

УДК 628.16

© 2024

## ОПТИМАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ НОВИХ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ПИТНОЇ ВОДИ

Є.М. Мацелюк<sup>1</sup>, Д.В. Чарний<sup>2</sup>,  
В.Д. Левицька<sup>3</sup>, С.В. Марисик<sup>4</sup>

<sup>1</sup>кандидат технічних наук

<sup>2</sup>доктор технічних наук

<sup>3,4</sup>доктори філософії

Інститут водних проблем і меліорації

Національної академії аграрних наук України

вул. Васильківська, 37, м. Київ, 03022, Україна

e-mail: <sup>1</sup>evgen1523@ukr.net, <sup>2</sup>dmitriych10@gmail.com,

<sup>3</sup>veral@ukr.net, <sup>4</sup>sergsi.marisik@ukr.net

ORSID: <sup>1</sup>0000-0001-9960-6333, <sup>2</sup>0000-0001-6150-6433,

<sup>3</sup>0000-0003-2213-1696, <sup>4</sup>0000-0002-0100-7787

Надійшла 09.09.2024

**Мета.** Визначити ефективність і оптимальні технологічні параметри нових фільтрувальних матеріалів і сорбентів, призначених для очищення природних поверхневих вод. **Методи.** Застосовували емпіричні методи (для проведення лабораторних досліджень), метод аналітичного співставлення (для визначення ефективності осадження сорбенту) та математичної статистики (для побудови моделей ефективності очищення за показником каламутності). **Результати.** Встановлено, що у разі попереднього очищення води із застосуванням пінополістирольного завантаження найвища ефективність становить 44% за швидкості фільтрування 10 м/год, а оптимальними параметрами є діаметр гранул пінополістиролу 5–8 мм та товщина фільтрувального завантаження 1,5 м; у разі доочищення води ефективність пінополістирольного фільтра становить 60–80%, ефективність цеолітового фільтра — 50–65%, а оптимальними параметрами є діаметр гранул пінополістиролу 2–5 мм і висота фільтрувального завантаження 0,8–1,0 м. Поєднання пінополістирольних фільтрів попереднього очищення і доочищення води забезпечує ефективність очищення за каламутністю 70–80%, за кольоровістю — до 50%. Кращу адгезію забруднень забезпечує суміш бентоніту з фероціанідом міді — вона суттєво прискорює утворення пластівців і їх випадання в осад, не зменшуючи ефективності сорбенту. Найкращий ефект у разі сорбції <sup>137</sup>Cs з модельного розчину спостерігався за застосування фероціаніду міді: всі його концентрації включно з мінімальною 0,1 г/л забезпечували видалення <sup>137</sup>Cs за нижньою межею чутливості спектрометра гамма-випромінювання «АТОЛЛ-3М». **Висновки.** Встановлено доцільність застосування нових фільтрувальних матеріалів — цеоліту й пінополістиролу та сорбційних матеріалів — порошкоподібного цеоліту, бентоніту і фероціаніду міді для очищення природних вод, визначено їх ефективність та оптимальні технологічні параметри.

**Ключові слова:** водопідготовка, фітопланктон, іони важких металів, радіонукліди, фільтрувальні матеріали, сорбенти, оптимальні параметри, ефективність очищення.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202411-10>

Ресурсні можливості України щодо фільтрувальних матеріалів для водопідготовки, насамперед кварцового піску, досить обмежені. Тож актуальним є обґрунтування доцільності використання нових фільтрувальних матеріалів і визначення їхніх оптимальних параметрів, що дають змогу ефективно затримувати забруднення із джерел питного водопостачання. Характерна особливість сучасного стану поверхневих водойм — утворення та інтенсивний розвиток у них ціанобактерій (фітопланктону), наявність іонів важких металів і радіонуклідів, забруднень, пов'язаних зі збройною агресією рф тощо [1–10].

**Мета досліджень** — з'ясувати властивості та визначити оптимальні технологічні параметри нових фільтрувальних матеріалів, які дають змогу успішно видаляти з води більшість із наявних забруднень.

**Матеріали і методи досліджень.** Ефективність основних доступних вітчизняних фільтрувальних матеріалів, якот пінополістирол, цеоліт та адсорбенти — бентоніт, цеоліт, фероціанід міді, досліджували впродовж 2021—2023 рр. із використанням експериментальної та лабораторної установок [1, 3, 11].

Попередніми дослідженнями, які проводилися в Інституті водних проблем і меліорації (ІВПіМ) НААН, встановлено, що для вилучення з води іонів важких металів, радіонуклідів та органічних забруднень перспективним є застосування сорбентів, а саме цеоліту Сокирянського родовища з розміром фракцій 0,076—0,1 мм, глинопорошку бентоніту з розміром фракцій 0,072—0,1 мм та фероціаніду міді ( $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ) [12].

Дослідження ефективності зазначених фільтрувальних матеріалів здійснювали на експериментальній установці, створеній у лабораторії водопостачання і водовідведення відділу водних ресурсів ІВПіМ НААН (рис. 1).

Гідродинамічні характеристики зазначених сорбентів досліджувались на лабораторній установці, поданій на рис. 2 [12, 13].

Ефективність роботи водоочисних споруд визначали за формулою:

$$E = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вих}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100\%,$$

де  $C_{\text{вх}}$  і  $C_{\text{вих}}$  — концентрація забруднень відповідно на вході водоочисної споруди і на виході з неї, мг/дм<sup>3</sup>.

Далі встановлювали множину факторів, що впливають на ефективність роботи водоочисної споруди:

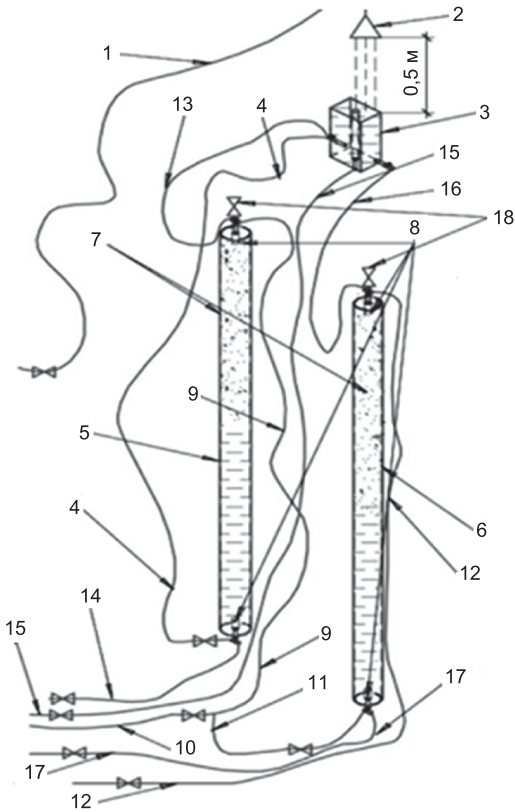
$$E = f(A; B; T; t^\circ\text{C}),$$

де  $A$  — характеристики конструкції та завантаження водоочисної споруди (діаметри гранул, коефіцієнти їх нерівномірності, товщина фільтрувального шару, вид завантаження тощо);  $B$  — гідравлічний режим роботи споруди (напрямок руху води, швидкість фільтрування);  $T$  — тривалість роботи споруди, що призводить до зміни параметра  $A$  внаслідок накопичення забруднень у фільтрувальному завантаженні;  $C$  — сукупність інгредієнтів у рідині;  $t^\circ\text{C}$  — температурний режим роботи споруди.

**Результати досліджень.** Параметри фільтрів із пінополістирольно-цеолітовим завантаженням та режимами роботи установки були такими: товщина пінополістирольного завантаження  $h_{\text{ф}} = 1,0$  м, товщина цеолітового завантаження  $h_{\text{ц}} = 0,3$  м, швидкість фільтрування за годину  $V_1 = 3$  м/год,  $V_2 = 5$  м/год,  $V_3 = 7$  м/год і  $V_4 = 9$  м/год.

Ефективність дії фільтрувальних завантажень, тобто здатність затримувати завислі речовини, за різних режимів роботи фільтрів наведено на рис. 3

Визначено, що оптимальна швидкість фільтрування становить 3–5 м/год. Технологічним регламентом з реалізації типової технології водопідготовки передбачена



**Рис. 1.** Експериментальна установка для використання на очисних спорудах  
**1** — лінія надходження води на аерацію; **2** — душова насадка; **3** — бак-дегазатор із системою переливу; **4** — лінія надходження дегазованої води на фільтрацію; **5** — фільтрувальна колона Ф1 (модель префільтру контактного фільтра); **6** — фільтрувальна колона Ф2 (модель швидкого фільтра); **7** — фільтруюче завантаження із гранул спіненого пінополістиролу і цеоліту; **8** — шпарові ковпачки — зворотні фільтри, що утримують гранули пінополістиролу всередині корпусу фільтрувальної колони; **9** — лінія надходження фільтрату з колони Ф1 на колону Ф2; **10** — скид частки фільтрату колони Ф1 у каналізацію для встановлення у колоні Ф2 швидкості фільтрування, меншої за швидкість фільтрації у колоні Ф1; **11** — лінія надходження фільтрату з колони Ф1 до колони Ф2 для подальшої фільтрації; **12** — лінія скиду фільтрату з колони Ф2; **13** — лінія надходження промивної води до колони Ф1; **14** — лінія скиду промивної води з колони Ф1 в каналізацію; **15** — лінія скиду переливної води з бака-дегазатора; **16** — лінія надходження промивної води до колони Ф2; **17** — лінія скиду промивної води з колони; **18** — засувки

швидкість фільтрування  $V_n = 7$  м/год. За наявних потужностей водоочисних споруд і об'ємів водоподачі практично на всіх водоочисних станціях є можливість забезпечувати визначену оптимальну швидкість фільтрування, а отже, здійснювати ефективніше очищення природних поверхневих вод.

Дослідження ефективності пінополістирольного та цеолітового фільтрувального завантаження під час очищення поверхневих вод показало:

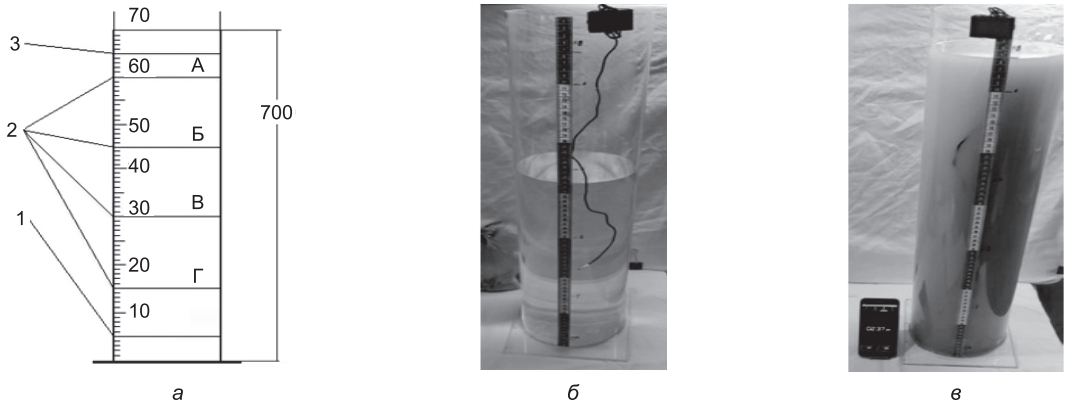
а) за попереднього очищення води із застосуванням пінополістирольного завантаження у досліджуваних умовах (температура води — 13–18°С, максимальна концентрація фітопланктону — 1040 тис. кл./см<sup>3</sup>) найвища ефективність очищення води становила  $E = 44\%$ , коли швидкість фільтрування  $V_{\phi} = 10$  м/год, а оптимальними параметрами були діаметр гранул пінополістиролу  $d_n = 5\text{--}8$  мм та товщина фільтрувального завантаження  $H_{\phi} = 1,5$  м;

б) у разі доочищення води:

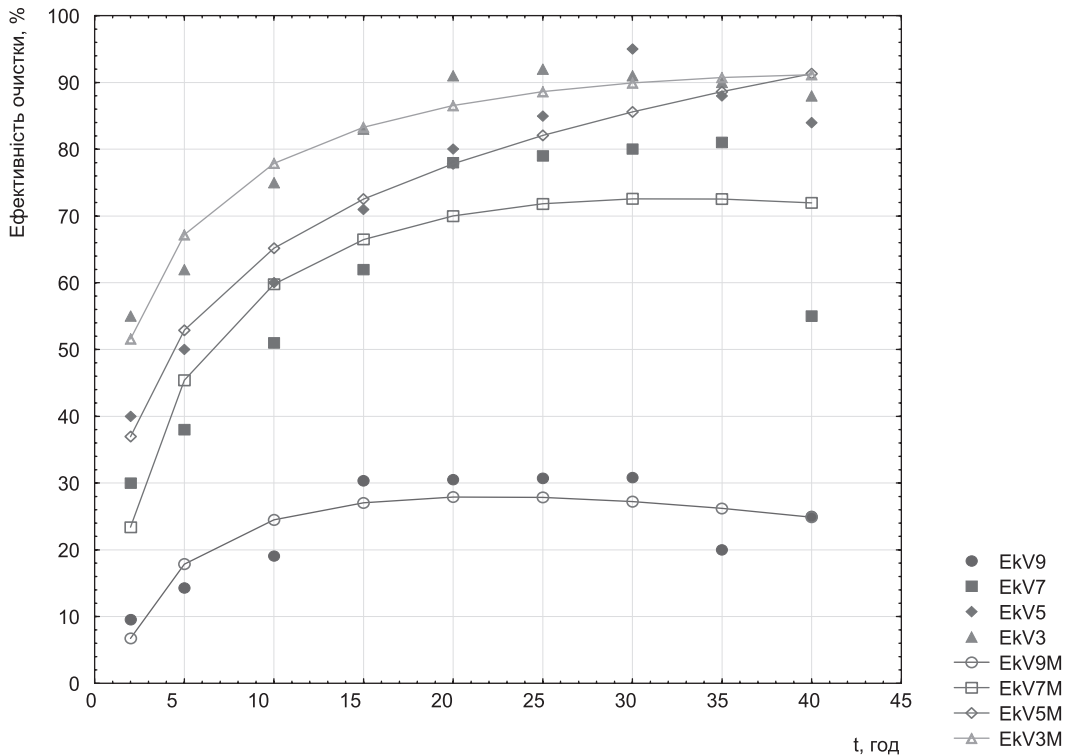
- ефективна робота фільтра з пінополістирольним завантаженням за показником кольоровості становить близько 20 год, а цеолітового фільтра — близько 30 год; за показником каламутності пінополістирольний фільтр працює приблизно 60 год з ефективністю 60–80%, цеолітовий фільтр працює близько 40 год з ефективністю 50–65%. Оптимальними параметрами пінополістирольного фільтрувального завантаження є діаметр гранул  $d_n = 2\text{--}5$  мм і висота фільтрувального завантаження  $H_{\phi} = 0,8\text{--}1,0$  м;

- поєднання двох фільтрів — для попереднього очищення та доочищення води, завантажених пінополістирольними гранулами зазначених діаметрів, забезпечує термін фільтроциклу до 60 год за показником каламутності при 70–80% ефективності очищення і 24–25 год — за показником кольоровості при ефективності очищення 50%.

Дослідження гідродинамічних характеристик адсорбентів дало змогу визначити гідралічну крупність цеолітової та бентонітової глини та їх сумішей з фероціанідом. Кращий результат забезпечує



**Рис. 2.** Структура макета лабораторного вертикального відстійника  
а: 1 – зона накопичення осаджених часток, 2 – зони збору матеріалу (А, Б, В, Г) на аналіз рН-метром та каламутниміром, 3 – висота робочого об'єму макета відстійника; б: лабораторний відстійник без сорбенту; в: лабораторний відстійник із сорбентом



**Рис. 3.** Зміна концентрації завислих речовин у воді після фільтрування з використанням пінополістирольно-цеолітового завантаження за різної швидкості фільтрування  
EkV9 і EkV9M – відповідно ефективність і модель ефективності очистки від каламутності за швидкості фільтрування 9 м/год; EkV7 і EkV7M – ефективність і модель ефективності очистки від каламутності за швидкості фільтрування 7 м/год; EkV5 і EkV5M – ефективність і модель ефективності очистки від каламутності за швидкості фільтрування 5 м/год; EkV3 і EkV3M – ефективність і модель ефективності очистки від каламутності за швидкості фільтрування 3 м/год

**Ефективність використання сорбентів різних типів**

Час контакту, год	Тип сорбенту	Концентрація, г/л	<sup>40</sup> Cd, Бк	<sup>137</sup> Cs, Бк	Ефективність очищення <sup>37</sup> Cs, %
	Вихідна вода		377	53	
0,5	Цеоліт	1	364	13	75,47
0,5	Цеоліт	2	365	13	75,47
0,5	Цеоліт	4	343	11	79,25
0,5	Бентоніт + цеоліт	0,5+0,5	363	11	79,25
0,5	Бентоніт + цеоліт	1+1	355	9	83,02
0,5	Бентоніт + цеоліт	2+2	352	9	83,02
20	Цеоліт	1	355	6	88,68
20	Цеоліт	2	349	7	86,79
20	Цеоліт	4	355	~0	~100,00
20	Бентоніт + цеоліт	0,5+0,5	349	1	98,11

використання суміші бентоніту з фероціанідом міді, що суттєво прискорює утворення пластівців і випадання їх в осад, не зменшуючи ефективність сорбенту. Повний цикл відстоювання для цеоліту становить 6 днів, для бентоніту — 4 дні, а для суміші бентоніту та фероціаніду — 5–8 год.

Результати аналітичних співставлень свідчать про те, що у разі адсорбції <sup>137</sup>Cs з модельного розчину найкращі показники було отримано за допомогою фероціаніду міді. Всі його концентрації включно

з мінімальною 0,1 г/дм<sup>3</sup> забезпечували видалення <sup>137</sup>Cs за нижньою межею чутливості спектрометра гамма-випромінювання «АТОЛЛ-3М» [11].

Результати експериментів з вилучення радіонуклідів за допомогою природних сорбентів наведено у таблиці.

Отримані авторами результати досліджень було апробовано та впроваджено на водоочисній станції м. Нікополь та під час розроблення технології очищення води на Українсько-Ізраїльському підприємстві «АЛЬФА АТОМ».

**Висновки**

Встановлено ефективність застосування вітчизняних фільтрувальних і сорбційних матеріалів для вилучення із води специфічних забруднень — фітопланктону, іонів важких металів і радіонуклідів. За попереднього очищення води із застосуванням пінополістирольного завантаження у досліджуваних умовах (температура води 13–18 °С, максимальна концентрація фітопланктону 1040 тис. кл./см<sup>3</sup>) найвища ефективність очищення становила 44% у разі швидкості фільтрування 10 м/год, а оптимальними параметрами були: діаметр

гранул пінополістиролу 5–8 мм і товщина фільтрувального завантаження 1,5 м. В умовах доочищення води оптимальними параметрами були діаметр гранул пінополістиролу 2–5 мм і товщина фільтрувального завантаження 0,8–1,0 м. Кращий результат за гідродинамічними характеристиками показала суміш бентоніту з фероціанідом, яка суттєво прискорює утворення пластівців і випадання їх в осад, не зменшуючи ефективності сорбенту. Що стосується вилучення <sup>137</sup>Cs, то найкращі результати було отримано при сорбції <sup>137</sup>Cs із модельного

розчину за допомогою фероціаніду міді. Всі його концентрації включно з мінімальною 0,1 г/дм<sup>3</sup> забезпечували видалення

цього виду забруднення за нижньою межею чутливості спектрометра гамма-випромінювання «АТОЛЛ-3М».

**Matseliuk Ye.<sup>1</sup>, Charnyi D.<sup>2</sup>, Levytska V.<sup>3</sup>, Marysyk S.<sup>4</sup>**

*Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS, 37 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine; e-mail: <sup>1</sup>evgen1523@ukr.net, <sup>2</sup>dmitriych10@gmail.com, <sup>3</sup>veral@ukr.net, <sup>4</sup>sergsi.marisik@ukr.net; ORCID: <sup>1</sup>0000-0001-9960-6333, <sup>2</sup>0000-0001-6150-6433, <sup>3</sup>0000-0003-2213-1696, <sup>4</sup>0000-0002-0100-7787*

**Optimum technological parameters of new filter materials for the preparation of drinking water**

**Goal.** To determine the efficiency and optimal technological parameters of new filter materials and sorbents intended for cleaning natural surface waters. **Methods.** Empirical (for conducting laboratory studies), analytical comparison (for determining the efficiency of sorbent deposition), and mathematical statistics (for building models of cleaning efficiency based on the turbidity index). **Results.** It was established that in the case of pre-treatment of water with the use of polystyrene foam loading, the highest efficiency was 44% at a filtration speed of 10 m/h, and the optimal parameters were the diameter of polystyrene foam granules of 5–8 mm and the thickness of the filter loading of 1.5 m. In the case of additional water purification, the efficiency of

the polystyrene foam filter was 60–80%, the efficiency of the zeolite filter was 50–65%, and the optimal parameters were the diameter of the polystyrene foam granules of 2–5 mm and the height of the filter load of 0.8–1.0 m. The combination of pre-cleaning and post-cleaning polystyrene foam filters ensured turbidity cleaning efficiency of 70–80%, and color — up to 50%. A mixture of bentonite with copper ferrocyanide provided better adhesion of contaminants — it significantly accelerated the formation of flakes and their precipitation, without reducing the effectiveness of the sorbent. The best effect in the case of <sup>137</sup>Cs sorption from the model solution was observed when using copper ferrocyanide: all its concentrations, including the minimum of 0.1 g/l, ensured the removal of <sup>137</sup>Cs beyond the lower sensitivity limit of the «ATOLL-3M» gamma-ray spectrometer. **Conclusions.** The expediency of using new filter materials — zeolite and expanded polystyrene and sorption materials — powdered zeolite, bentonite, and copper ferrocyanide for the purification of natural waters was established, and their efficiency and optimal technological parameters were determined.

**Key words:** water treatment, phytoplankton, heavy metal ions, radionuclides, filter materials, sorbents, optimal parameters, cleaning efficiency.

**DOI:** <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202411-10>

## Бібліографія

1. Мацелюк Є.М., Чарний Д.В., Левицька В.Д., Марисик С.В. Нові технологічні рішення для систем водопідготовки в сучасних умовах. *Меліорація і водне господарство*. 2021. № 2. С. 201–209. doi: 10.31073/mivg202102-303

2. Чарний Д.В., Мацелюк Є.М., Левицька В.Д. та ін. Особливості формування якості води поверхневих джерел водопостачання як чинник вибору методу водопідготовки. *Меліорація і водне господарство*. 2021. № 2. С. 45–54. doi: 10.31073/mivg202102-307

3. Строкаль В.П., Ковпак А.В. Воєнні конфлікти та вода: наслідки й ризики. *Екологічні науки*. 2022. № 5(44). С. 94–102. doi: 10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14

4. Yatsiuk M.V., Onanko Yu.A., Mosiichuk Ya.B., Mosiichuk A.B. Analysis of the efficiency of traditional technologies of water preparation of the

Kremenchuk reservoir of the Dnipro river to ensure drinking needs. *Land Reclamation and Water Management*. 2024. № 1. P. 54–65. doi: 10.31073/mivg202401-377

5. Вплив повномасштабної агресії на водні об'єкти як джерела водопостачання. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2023. № 45. С. 5–14. doi: 10.32347/2524-0021.2023.45.5-14

6. Слободник Я., Алігізакіс Н., Освальд П. Скринінговий моніторинг річкового басейну Дніпра. Київ: Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України; Державне агентство водних ресурсів України; Водна Ініціатива плюс Європейського Союзу для країн Східного партнерства (EUWI+). Відень: Umweltbundesamt GmbH; Париж: Office International de l'Eau (IOW), 2021. 34 с.

7. Вишневецький В.І., Лопата Л.М. «Цвітіння» води на водозаборі дніпровської водопровідної станції. *Меліорація і водне господарство*. 2016. № 104. С. 31–35.

8. Єльнікова Т.О., Подчашинський Ю.О. Моделювання евтрофних процесів у водосховищах річки Тетерів Житомирської області на основі відеозображень проб води. *Вісник ЖДТУ*. 2015. № 3(74). С. 54–59.

9. Гопчак І.В., Жук В.М., Басюк Т.О. Наслідки військових дій на водні ресурси України. *Прискорення змін для подолання водної кризи в Україні: матеріали XI міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів (22 березня 2023, м. Київ)*. Київ: ІВПіМ НААН, 2023. С. 105–106. doi: 10.31073/mivg2023

10. *Khilchevskiy V.K., Grebin V.V., Bolbot H.V.* River basins districts of Ukraine — comparison with the map of Russia's armed aggression (summer 2022). *Proceedings 16th International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. European Association of Geoscientists & Engineers*. 2022. P. 1–5. doi: 10.3997/2214-4609.2022580017

11. *Онанко Ю.А.* Оптимізація параметрів фільтрів із пінополістирольним та цеолітовим завантаженням при очищенні природних і стічних вод: дис. ... д-ра філософії: 192 Будівництво та цивільна інженерія. Київ, 2023. 228 с. [https://drive.google.com/file/d/1yPXOHlq4Da6w5sZYS65oB6\\_1JGD2BVu/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/1yPXOHlq4Da6w5sZYS65oB6_1JGD2BVu/view?usp=share_link)

12. *Марусик С.В.* Обґрунтування технологічних і конструктивних параметрів застосування сорбційних матеріалів при очищенні води від іонів важких металів і радіонуклідів: дис. ... д-ра філософії: 192 Будівництво та цивільна інженерія. Київ, 2024. 239 с. [https://drive.google.com/file/d/1cTtxtm6PgRQiGzOZXmmqrF\\_spHLu\\_FFU/view](https://drive.google.com/file/d/1cTtxtm6PgRQiGzOZXmmqrF_spHLu_FFU/view)

13. *Марусик С.В., Чарний Д.В.* Визначення характеристик осаджування важких металів вітчизняними природними та штучними сорбентами. *Прискорення змін для подолання водної кризи в Україні: матеріали XI міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів (22 березня 2023, м. Київ)*. Київ: ІВПіМ НААН, 2023. С. 105–106. doi: 10.31073/mivg2023