

Щодо практичного та економічного обґрунтування вибору методу знезараження питної води та стоків

Науково-практичний журнал «Водопостачання, водовідведення» №6, 2017, С. 30- 36

к.т.н. Т.С. Шаляпіна (ТОВ «ХАРКІВСЬКА ІНЖЕНЕРНА КОМПАНІЯ»),
к.т.н. І.Ю. Штонда (Ужгородський національний університет)

Анотація. Проведено порівняльний техніко-економічний аналіз різних методів знезараження води та очищених стоків за допомогою хлору, гіпохлориту натрію, озону та ультрафіолетового опромінювання. Зроблені висновки стосовно оптимального вибору методу знезараження води. Показано, що найбільш безпечним та економічно обґрунтованим є метод знезараження води за допомогою УФ опромінювання. Виявлено, що собівартість знезараження води методом УФ опромінення у 1,7 разів менше собівартості її знезараження за допомогою хлору, у 7,4 разів менше собівартості її знезараження за допомогою гіпохлориту натрію та у 7 разів менше собівартості її знезараження за допомогою озону.

Згідно європейських стандартів стічні води поділяються на п'ять класів небезпеки. До першого та найменш небезпечного типу відносяться стічні води, у яких відсутні шкідливі для здоров'я токсичні речовини, що надають воді неприємні присмаки і запахи. До другого типу відносяться стічні води, які мають неприємні присмаки, запах і забарвлення. До третього – ті, що містять досить невелику кількість шкідливих речовин. До четвертого типу відносяться стічні води, які містять отруйні, канцерогенні або радіоактивні речовини. І нарешті до п'ятого і особливо небезпечного типу відносяться стічні води, що містять велику кількість збудників інфекційних захворювань.

Практично всі стічні води містять збудників таких небезпечних захворювань як холера, дизентерія, тиф, сальмонельоз, вірусний гепатит, поліомієліт, ентеровірусні та аденовірусні інфекції, лямбліоз, лептоспіроз, бруцельоз, туберкульоз, гельмінтози та інші. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, понад двох третин населення земної кулі мали інфекційні захворювання, які були зумовлені забрудненням водою, у тому числі і стічними водами.

Мікробіологічна якість стічних вод регламентується наступними показниками [1]:

- вода не повинна містити збудників інфекційних захворювань;
- колі - індекс у стічних водах не повинен перевищувати 1000 КУО/дм³;
- вміст коліфагів не повинен перевищувати 1000 БУО/дм³;
- вода не повинна містити життєздатних яєць гельмінтів, онкосфери тенеїд і життєздатних цист патогенних кишкових найпростіших.

Враховуючи велику епідеміологічну небезпеку, очисні споруди, на яких відбувається очищення стічних вод, в обов'язковому порядку повинні мати спеціальне обладнання для знезараження очищеної стічної води.

На сьогоднішній день в практиці очищення питної води та стоків застосовуються три основних метода знезараження: хлорування, озонування та знезараження за допомогою ультрафіолетового (УФ) випромінювання.

Методи хлорування та озонування відносяться до хімічних методів знезараження, дія яких базується на руйнуванні оболонки клітини мікроорганізмів під дією окиснювальних процесів. Процес знезараження в середньому триває 30 - 45 хвилин, що потребує наявності відповідних контактних камер, або достатньої довжини колектору, в якому проходить процес знезараження. Метод УФ знезараження відноситься до фізичних методів. Знезараження води та стоків відбувається в результаті миттєвого пошкодження клітин мікроорганізмів короткохвильовим ультрафіолетовим випромінюванням. Знезараження води відбувається на протязі кількох секунд, що дозволяє використовувати цей метод без застосування реакційних камер або контактних резервуарів та колекторів. Крім того при знезараженні води методом ультрафіолетового опромінювання (на відміну від хімічних методів знезараження) відбувається ефективно знищення таких шкідливих вірусів як гепатит, поліомієліт, ентеровіруси, аденовіруси тощо [1 - 2].

Відразу слід зауважити, що не залежно від вибраного методу знезараження на ефективність знезараження впливають такі чинні показники як:

- загальний вміст у воді органічних речовин;
- концентрації завислих речовин,
- початкова концентрації бактерій і вірусів;
- температура і водневий (для хімічних методів знезараження) показник води, що знезаражується;
- кількість реагентів, що потрапляють у воду, або кількість енергії УФ випромінювання, яка поглинута мікроорганізмами (величина дози УФ випромінювання), тощо.

Огляд основних методів знезараження

Серед хімічних методів знезараження найбільш поширеною в даний час є технологія хлорування. Широке впровадження цієї технології обумовлено насамперед її відносною простотою та невеликими експлуатаційними витратами. Для знезараження питної води та стоків найчастіше використовують газоподібний хлор Cl_2 , гіпохлорит натрію $NaClO$ або діоксид хлору ClO_2 . Широке використання газоподібного хлору та гіпохлориту натрію обумовлено їх доступністю та невеликою ціною. Знезараження води за допомогою хлору або гіпохлориту натрію забезпечує достатньо високу бактерицидну ефективність та низькі експлуатаційні витрати. Однак їх використання має недостатньо високу ефективність відносно вірусів та найпростіших мікроорганізмів, які присутні у воді або стоках. Більш високу ефективність відносно вірусів має діоксид хлору ClO_2 . При обробці води діоксидом хлору відсоток життєздатних клітин бактерій та вірусів значно менше, ніж при застосуванні хлору в тій же концентрації та протягом такого ж часу контакту. Однак збільшення забрудненості води органічними сполуками та завислими речовинами суттєво зменшує знезаражуючу дію хлору та його похідних, що призводить до необхідності значного (у декілька разів) підвищення доз реагенту. Крім того застосування технології знезараження води за допомогою хлору та реагентів, що містять хлор, потребує впровадження досить ефективних заходів безпеки, що призводить до зростання собівартості знезараження. До того ж, діоксид хлору має підвищену вибухонебезпечність і є достатньо дорогим реагентом.

Незважаючи на високу ефективність знезараження відносно патогенних бактерій, хлорування (при дозі залишкового хлору $1,5 \text{ мг/дм}^3$) не забезпечує необхідної санітарно - епідемічної безпеки щодо присутніх у стічних водах вірусів, цист найпростіших, лямблій та стійких до дії хлору форм мікроорганізмів, що призводить до мікробіологічного забруднення міських систем водовідведення. Негативною властивістю хлорування є утворення небезпечних хлорорганічних речовин таких, як: тригалогенметани, хлорфеноли, хлораміни, різні діоксиди, які мають високу токсичність, мутагенність та канцерогенність. Ці хлорорганічні речовини характеризуються підвищеною стійкістю до біологічного окислювання і не піддаються видаленню при біологічній очистці на очисних спорудах. Потрапляючи у питну воду хлорорганічні речовини приводять до отруєння організму людини, тварин, гідробіонтів та рослин сильнодіючими токсичними речовинами, що приводить до їх загибелі. Так, *потрапляючи до організму людини, хлорорганічні речовини шкідливо впливають на діяльність серцево-судинної та нервової системи, визиваючи різкий зріст серцево-судинних та онкологічних захворювань.*

В останні роки піднімається питання про необхідність зменшення використання хлору у технологіях очищення питної води та повної відмови від хлорування стічних вод при їх очищенні. Так, згідно діючих нормативних документах [1 - 2] щодо організації державного санітарно – епідеміологічного нагляду за знезараженням стічних вод, кількість залишкового хлору у стічних водах, які скидаються у водойми, не повинна перевищувати $1,5 \text{ мг/дм}^3$. Але навіть така невелика кількість залишкового хлору виявляється дуже токсичною для флори і фауни водоймищ і призводить до практично повного припинення процесів самоочищення цих водоймищ. Занепокоєння, викликане підвищеною токсичністю слідів залишкового хлору і хлорамінів, диктує необхідність зниження залишкової концентрації хлору до $0,1 \text{ мг/дм}^3$.

Як вже згадувалося, наряду з хлоруванням для знезараження води та стоків також використовується метод озонування. При порівнянні з методом знезараження води за допомогою хлору озон має більш сильну бактерицидну, віруліцидну та спороцидну дію. Він ефективно руйнує оболонки клітин бактерій, вірусів, спор, плісняви, що призводить до їх загибелі. Завдяки високому окислювальному потенціалу озон вступає у взаємодію з багатьма органічними речовинами і забезпечує їх трансформацію до мінеральних сполук. Однак застосування озону для знезараження води має свої особливості. Так, наприклад, при взаємодії озону з органічними речовинами, які знаходяться у воді, у знезараженій воді можуть утворюватися токсичні речовини. У зв'язку з чим знезараження стічних вод озоном доцільно застосовувати після її попереднього очищення, яке забезпечує зниження вмісту завислих речовин до $3 - 5 \text{ мг/дм}^3$ і БПК до 10 мг/дм^3 .



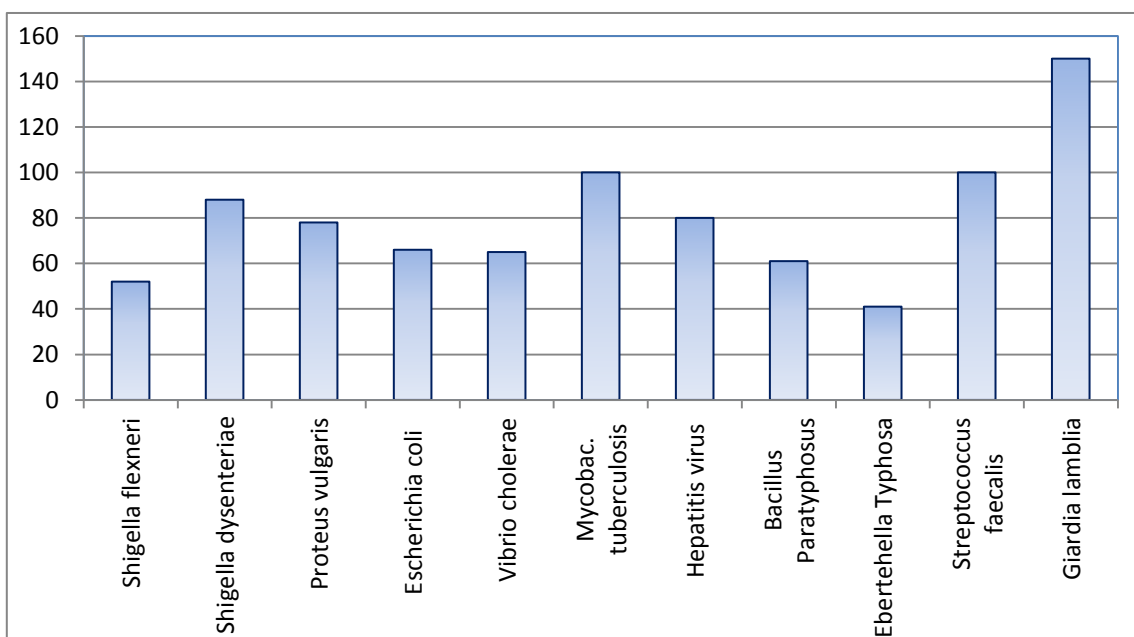
Малюнок 1. Установа УФ знезараження води ВДОГРАЙ В24АС продуктивністю $500 \text{ м}^3/\text{годину}$

Принципові труднощі при знезараженні стічних вод озоном пов'язані з відносно великими витратами електричної енергії, яка необхідна для отримання озону,

особливістю роботи озонаторів, низькою розчинністю озону у теплій воді, токсичністю озону та можливістю утворення шкідливих побічних продуктів. Як вже зазначалось, знезараження стічних вод за допомогою озону потребує досить великих витрат електроенергії, питомі витрати якої складають від 27 – 35 кВт·год на 1 кг озону, який отримано з осушеного повітря до 43 – 57 кВт·год на 1 кг озону, який отримано з не осушеного повітря. Що призводить до досить високих експлуатаційних витрат.

Знезараження питних або очищених стічних вод озоном на заключному етапі потребує значно менших витрат озону і відповідно електроенергії, що дозволяє одержати більш високу ступінь їх очищення.

Одним з найбільш ефективних та дієвих заходів, який призводить до знезараження питної води та стоків та не сприяє утворенню у знезараженій воді небезпечних токсичних речовин, виявився метод знезараження води за допомогою ультрафіолетового опромінення. УФ випромінювання є згубним для більшості мікроорганізмів таких як: дизентерія, холера, тиф, туберкульоз, вірусний гепатит, поліомієліт та інші. УФ знезараження води здійснюється за рахунок прямої дії ультрафіолетових променів на клітинну та молекулярну структуру мікроорганізмів, що призводить до їх миттєвої загибелі. *Знезараження води за допомогою УФ променів здійснюється без внесення в воду будь – яких хімічних речовин. Єдиною умовою застосування метода УФ знезараження є правильно вибрана мінімальна доза УФ опромінення, тобто кількість ультрафіолетової енергії, яка необхідна для знищення мікроорганізмів, що знаходяться у воді. Згідно діючих нормативних документів для знезараження чистої води питної якості значення мінімальної дози УФ опромінення становить 160 Дж/м² (16 мДж/см²), для очищених стоків – 300 Дж/м² (30 мДж/см²). При наявності у воді вірусів значення знезаражувачої дози УФ опромінювання повинна бути не меншою ніж 400 Дж/м² (40 мДж/см²) [1]. Слід зауважити, що цим умовам повністю відповідають установки УФ знезараження води, які виробляються в Україні під торгівельною маркою ВОДОГРАЙ [3, 6 - 9].*

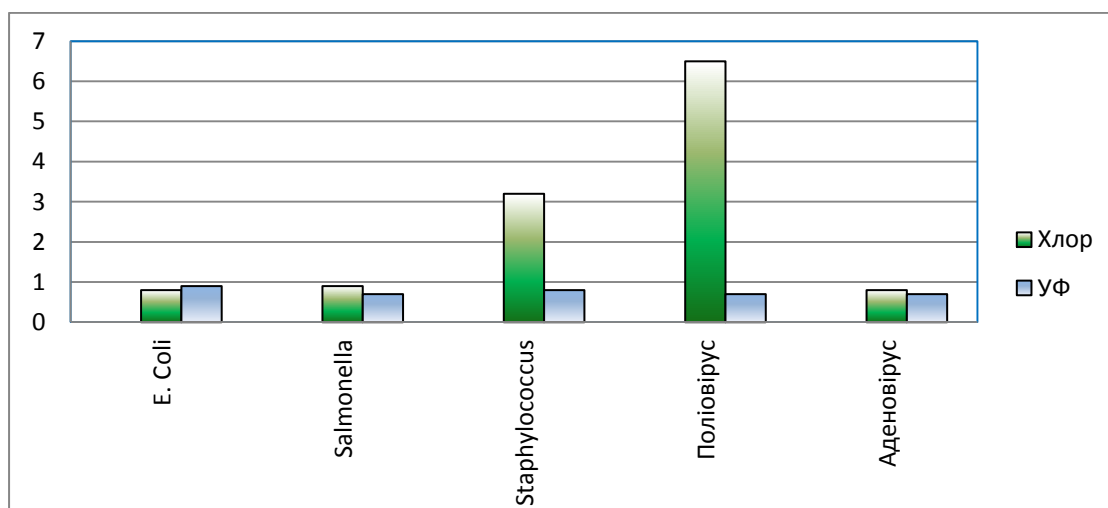


Малюнок 2. Чутливість деяких мікроорганізмів до дії УФ променів в залежності від дози УФ опромінювання. Ефективність знезараження 99,9% [1].

Завдяки високій ефективності знезараження та своїй простоті технологія УФ знезараження води отримує все більшу популярність. Так тільки в Україні більше 500 муніципалітетів використовують ультрафіолетове опромінення для знезараження питних та стічних вод. Найбільша в Україні станція УФ знезараження стічних вод, продуктивністю більше 50 тис. м³/добу, розташована в м. Кривий Ріг (УФ установка ВОДОГРАЙ 22В8КС). Поява потужних та енергозберігаючих джерел УФ - випромінювання з досить великим ресурсом (понад 16 000 годин) та нові конструктивні рішення УФ установок зробили цей метод конкурентоспроможним, в порівнянні з хімічними методами знезараження, особливо, при врахуванні підвищення стійкості мікрофлори до впливу на неї хлору, озону та ультрафіолету [3, 6 - 9].

За останні 15 - 20 років стійкість патогенної мікрофлори до впливу на неї хлору підвищилася в 5 - 6 разів, до озону в 2 - 3 рази, до ультрафіолету в 2 - 4 рази. Це означає, що з урахуванням подальшого підвищення стійкості мікроорганізмів до знезаражуючих факторів, при проектуванні очисних споруд, необхідно закладати підвищені дози хлору або озону, що безумовно приведе до подальшого забруднення водоймищ токсичними продуктами хлорування або озонування. На щастя, підвищення дози ультрафіолетового опромінювання з 200 – 300 Дж/м² до 400 – 1000 Дж/м² в силу своєї природи не призводить до негативного впливу на навколишнє середовище.

Досвід застосування УФ опромінювання для знезараження зливових та господарчих і побутових стічних вод, які скидаються у відкриті водоймища, річки та море, на відміну від хімічних методів знезараження, в найбільш повній мірі відповідає вимогам з охорони навколишнього середовища [2, 4].



Малюнок 3. Відносні дози хлору та УФ опромінювання, які необхідні для знезараження питних або стічних вод [5].

Подальший розвиток технологій знезараження питних та стічних вод сприяв появі ще одного методу знезараження – так званого комбінованого методу або технології активного окислювання (**Advanced Oxidation Process**). Суть цього методу полягає у спільній обробці води ультрафіолетовим випромінюванням та окиснювачів таких як озон або пероксид водню. Застосування такої обробки води дозволяє не тільки забезпечити високу ефективність знищення бактерій і вірусів, які знаходяться у воді, але і виключити забруднення води токсичними

хлорорганічними сполуками. Крім того застосування комбінації ультрафіолетового випромінювання з озоном або пероксидом водню забезпечує зниження кольоровості води, деструкцію органічних забруднювачів, що знаходяться у воді, а також забезпечує ефективне знищення грибів, плісняви і водоростей, які розмножуються у воді.

Економічні особливості застосування різних методів знезараження

Ефективність дії того чи іншого методу знезараження залежать від багатьох факторів, у тому числі від початкової концентрації завислих речовин, початкової кількості бактерій, вірусів і найпростіших мікроорганізмів, що знаходяться у воді, а також від інших її показників. На якість знезараження стічної води впливає кількість знезаражуючих реагентів, які додаються у воду, або величина дози ультрафіолетового опромінювання. Всі ці фактори впливають на економічні показники процесу знезараження.

Оцінку собівартості процесу розглянемо на прикладі УФ знезараження стічних вод, як найменш енерговитратного процесу. Для цього проведемо оцінку питомих витрат, які необхідно понести для здійснення знезараження 1 м³ стоків. Ці витрати складаються з вартості хлору або гіпохлориту натрію, вартості їх транспортування до очисних споруд та експлуатаційних витрат, які в свою чергу складаються з витрат на заробітну плату обслуговуючого персоналу, витрат пов'язаних з виконанням заходів безпечної експлуатації хлораторного обладнання та ін. Згідно нормативів витрати хлору для знезараження 1 м³ стічних вод складають від 5 до 10 г активного хлору. Тобто питомі витрати активного хлору для знезараження 1 м³ стоків складають від 5 до 10 г/м³.

Для подальших розрахунків приймемо дозу хлору рівною 5 г/м³. Враховуючи, що ціна 1 тони хлору складає 700 USD, а гіпохлориту натрію - 400 USD (при масовому вмісту активного хлору 12%), вартість хлору, який необхідно витратити для знезараження 1000 м³ стоків складе 3,5 USD. Кількість гіпохлориту натрію, який необхідно витрати для знезараження 1 м³ стічних вод (при середньому масовому вмісту активного хлору 12%), буде в 8,33 рази більше, ніж хлору. Тобто для знезараження 1000 м³ стічних вод за допомогою гіпохлориту натрію необхідно витратити 41,6 кг цього реагенту. При цьому вартість гіпохлориту натрію, який необхідно витратити для знезараження 1000 м³ стічних вод складе 16,7 USD. Оцінюючи вартість експлуатаційних витрат, які пов'язані з процесом знезараження стічних вод за допомогою хлору у 20%, а гіпохлориту натрію у 10%, від вартості реагентів (в основному експлуатаційні витрати пов'язані з транспортуванням та зберіганням небезпечного хлору), з достатньою вірогідністю можна оцінити собівартість самого процесу знезараження 1000 м³ стоків, яка складе: для технологічного процесу з використанням хлору – **4,2 USD**; для технологічного процесу з використанням гіпохлориту натрію – **18,4 USD**.

Аналогічно можна оцінити собівартість знезараження стічних вод за допомогою озону. Враховуючи, що витрати озону для знезараження стічних вод складають від 6 до 10 мгО₃/дм³, та те, що для отримання 1 кг озону необхідно витратити від 27 до 57 кВт·годину, можна оцінити собівартість процесу знезараження стічних вод озоном.

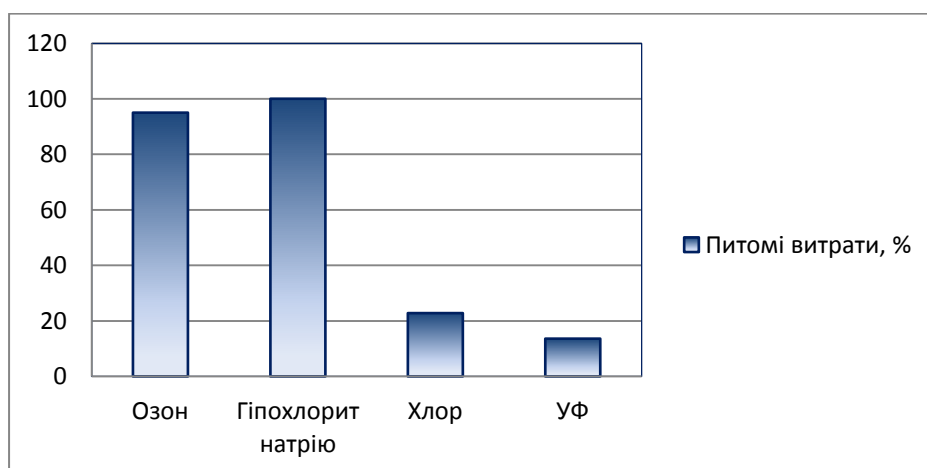
Для подальших розрахунків приймемо дозу озону рівною 6 гО₃/м³. Приймемо, що витрати електроенергії для здійснення процесу знезараження 1000 м³ стічних вод складають 6 кгО₃ · 27 кВт·годину = 162 кВт·годин стічних вод. При вартості електроенергії, яка дорівнює

0,09 USD/кВт-годину, вартість електроенергії, яка необхідна для знезараження 1000 м³ стічних вод, складе 14,6 USD. Оцінюючи витрати, які пов'язані з експлуатацією озонаторів у 20% від вартості витраченої електроенергії, можна приблизно оцінити собівартість знезараження 1000 м³ стічних вод за допомогою озону. Ця собівартість складе **17,5 USD**.

Тобто, собівартість знезараження стоків за допомогою озону буде у 4 рази більшою, ніж при використанні хлору, та приблизно така, як при використанні гіпохлориту натрію.

При знезараженні стічних вод за допомогою ультрафіолетового опромінювання основними чинниками, які впливають на собівартість процесу знезараження, є питомі витрати електроенергії, ресурс УФ ламп, їх вартість та витрати, які пов'язані з безпосередньою експлуатацією УФ обладнання. Враховуючи що питомі витрати для знезараження 1000 м³ попередньо очищених стоків складають 20 кВт, вартість витраченої для знезараження 1000 м³ стічних вод електроенергії складе 1,8 USD. Враховуючи ціни на УФ лампи, їх ресурс (9 000 - 16 000 годин) та середню питому продуктивність УФ ламп, яка при знезараженні очищених стічних вод складає 0,05 м³/(Вт-годину), стає можливим оцінити питому вартість УФ ламп, яка становить 0,5 USD у розрахунку на 1000 м³ знезараженої води. Також враховуючи те, що сучасні УФ установки практично не потребують обслуговування, експлуатаційними витратами на їх технічне обслуговування можна прийняти рівними 10%. Підраховуючи питомі витрати, які пов'язані з витратами на електроенергію та закупівлю УФ ламп, можна зробити висновок, що питомі витрати на УФ знезараження 1000 м³ попередньо очищених стічних вод складають **2,5 USD**. Що у 1,7 разів менше питомих витрат знезараження очищених стічних вод за допомогою хлору, у 7,4 разів менше питомих витрат знезараження очищених стічних вод за допомогою гіпохлориту натрію та у 7 разів менше питомих витрат знезараження очищених стічних вод за допомогою озону.

Враховуючи екологічні, експлуатаційні та економічні аспекти знезараження стічних вод різними методами можна зробити висновки о перспективності застосуванні методу знезараження стічних вод за допомогою ультрафіолетового опромінювання.



Малюнок 4. Питомі витрати на знезараження води

Висновки

УФ опромінювання, на відміну від хімічних методів знезараження (хлорування та озонування) не змінює хімічного складу води і не оказує шкідливого впливу на навколишнє природне середовище, що в повній мірі забезпечує зберігання флори і фауни водойм, у які скидаються очищені та знезаражені стічні води. Численні дослідження показали відсутність шкідливих ефектів навіть при дозах УФ опромінювання, які набагато перевищують практично необхідні для знезараження.

Особливо актуальним стає застосування комбінованих методів знезараження, які ґрунтуються на спільній дії ультрафіолетового випромінювання та окиснювачів (технологія **Advanced Oxidation Process**). Застосування комбінованих методів знезараження дозволяє не тільки забезпечити високу ефективність знищення бактерій і вірусів, які знаходяться у стічній воді, але і виключити її забруднення токсичними сполуками. При цьому забезпечується деструкція органічних забруднювачів, а також ефективне знищення грибів, плісняви і водоростей, які розмножуються у воді.

Технологія знезараження води УФ випромінюванням є найбільш простою як у реалізації, так і при обслуговуванні УФ обладнання. Застосування методу УФ знезараження стічних вод повністю виключає забруднення навколишнього середовища, поверхневих та підземних вод хлором та хлорорганічними сполуками. При використанні цієї технології не вимагається будівництва спеціальних контактних резервуарів. Крім того застосування УФ - опромінювання для знезараження зливових, та господарчих і побутових стічних вод, які скидаються у відкриті водойма, річки та море в найбільш повній мірі відповідає сучасним вимогам з охорони навколишнього середовища.

Експлуатація знезаражуючих УФ установок значно простіша ніж станцій, призначених для знезараження стоків хлоруванням або озонуванням і не пов'язана з використанням високотоксичних отруйних речовин, які негативно впливають на здоров'я обслуговуючого персоналу. При цьому повністю виключається можливість виникнення аварійних ситуацій, які пов'язані з витоком хлору. Це дозволяє розміщувати станції УФ знезараження поруч з житловим сектором або зонами відпочинку.

Собівартість УФ знезараження стічної води складає близько 2,5 USD за 1000 м³ стоків, що:

- у 1,7 разів менше питомих витрат на її знезараження за допомогою хлору;
- у 7,4 разів менше питомих витрат на її знезараження за допомогою гіпохлориту натрію;
- у 7 разів менше питомих витрат на її знезараження за допомогою озону.

Собівартість УФ знезараження питної води приблизно у 3 - 4 рази нижче ніж собівартість знезараження очищених стоків.

Література.

1. Методические указания МУК 4.3.2030-05. Санитарно-вирусологический контроль эффективности обеззараживания питьевых и сточных вод УФ-облучением (утв. Глав. сан. врачом РФ 18.11.2005).
2. Методические указания МУ 2.1.5.800 – 99: Организация госсанэпиднадзора за обеззараживанием сточных вод. - Минздрав России, Москва-2000.
3. А.І. Гончаренко, О.А. Колесніченко, С.М. Шаляпін. //Водопостачання та водовідведення. – 2012. - № 6 - С. 28 – 35.
4. Санитарные правила и нормы охраны прибрежных вод морей от загрязнения в местах водопользования населения: СанПиН 4631 - 88. - М., 1988.
5. Н.А. Романенко, Г.И. Новосильцев. А.Е. Недачин и др. УФ-излучения и его воздействия на вирусы и цисты простейших. //Водоснабжение и санитарная техника. - 2001. - N12. - С. 5-8/
6. С. М. Шаляпін. Перспективність застосування УФ опромінення для знезараження питної води на об'єктах комунального господарства. //Водопостачання та водовідведення - 2013. - №1 - С. 22 – 26.
7. С.Н. Шаляпин, Т.С. Шаляпина. Об особенностях выбора УФ установок, предназначенных для обеззараживания сточных вод и пути снижения их энергоёмкости. //Водопостачання і водовідведення - 2014. - №1 - С. 36 – 42.
8. С.М. Шаляпін, Т.С. Шаляпіна. Знезараження стічних вод за допомогою ультрафіолетового опромінювання. Частина 1//Водопостачання і водовідведення - 2016. - №5 - С. 58 – 62.
9. С.М. Шаляпін, Т.С. Шаляпіна. Знезараження стічних вод за допомогою ультрафіолетового опромінювання. Частина 2//Водопостачання і водовідведення - 2016. - №6 - С. 42 – 48.