2</sup> : активоване вугілля + пісок	
Активоване вугілля	2500
Пісок	800
Тришарове завантаження <sup>2</sup> : активоване вугілля + пісок + + керамзит	
Активоване вугілля	6000
Пісок	1100
Керамзит	100
Цеоліт	2000
Пісок	900
Керамзит	20
Двошарове завантаження <sup>2</sup> : пісок + керамзит	
Пісок	1300
Керамзит	110

<sup>1</sup>КУО – колонієутворювальні одиниці.

<sup>2</sup>Значення ЗМЧ визначали за шарами завантаження.

Як видно з даних таблиці, для фільтра, завантаженого активованим вугіллям, значення ЗМЧ

становило 4500 КУО/см<sup>3</sup>, що є найвищим показником для всіх досліджених одношарових завантажень. При цьому ефективність видалення сполук заліза не перевищувала 65 %, для марганцю – 60 %.

На інших типах завантажень, крім цеолітового, ефективність видалення вказаних сполук була невисокою і варіювала в межах 29–45 % для заліза та 4–12 % для марганцю за низького значення ЗМЧ.

Для тришарового завантаження – піщано-цеоліто-вугільного – ефективність видалення заліза становила 90 % при значенні ЗМЧ до 6000 КУО/см<sup>3</sup>. Тобто теоретично для видалення заліза і марганцю можна використовувати тришарове завантаження, заселене залізо- і марганець-окисними мікроорганізмами.

### Висновки

Отримані результати засвідчили високу здатність активованого вугілля накопичувати біомасу бактерій у процесі фільтрування, але зниження показників заліза та марганцю було невисоким. Крім того, здатність активованого вугілля накопичувати хлор при незараженні завантаження призводила до збільшення часу, необхідного для нарощування біомаси в наступних циклах фільтрування.

Цеолітове завантаження, хоча і характеризувалось меншим питомим накопиченням біомаси, але через здатність цеоліту безпосередньо видаляти частину іонів заліза фізико-хімічним шляхом сумарна ефективність процесу була вищою, ніж при застосуванні активованого вугілля.

При фільтруванні води через інші досліджувані матеріали спостерігались як менше накопичення біомаси, так і нижча сумарна ефективність процесу очищення.

Результати, отримані для завантажень із кількох шарів фільтрувальних матеріалів, зокрема для тришарового – піщано-цеоліто-вугільного, привели до висновку про перспективність його застосування та необхідність визначення оптимальних технологічних показників (фракційного складу та висоти шарів, умов промивки тощо), що передбачається зробити у подальших дослідженнях.

### Список літератури

1. *Biological iron oxidation by Gallionella spp. in drinking water production under fully aerated conditions* / W.W.J.M. de Vet, I.J.T. Dinkla, L.C. Rietveld, M.C.M. van Loosdrecht // *Water Res.* – 2011. – **45**, № 17. – P. 5389–5398.
2. *Modelling and optimization of processes for removal of dissolved heavy metal compounds from drinking water by microbiological methods* / G.A. Dubinina, A.Yu. Sorokina, A.E. Mysyakin et al. // *Water Resour.* – 2012. – **39**, № 4. – P. 398–404.
3. *Fe (II) and Mn (II) removal from drilled well water: a case study from a biological treatment unit in Harbin* / S. Qin, F. Ma, P. Huang, J. Yang // *Desalination.* – 2009. – **245**, № 1-3. – P. 183–193.
4. *Microbial activity in drinking water-associated* / A. Farkas, M. Dragan-Bularda, V. Muntean et al. // *Cent. Eur. J. Biol.* – 2013. – **8**, № 2. – P. 201–214.
5. *Тарасевич Ю.И. Упрощенная модель обезжелезивания и деманганации воды на клиноптилолитовой загрузке фильтров* // *Химия и технология воды.* – 2013. – **32**, № 5. – С. 98–109.
6. *Дрожжин О.С. Роль железобактерий в трансформации железа и марганца в грунтовых водах и использование их для очистки питьевой воды: Автореф. ... дис. канд. биол. наук: 03.00.16.* – Воронежский гос. ун-т, 2001. – 20 с.
7. *Шаяхметова Г.С. Роль железобактерий при очистке воды от марганца Патракоского водозабора Краснокамского района РБ* // *Башкирский хим. журнал.* – 2007. – **14**, № 2. – С. 126–130.
8. *Кравченко О.В. Розробка методики ідентифікації культур мікроорганізмів, які здатні окислювати сполуки заліза та марганцю у природних водах* // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки.* – 2014. – Вип. 24. – С. 140–145.
9. *Кравченко О.В. Роль мікроорганізмів при видаленні із води високих концентрацій заліза на фільтрах з цеолітовим завантаженням* // *Вісник НУВГП. Технічні науки.* – 2015. – № 1. – С. 58–65.

### References

- [1] W.W.J.M. de Vet *et al.*, “Biological iron oxidation by Gallionella spp. in drinking water production under fully aerated conditions”, *Water Res.*, vol. 45, no. 17, pp. 5389–5398, 2011. doi: 10.1016/j.watres.2011.07.028
- [2] G.A. Dubinina *et al.*, “Modelling and optimization of processes for removal of dissolved heavy-metal compounds from drinking water by microbiological methods”, *Water Resour.*, vol. 39, no. 4, pp. 398–404, 2012. doi: 10.1134/s0097807812030037
- [3] S. Qin *et al.*, “Fe (II) and Mn (II) removal from drilled well water: a case study from a biological treatment unit in Harbin”, *Desalination*, vol. 245, no. 1-3, pp. 183–193, 2009. doi: 10.1016/j.desal.2008.04.048
- [4] A. Farkas *et al.*, “Microbial activity in drinking water-associated biofilms”, *Cent. Eur. J. Biol.*, vol. 8, no. 2, pp. 201–214, 2013. doi: 10.2478/s11535-013-0126-0
- [5] Y. Tarasevich *et al.*, “Simplified model of deferrization and demanganization of water on clinoptilolite filter loading”, *Himiya i Tekhnologiya Vody*, vol. 32, no. 5, pp. 98–109, 2013 (in Russian).
- [6] O. Drozhzhin, “The role of iron bacteria in the iron and manganese transformation in groundwater and their use for purification of drinking water”, Ph.D thesis, Voronezh State University, Voronezh, Russia, 2001 (in Russian).
- [7] G. Shayakhmetova *et al.*, “The role of iron bacteria in water demanganation of Patrakoskiy intake of Krasnokamskiy region RB”, *Bashkirskiy Khimicheskiy Zhurnal*, vol. 14, no. 2, pp. 126–130, 2007 (in Russian).
- [8] O.V. Kravchenko, “Development of methods for identification of microbial cultures that are able to oxidize iron and manganese compounds in natural waters”, *Problemy Vodopostachannya, Vodovidvedennya ta Hidravliki*, no. 24, pp. 140–145, 2014 (in Ukrainian).
- [9] O.V. Kravchenko, “The role of microorganisms in the removal of high concentrations of iron on filters with zeolite loading”, *Visnyk NUVHP. Tekhnichni Nauky*, vol. 1, no. 69, pp. 58–65, 2015 (in Ukrainian).

О.В. Кравченко, О.С. Панченко

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕНЬ ПРИ БІОТЕХНОЛОГІЧНО ІНТЕНСИФІКОВАНОМУ ПРОЦЕСІ ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ТА ДЕМАНГАЦІЇ ВОДИ НА ШВИДКИХ ФІЛЬТРАХ

**Проблематика.** Наведено результати досліджень різних типів фільтрувальних матеріалів (цеоліту, кварцового піску, керамзиту, активованого вугілля), які застосовуються для завантаження швидких фільтрів при біотехнологічній інтенсифікації процесів знезалізнення та деманганізації підземної води.

**Мета дослідження.** Метою роботи є оцінка ефективності застосування різних типів фільтрувальних матеріалів при біотехнологічній інтенсифікації процесів знезалізнення та деманганізації води на швидких фільтрах як з точки зору закріплення мікроорганізмів і накопичення біомаси у фільтрувальному завантаженні, так і з точки зору можливої глибини видалення сполук заліза та марганцю.

**Методика реалізації.** Дослідження проводились на модельній установці фільтрів із різними типами завантаження, штучно заселеними мікроорганізмами культур р. *Leptothrix* і р. *Sphaerotillus*. Досліджувана вода характеризувалась підвищеним вмістом заліза та марганцю. Після встановленого часу нарощування біомаси визначалась кількість мікроорганізмів в одиниці об'єму фільтрувального завантаження, а також оцінювалась ефективність видалення заліза та марганцю.

**Результати дослідження.** Отримані результати засвідчили високу здатність активованого вугілля накопичувати біомасу бактерій у процесі фільтрування (4500 КУО/см<sup>3</sup>), але зниження показників заліза та марганцю було невисоким (65 та 60 % відповідно). При фільтруванні води через інші досліджувані матеріали спостерігались як менше накопичення біомаси, так і нижча сумарна ефективність процесу очищення. Для піщано-цеоліто-вугільного завантаження ефективність видалення становила для заліза до 90%, для марганцю – до 71 %.

**Висновки.** Отримані результати показали перспективність застосування піщано-цеоліто-вугільного завантаження та необхідність визначення оптимальних технологічних показників.

**Ключові слова:** цеоліт; біотехнологічна інтенсифікація; активоване вугілля; знезалізнення; деманганізація.

А.В. Кравченко, Е.С. Панченко

#### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАГРУЗОК ПРИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОМ ПРОЦЕССЕ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ И ДЕМАНГАНАЦИИ ВОДЫ НА СКОРЫХ ФИЛЬТРАХ

**Проблематика.** Приведены результаты исследований различных типов фильтрующих материалов (цеолита, кварцевого песка, керамзита, активированного угля), которые применяются для загрузки скорых фильтров при биотехнологической интенсификации процессов обезжелезивания и деманганации подземной воды.

**Цель исследования.** Целью работы является оценка эффективности применения различных типов фильтрующих материалов при биотехнологической интенсификации процессов обезжелезивания и деманганации воды на скорых фильтрах как с точки зрения закрепления микроорганизмов и накопления биомассы в фильтрующей загрузке, так и с точки зрения возможной глубины удаления соединений железа и марганца.

**Методика реализации.** Исследования проводились на модельной установке фильтров с различными типами загрузки, искусственно заселенной микроорганизмами р. *Leptothrix* и р. *Sphaerotillus*. Исследуемая вода характеризовалась повышенным содержанием железа и марганца. После установленного времени наращивания биомассы определялось количество микроорганизмов в единице объема фильтрующей загрузки, а также оценивалась эффективность удаления железа и марганца.

**Результаты исследования.** Полученные результаты показали высокую способность активированного угля накапливать биомассу бактерий в процессе фильтрации (4500 КОЕ/см<sup>3</sup>), но снижение показателей железа и марганца было невысоким (65 и 60 % соответственно). При фильтровании воды через другие исследуемые материалы наблюдались как меньшее накопление биомассы, так и низкая суммарная эффективность процесса очистки. Для песчано-цеолито-угольной загрузки эффективность удаления составляла для железа до 90 %, для марганца – до 71%.

**Выводы.** Полученные результаты показали перспективность применения песчано-цеолито-угольной загрузки и необходимость определения оптимальных технологических показателей.

**Ключевые слова:** цеолит; биотехнологическая интенсификация; активированный уголь; обезжелезивание; деманганация.

Рекомендована Радою  
факультету біотехнології і біотехніки  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
11 жовтня 2017 року