

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

МОДИФІКАЦІЯ КВАРЦОВОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНТАКТНИХ ОСВІТЛЮВАЧІВ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ПИТНОЇ ВОДИ

С. С. Душкін¹¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

УДК 628.16

DOI: 10.52363/2522-1892.2022.1.8

Отримано: 15 березня 2022

Прийнято: 7 квітня 2022

Cite as: Dushkin S. (2022). Modification of the quartz loading contact clarifiers in water treatment processes. Technogenic and ecological safety, 11(1/2022), 55–60. doi: 10.52363/2522-1892.2022.1.8

Анотація

В статті розглянуто вплив модифікації кварцового завантаження контактних освітлювачів на ступінь структурно-механічної гідратації гідроксиду алюмінію в процесах очищення води.

Модифікація молекулярної структури поверхні кварцових зерен фільтруючого завантаження збільшує брудосмість і підвищує експлуатаційні характеристики конструкцій. Для модифікації фільтруючих матеріалів можуть використовуватися коагулянти. Модифікація фільтруючих матеріалів дозволяє з мінімальними витратами підвищити продуктивність станції водоочисних споруд, підвищити якість фільтрату і знизити витрати на водопідготовку за рахунок зниження витрати реагентів і збільшення швидкості фільтрації. Суть методу полягає у підвищенні адгезії фільтруючих матеріалів методом обробки його розчином реагенту. Процес зчеплення зважених частинок, зазвичай з негативним зарядом, є більш інтенсивним відносно модифікованого навантаження, ніж немодифікованого.

Встановлено, що використання модифікованого кварцового завантаження дозволяє зменшити ступінь структурно-механічної гідратації гідроксиду алюмінію, збільшити питому вагу коагульованих домішок, що, в кінцевому підсумку, дозволяє інтенсифікувати процеси очистки води, а саме знизити витрати реагентів в середньому на 40...50 % з отриманням води необхідної якості, при цьому собівартість освітленої води зменшується на 25...30 %.

Ключові слова: модифікація кварцового завантаження, контактний освітлювач, структурно-механічна гідратація, питома вага, інтенсифікація процесів очистки води.

Постановка проблеми

Прояснення води відноситься до одного з найвідоміших та ефективних способів видалення з води завислих і колоїдних речовин. Можна виділити наступні методи інтенсифікації процесу освітлення [1–3]:

– фільтрації в напрямку зменшення крупності зерен завантаження, а також її укрупнення з одночасним збільшенням висоти шару з метою зниження інтенсивності приросту втрат напору за рахунок розосередження забруднень в можливо більшому обсязі (найбільш вдало це реалізується в контактних освітлювачах);

– застосування різних способів попередньої обробки води з метою збільшення щільності і міцності затриманих фільтром забруднень, більш рівномірного їх розподілу в товщі фільтруючого шару;

– застосування для завантаження зернистих матеріалів з високою міжзерною пористістю і розвиненою питомою поверхнею.

Процес контактної коагуляції може бути інтенсифікований за рахунок підвищення гідравлічної крупності коагульованих домішок при очищенні води. При цьому сітчаста структура гелю, який утворюється на поверхні завантаження, більш структурована, що дозволяє, в свою чергу, поліпшити технологічні параметри роботи контактних освітлювачів і, в кінцевому підсумку,

підвищити ефективність роботи контактних освітлювачів [4, 5].

Істотним недоліком коагулянту сульфату алюмінію є висока чутливість його до температури води, яка проявляється, що пояснюється великою гідратацією гідроксиду алюмінію, що утворюється при гідролізі при низьких температурах (1...2 °С). Зростанню гідратації при цих умовах сприяє стабілізація золю гідроксиду алюмінію, що погано коагулюється в даному випадку з іонами HCO_3^- і SO_4^{2-} навіть в концентраціях, які в кілька разів перевищують їх звичайний вміст у воді. Підвищення стійкості золю сильно впливає на швидкість утворення коагульованих домішок та їх затримання в кварцовому завантаженні контактного освітлювача.

Цим пояснюється те, що при використанні сульфату алюмінію в умовах низьких температур спостерігається уповільнення процесу очистки води, потрапляння залишкового алюмінію в очищену воду.

Зменшення гідратації контактної середовища дозволяє прискорити процес очищення води, підвищити питому вагу домішок, величина якої значно впливає на питому вагу та ущільненість.

Зі збільшенням питомої ваги пластифікаторів, при інших рівних умовах, завдяки стає більш концентрованою, осадженість та ущільненість її збільшуються. При одній і тій же швидкості руху потоку води концентрація осаду в значній мірі буде залежати від питомої ваги пластифікаторів, з яких він

складається, або, що буде більш точним, від різниці питомих ваг цих пластівців і середовища, в якому вони зависли. Чим більше ця різниця, тим більш концентрований шар осаду [6, 7].

Модифікація молекулярної структури поверхні кварцових зерен фільтруючого завантаження підвищує брудоемність та збільшує продуктивність споруд. Для модифікації фільтруючих завантажень можуть використовуватися коагулянти. Модифікація фільтруючих завантажень дозволить з мінімальними витратами збільшити продуктивність станцій водоочищення, поліпшити якість фільтрату і знизити собівартість очищення води за рахунок скорочення витрат реагентів та збільшення швидкості фільтрації. Суть методу полягає в збільшенні адгезійної здатності фільтруючого завантаження методом обробки її розчином реагенту. Процес прилипання частинок зависі зазвичай з негативним зарядом відбувається інтенсивніше по відношенню до модифікованого завантаження, ніж не модифікованого [8, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Водонасичення продуктів гідролізу коагулянтів залежить від їх складу та структури. Завдяки великому заряду та відносно малому радіусу, катіон Al^{3+} сильно гідратований. Приєднані до катіонів Al^{3+} гідроксильні групи також зв'язують велику кількість води. Особливо велику кількість води гідроксид алюмінію включає в початковий момент структуроутворення, коли на додаток до хімічної гідратації відбувається механічний захват води. У цей момент кількість води в осередках у сотні разів перевищує вміст твердої фази. За даними С. Ф. Кургаєва відношення обсягу включеної до осередків води до обсягу твердої речовини в неущільнених осадах $Al(OH)_3$ складає 12:10 [10, 11]. Зменшення гідратації гідроксиду алюмінію дозволяє збільшити вміст твердої фази утворення коагульованих домішок та їх затримання в кварцовому завантаженні контактного освітлювача.

Безпосереднє вимірювання гідратації коагульованої зависі представляє значні труднощі, так як при цьому відбувається нейтралізація і перерозподіл заряду по навколишнім молекулам води. Тому при виконанні досліджень, пов'язаних з вивченням впливу модифікованого завантаження контактних освітлювачів на ступінь дегідратації контактного середовища (гідроксида алюмінію), в якості основного критерію приймається ступінь структурно-механічної гідратації, яка враховує поряд з хімічною гідратацією і механічний захват води.

В якості фільтруючого завантаження в системах водопідготовки зазвичай використовують кварцовий пісок, керамзит та інші матеріали, які мають негативний заряд. Так як колоїдні та інші забруднення, які знаходяться у воді, що освітлюється, також негативні заряджені, то між ними і поверхнею зерен фільтруючого завантаження виникають електростатичні сили відштовхування, які перешкоджають прилипання частинок. Обробка

кварцового піску розчином коагулянту сульфату алюмінію призводить до утворення на поверхні зерен завантаження полімерної плівки та надає зернам позитивний заряд і тим самим створює умови для більш повного протікання процесів очищення води, що підтверджено науковими роботами [12, 13].

Постановка завдання та його вирішення

Мета та основні задачі. Науково-технологічне обґрунтування впливу модифікації кварцового завантаження контактних освітлювачів на ступінь структурно-механічної гідратації гідроксида алюмінію при підготовці екологічно-чистої питної води.

Обсяг дослідження. Процес очищення питної води в контактних освітлювачах за допомогою модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію.

Предмет дослідження. Закономірності процесу прояснення води в контактному освітлювачу, як одній з головних споруд для очищення природних вод з використанням модифікованого розчину реагенту.

Методи дослідження. Фізичне модулювання процесів прояснення води у контактних освітлювачах систем водопостачання. Результати експериментів обробляли згідно з рекомендаціями Міжнародного союзу чистої та прикладної хімії (IUPAC) за методами визначення та формою позначення похибок відхилення, отримуваних при масових аналітичних дослідженнях.

Виклад основного матеріалу

При проведенні досліджень була використана лабораторна установка (рис. 1), яка дозволяє виконати дослідження з інтенсифікації процесу очищення води на контактних освітлювачах [14].

Установка складається з двох моделей контактних освітлювачів, що виконані з плексигласових труб у вигляді циліндрів діаметром 50 мм і висотою 1,5 м. Прозорі стінки моделей дозволяли спостерігати за поведінкою шарів завантаження. У моделях контактних освітлювачів вода подавалася від низу до верху.

Висота завантаження контактних освітлювачів була прийнята 0,7 м. Для завантаження використовувався пісок з еквівалентним діаметром 0,9...1,1 мм; висота шару піску – 0,5 м; коефіцієнт неоднорідності завантаження 2,5. Товщина підтримуючих гравійних шарів становила 0,2 м. Швидкість фільтрування не перевищувала 0,5 м/год. Тривалість промивання 3...5 хвилин з інтенсивністю 4...6 л·с/м². Тривалість фільтроцикла становила 20 хвилин.

Дослідження виконані на модельній воді з наступними показниками: температура 10,5 °С, вміст завислих речовин 25 мг/дм³, забарвленість 75 град, РН – 7,3, лужність – 2,6 мг-екв/л [15, 16].

Вплив модифікації кварцового завантаження фільтра на ступінь структурно-механічної гідратації коагульованої зависі наведено в таблиці 1.

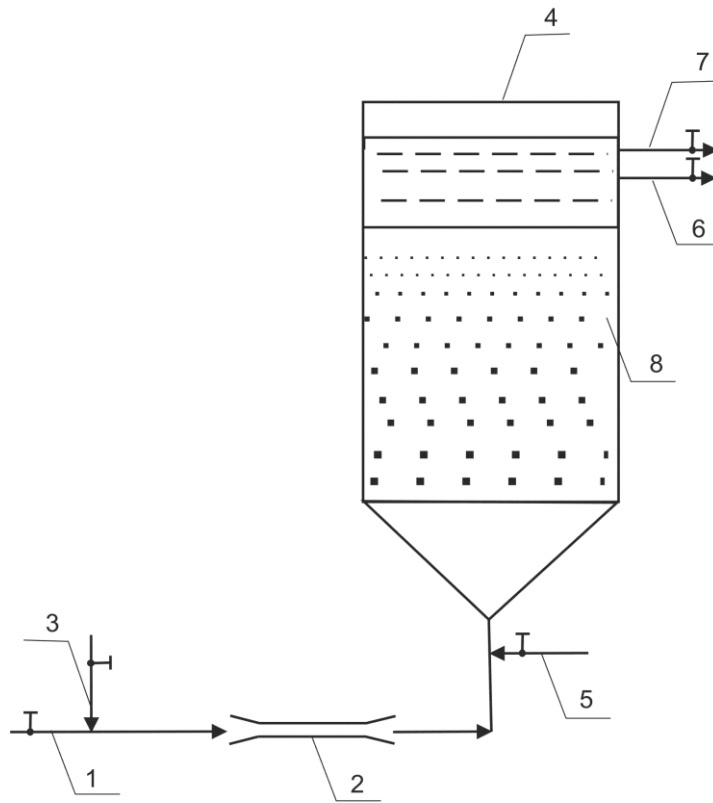


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки:

- 1 – трубопровід подачі вихідної води; 2 – шайбовий змішувач;
- 3 – трубопровід подачі розчину коагулянту сульфату алюмінію; 4 – контактний освітлювач;
- 5 – трубопровід підведення промивної води; 6 – трубопровід відведення фільтрату;
- 7 – трубопровід відведення промивної води; 8 – кварцове завантаження

Таблиця 1 – Зміна ступеня структурно-механічної гідратації коагульованих домішок при використанні модифікованого завантаження контактних освітлювачів

Час модифікації, хв	Ступінь структурно-механічної гідратації (середнє значення), г (при n = 4)		Зміна ступеня структурно-механічної гідратації, %	Величина довірчого інтервалу α (при $\gamma = 0,95, n = 4$)		Питома вага твердої речовини, г/мл		Зміна питомої ваги твердої речовини, %	Величина довірчого інтервалу, α (при $\gamma = 0,95, n = 4$)	
	Звичайне фільтрування	Фільтрування при модифікованому завантаженні		Звичайне фільтрування	Фільтрування при модифікованому завантаженні	Звичайне фільтрування	Фільтрування при модифікованому завантаженні		Звичайне фільтрування	Фільтрування при модифікованому завантаженні
1	1258	1067	17,3	$1251 < \alpha < 1264$		1,029	1,977	16,4	$1,025 < \alpha < 1,034$	
3	1254	1042	20,3		$1035 < \alpha < 1052$	1,036	1,248	20,5		$1,220 < \alpha < 1,283$
5	1257	998	25,9	$1241 < \alpha < 1283$	$995 < \alpha < 1001$	1,033	1,326	28,4	$1,021 < \alpha < 1,041$	$1,021 < \alpha < 1,414$
7	1254	999	26,5		$1001 < \alpha < 1004$	1,028	1,303	26,8		$1,254 < \alpha < 1,318$

Дослідні дані показують, що структурно-механічна гідратація та питома вага коагульованих домішок залежать від часу модифікації і досягає максимальних значень при часу модифікації 5...7 хвилин.

При модифікації кварцового завантаження питома вага твердих речовин, які утворюють каркас коагульованих домішок збільшується, що сприяє підвищенню якості фільтрату, що в кінцевому підсумку дозволяє інтенсифікувати процес очищення води на контактних освітлювачах (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив часу модифікації кварцового завантаження фільтра розчином коагулянту сульфату алюмінію на тривалість фільтроцикла

Вид реагента	Час модифікації t_m , хв	Тривалість фільтроцикла t_f , хв		Зміна тривалості фільтроцикла, %
		Звичайне фільтрування	Фільтрування при модифікованому завантаженні	
Коагулянт сульфату алюмінію	1	170	210	23,5
	3	180	220	22,2
	5	170	220	29,4
	6	170	220	29,4

Таблиця 3 – Вплив часу модифікації кварцового завантаження фільтрів на мутність і забарвленість фільтрату

Вид реагента	Час модифікації t_m , хв	Показники фільтрату					
		Мутність, мг/дм ³		Забарвленість, град ПКШ		Зміна показників фільтрату, %	
		Звичайне фільтрування	Фільтрування при модифікованому завантаженні	Звичайне фільтрування	Фільтрування при модифікованому завантаженні	Звичайне фільтрування	Фільтрування при модифікованому завантаженні
Коагулянт сульфату алюмінію	1	2,46	1,52	27	21	61,8	28,5
	3	2,09	1,35	24	19	54,8	26,3
	5	2,33	1,41	25	18	65,2	38,8
	6	2,18	1,37	26	20	59,1	30,1

При модифікації кварцового завантаження розчином коагулянту сульфату алюмінію у всьому діапазоні досліджених інтервалів часу модифікації має місце збільшення тривалості фільтроцикла: при $t_m = 1$ хв фільтроцикл збільшується на 23,5 % і становить 210 хв, при $t_m = 3$ хв збільшення тривалості фільтроцикла становить 22,2 % (220 хв); оптимальне значення t_m становить 5 хв, а t_f при модифікації завантаження збільшується на 29,4 %.

Вплив часу модифікації кварцового завантаження фільтрів на мутність і забарвленість фільтрату наведено в таблиці 3.

Аналіз результатів дослідження по модифікації кварцового завантаження дозволяє підвищити якість фільтрату, що підтверджується дослідними даними, наведеними в таблиці 3 [17].

При звичайному фільтруванні мутність фільтрату становить 2,46 мг/дм³, а при модифікації розчином коагулянту сульфату алюмінію протягом 1 хв – 1,52 мг/дм³, тобто спостерігається підвищення якості фільтрату на 61,8 %. Забарвленість фільтрату при звичайному фільтруванні становить 27 град ПКШ, а при модифікації завантаження протягом 1 хв 21 град ПКШ, тобто має місце зниження забарвленості на 28,5 %.

Висновки

1. Для покращення коагулюючих властивостей реагентів розроблений і захищений патентами

спосіб очищення води від дисперсних домішок за допомогою фільтрації вихідної води через модифіковане кварцове завантаження, що дозволяє інтенсифікувати процес освітлення води, знизити витрати реагентів в середньому на 40...50 % з отриманням води необхідної якості, при цьому собівартість освітленої води зменшується на 25...30 %.

2. На підставі дослідних даних визначено оптимальні параметри активації розчину сульфату алюмінію, при використанні якого відбувається зменшення ступеня структурно-механічної гідратації гідроксиду алюмінію контактного середовища та збільшення питомої ваги твердої речовини, що прискорює процес утворення коагульованих домішок та їх затримання в кварцовому завантаженні контактної освітлювача.

3. Встановлено, що ступінь структурно-механічної гідратації коагульованих домішок залежить від часу модифікації, що знаходить своє вираження в збільшенні питомої ваги коагульованої зависі, в наслідок чого, процес очищення води в контактних освітлювачах прискорюється: мутність і забарвленість фільтрату при використанні модифікованого завантаження зменшуються.

Необхідно продовжити дослідження модифікованого кварцового завантаження розчином коагулянту сульфату алюмінію для очищення питної води в залежності від якісних показників вихідної води.

ЛІТЕРАТУРА

1. Журба М. Г. Очистка воды на зернистых фильтрах. Львов: Вища школа, 1980. 200 с.
2. Аюкаев Р. И., Мельцер В. З. Производство и применение фильтрующих материалов для очистки воды: справ. пособие. Стройиздат, 1985. 120 с.
3. Haas C. N. Neural networks provide superior description of *Giardia lamblia* inactivation by free chlorine. *Water Research*. 2004. Vol. 38, No. 14–15. – P. 3449–3457.
4. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения: учебное пособие / Василенко А. А. и др. Киев, Одесса: КНУСА, ОГАСА, 2007. 307 с.
5. Epuration des eaux avec des filters composes des billes de polystyrene expanse / Orlov V., Martynov S., Meddour M., Kunitsky S. *Revue semestrielle internationale scientifique et technique*. Ecole nationale superieur d'hydraulique. 2013 – Algeria. P. 68–78.
6. Минц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды. Стройиздат, 1964. 155 с.
7. Minz D. M. Aids to coagulation. *International Water Supply Congress Stockholm General Report*. 1964. No. 5. P. 256–286.
8. Спосіб очистки природних і стічних вод: пат. 118596 Україна: МПК C02F 1/00, C02F 1/48 (2006.01). № u201702868; заявл. 27.03.2017; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15.
9. Спосіб модифікації фільтруючого завантаження для освітлення природних і стічних вод: пат. 45258 А Україна: МПК C02F 1/52 (2006.01), C02F 1/48 (2006.01). № 2001074832; заявл. 10.07.2001; опубл. 15.03.2002, Бюл. № 3.
10. Повышение эффективности работы скорых фильтров с применением модификации кварцевой загрузки раствором флокулянта ПАА / Душкин С. С. и др. *Виробничо-практичний журнал «Водопостачання та водовідведення»*. 2018. № 1. С. 17–19.
11. Кургаев Е. Ф. Осветлители воды. Стройиздат, 1977. 192 с.
12. Вейцер Ю. И., Колобова З. А., Сафонова Г. М. Влияние знака электрического заряда загрузки и взвешенных веществ на процесс фильтрования. *Научн. труды АКХ им. К. Д. Памфилова*. 1974. С. 32–42.
13. Бабенков С. Д. Очистка воды коагулянтами. Наука, 1977. 356 с.
14. Dushkin S., Martynov S., Dushkin S. Intensification of work of contact clarifiers during the drinking water preparation. *Journal of Water and Development*. 2019. Vol. 41 (IV-VI). P. 55–60. DOI: 10.2478/jwld-2019-0027.
15. Душкин С. С. Модификация кварцевой загрузки скорых фильтров. *Збірка доповідей ЕТЕБК-2019 «Міжнародний конгрес та технічна виставка»*. Київ: ДП «НДКТИ МГ», 2019. С. 118–123.
16. Душкин С. С. Підвищення екологічної безпеки при підготовці питної води з використанням модифікованого кварцового завантаження фільтруючих матеріалів. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. 2019. Вип. 6(2/2019). С. 54–59. DOI: 10.5281/zenodo.3559024.
17. Володченко О. В. Анализ методов интенсификации работы очистных сооружений. *Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб.* 2002. Вып. 36. С. 267–271.

Dushkin S.**MODIFICATION OF THE QUARTZ LOADING CONTACT CLARIFIERS IN WATER TREATMENT PROCESSES**

In the article the influence of modification of the quartz loading contact clarifiers on the degree of structural and mechanical hydration of aluminum hydroxide in water treatment processes are considered.

Modification of the molecular structure of the surface of quartz grains of the filter charge increases the dirt capacity and increases the performance of structures. For the modification of filter materials can be used coagulants. Modification of filter materials allows to increase the performance of station of water treatment plants with minimal cost, to improve the quality of filtrate and reduce the cost of water treatment by reducing the consumption of reagents and increase the speed of filtration. The essence of the method is to increase the adhesion of the filter materials by the method of processing it with a solution of the reagent. The process of adhesion of suspended particles, as a rule, with a negative charge is more intense in relation to the modified loading than the unmodified.

It is established that the use of modified quartz loading allows to reduce the degree of structural and mechanical hydration of aluminum hydroxide, to increase the proportion of coagulated impurities, which ultimately allows to intensify water purification processes, namely to reduce reagent costs by an average of 40...50 % with water required quality, while the cost of clarified water is reduced by 25...30 %.

Key words: modification of quartz loading, contact clarifier, structural and mechanical hydration, specific gravity, intensification of water treatment processes.

REFERENCES

1. Zhurba, M. G. (1980). *Ochistka vody na zernistykh fil'trah* [Water treatment on granular filters]. Lviv: Vyscha shkola, 200. [in Russian].
2. Ayukaev, R. I., & Meltzer, V. Z. (1985). *Proizvodstvo i primeneniye fil'truyushchih materialov dlja ochistki vody: sprav. posobie* [Production and use of filter materials for water treatment: ref. allowance]. Stroyizdat, 120. [in Russian].
3. Haas, C. N. (2004). Neural networks provide superior description of *Giardia lamblia* inactivation by free chlorine. *Water Research*, 38(14–15), 3449–3457.
4. Vasilenko, A. A., Grabovsky, P. A. Larkina, G. M., Polishchuk, A. V., & Progulny, V. I. (2007). *Rekonstrukcija i intensifikacija sooruzhenij vodosnabzhenija i vodootvedenija: uchebnoe posobie* [Reconstruction and intensification of water supply and sanitation facilities]. Kiev, Odessa: KNUSA, OGASA, 307. [in Russian].
5. Orlov, V., Martynov, S., Meddour, M., & Kunitsky, S. (2013). Epuration des eaux avec des filters composes des billes de polystyrene expanse. *Revue semestrielle internationale scientifique et technique*, 22, Ecole nationale superieur d'hydraulique, Algeria, 68–78.
6. Mints, D. M. (1964). *Teoreticheskie osnovy tehnologii ochistki vody* [Theoretical basis of water treatment technology]. Stroyizdat, 155. [in Russian].
7. Mints, D. M. (1964). Aids to coagulation. *International Water Supply Congress Stockholm General Report*, 64(5), 256–286.
8. *Sposib ochystky pryrodnyh i stichnyh vod* [Method of natural and wastewater treatment] (UA Patent 118596). (10.08.2017). UA Patent. [in Ukrainian].

9. Sposib modyfikacii' fil'trujuchoho zavantazhenja dlja osvitlennja pryrodnyh i stichnyh vod [Method of modifying filter loading for clarification of natural and sewage] (UA Patent 45258). (15.03.2002). UA Patent. [in Ukrainian].
10. Dushkin, S. S., Blagodarnaya, G. I., Dushkin, S. S., Degtjar', M. V., & Shevchenko, T. A. (2018). Povyshenie jeffektivnosti raboty skoryh fil'trov s primeneniem modifikacii kvarcevoj zagruzki rastvorom flokuljanta PAA [Improving the efficiency of fast filters using a modification of quartz loading with PAA flocculate solution]. *Vyrobnycho-praktychnyj zhurnal "Vodopostachannja ta vodovidvedennja"*, 1, 17–19. [in Russian].
11. Kurgaev, E. F. (1977). *Osvetliteli vody* [Water clarifiers]. Stroyizdat, 192. [in Russian].
12. Weitzer, Yu., Kolobova, Z., & Safonov, G. (1974). Vlijanie znaka jelektricheskogo zarjada zagruzki i vzheshennyh veshhestv na process fil'trovaniija. [Influence of the sign of the electric charge of the charge and suspended substances on the filtering process]. *Nauchn. trudy AKH im. K. D. Pamfilova*, 32–42. [in Russian].
13. Babenkov, S. D. (1977). *Ochistka vody koagulantami* [Water treatment by coagulants]. Nauka, 356. [in Russian].
14. Dushkin, S., Martynov, S., Dushkin, S. (2019). Intensification of work of contact clarifiers during the drinking water preparation. *Journal of Water and Development*, 41(IV-VI), 55–60. DOI: 10.2478/jwld-2019-0027.
15. Dushkin, S. S. (2019). Modifikacija kvarcevoj zagruzki skoryh fil'trov [Modification of quartz loading of fast filters]. *Zbirka dopovidey ETEVK-2019 "International Congress and Technical Exhibition"*, Kyiv: DP "NDKTI MG", 118–123. [in Russian].
16. Dushkin, S. (2019). *Pidvyshhennja ekologichnoi' bezpeky pry pidgotovci pymoi' vody z vykorystannjam modyfikovanogo kvarcovogo zavantazhenja fil'trujuchoho materialiv* [Increase of environmental safety in the preparation of drinking water using a modified quartz loading of filter materials]. *Technogenic and ecological safety*, 6(2/2019), 54–59. DOI: 10.5281/zenodo.3559024. [in Ukrainian].
17. Volodchenko, O. V. (2002). Analiz metodov intensifikacii raboty ochistnyh sooruzhenij [Analysis of methods for intensification of treatment facilities]. *Municipal economy of cities*, 36, 267–271. [in Russian].