



Застосування УФ випромінювання для знезараження стічних вод

Виробничо – практичний журнал «Водопостачання та водовідведення» - №6/12 – 2012 - С.28 – 35

А.І. Гончаренко, директор КП «Кривбасводоканал»

О.А. Колесніченко, головний технолог КП «Кривбасводоканал»

С.М. Шаляпін, член – кор. Інженерної Академії України, директор Харківської електротехнічної компанії, ТзОВ

На сьогоднішній день основним джерелом водопостачання в Україні є великі і маленькі ріки. Понад 70% населення України отримує питну воду з поверхневих джерел. Але ж ці самі річки є і загальним колектором для збору стічних вод, від якості очищення та знезараження яких залежить якість води, яку ми споживаємо кожен день. Для знезараження наперед очищених стічних вод, як правило, широко застосовується хлор, або його сполуки. Безперечно, хлорування води забезпечує достатній рівень знезараження, але при цьому хлор є дуже токсичною речовиною, яка приводить до забруднення води стійкими хлорорганічними сполуками. Попадаючи у питну воду хлорорганічні сполуки приводять до отруєння організму людини і виникненню хронічних захворювань серцево – судинної та ендокринної системи, розвитку онкологічних захворювань та ін.

Тому у середині ХХ сторіччя почався інтенсивний пошук альтернативних способів знезараження води. Одним з найбільш ефективних та дієвих заходів, які приводять до знезараження води та не сприяють утворенню у знезараженій воді небезпечних хлорорганічних сполук, виявився метод знезараження води за допомогою ультрафіолетового (УФ) опромінення. УФ опромінення є дієвим засобом знезараження, який нам подарувала сама Природа. УФ промені є часткою сонячного спектра і по своїй природі ні в якому разі не можуть оказувати негативного впливу на воду, яка знезаражується за їх допомогою.

УФ випромінювання виявляється згубним для більшості мікроорганізмів, які присутні у воді. Особливо небезпечними УФ промені виявляються для бактерій і вірусів, які збуджують такі небезпечні захворювання, як дизентерія, холера, тиф, туберкульоз, вірусний гепатит, поліомієліт та інші. Слід зауважити, що хлорування води, на відміну від УФ знезараження, далеко не завжди є надійним бар'єром для розповсюдження вірусних захворювань. УФ знезараження води здійснюється за рахунок прямої дії ультрафіолетових променів на клітинну та молекулярну структуру мікроорганізмів, визиваючи їх загибель. Знезараження стічної води за допомогою УФ променів здійснюється без внесення в воду

будь – яких шкідливих хімічних сполук. Єдиною умовою застосування метода УФ знезараження є правильно вибрана доза УФ опромінення, тобто кількість ультрафіолетової енергії, яка необхідна для знищення мікроорганізмів, що знаходяться у воді.

Вплив прозорості стічної води на ефективність її знезараження

Для забезпечення високої ефективності знезараження доза УФ опромінення повинна бути вибрана з урахуванням прозорості води, тобто з врахуванням ступеня її попереднього очищення. На прозорість води значно впливає наявність у воді звислих речовин та присутність у воді органічних сполук (фенол, нафтопродукти та ін.).

На рис. 1 приведена узагальнена залежність коефіцієнту поглинання ультрафіолетового випромінювання α в залежності від наявності у воді звислих речовин.

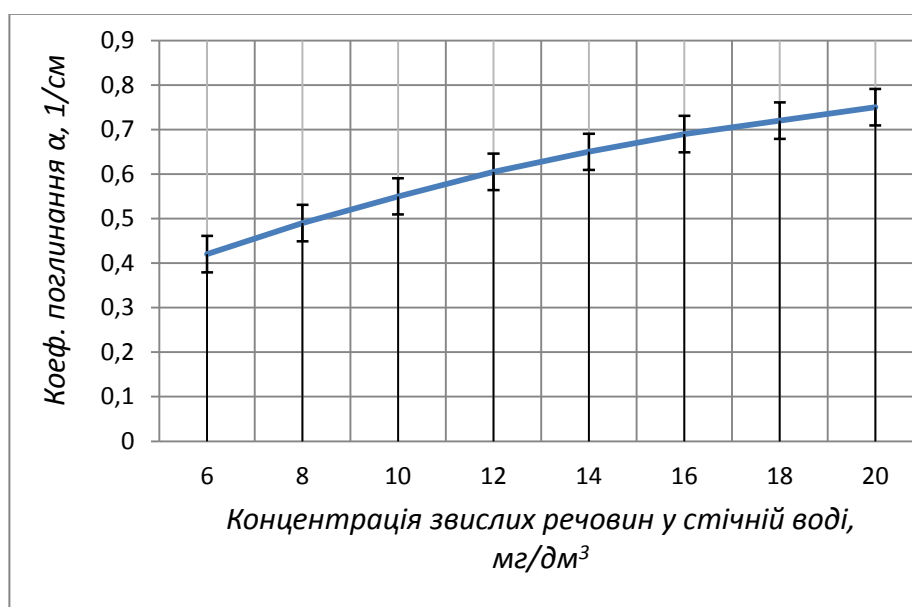


Рис. 1. Залежність коефіцієнту поглинання УФ випромінювання α в залежності від наявності у стічній воді звислих речовин. Вимірювання проводилися на довжині хвилі УФ випромінювання $\lambda = 253,7$ нм

Коефіцієнт поглинання α характеризує кількість ультрафіолетової енергії, яка була поглинута водою, при проходженні УФ променів через шар води і розраховується за формулою:



$$E_1 = E_0 e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

тобто,

$$\alpha = -\frac{1}{x} \ln \frac{E}{E_0}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт поглинання ультрафіолетового випромінювання, см^{-1} ;

x – товщина шару води, см ;

E_0 – інтенсивність УФ випромінювання на поверхні води, $\text{мВт}/\text{см}^2$;

E_1 – інтенсивність УФ випромінювання після проходження шару води завтовшки x см .

Величину поглинутої енергії УФ випромінювання (для занурених у воду УФ ламп) можна визначити як різницю між енергією, яка була випромінена УФ лампами і енергією, яка пройшла через шар води завтовшки x см . При проходженні ультрафіолетових променів через шар води завтовшки x см , буде поглинуто

$$D = E \cdot t = (E_0 - E_1) \cdot t = E_0 (1 - e^{-\alpha x}) \cdot t$$

ультрафіолетової енергії. Кількість поглинутої енергії D іноді називають УФ дозою, або дозою УФ випромінювання.

Інтенсивність УФ випромінювання E_0 і коефіцієнт поглинання ультрафіолетового випромінювання α є дуже важливими параметрами при виборі типу ультрафіолетової установки для знезараження будь – яких вод, особливо стічних. Чим менше величина коефіцієнту поглинання α , тобто чим чистіша вода, тим менша потужність ультрафіолетового випромінювання потрібна для знезараження води. На рис. 2 показано поглинання ультрафіолетового випромінювання при його проходженні через шар стічної води, яка пройшла біологічне очищення на очисних спорудах м. Кривий Ріг (Центральна станція аерації) при різних значеннях коефіцієнту поглинання α .

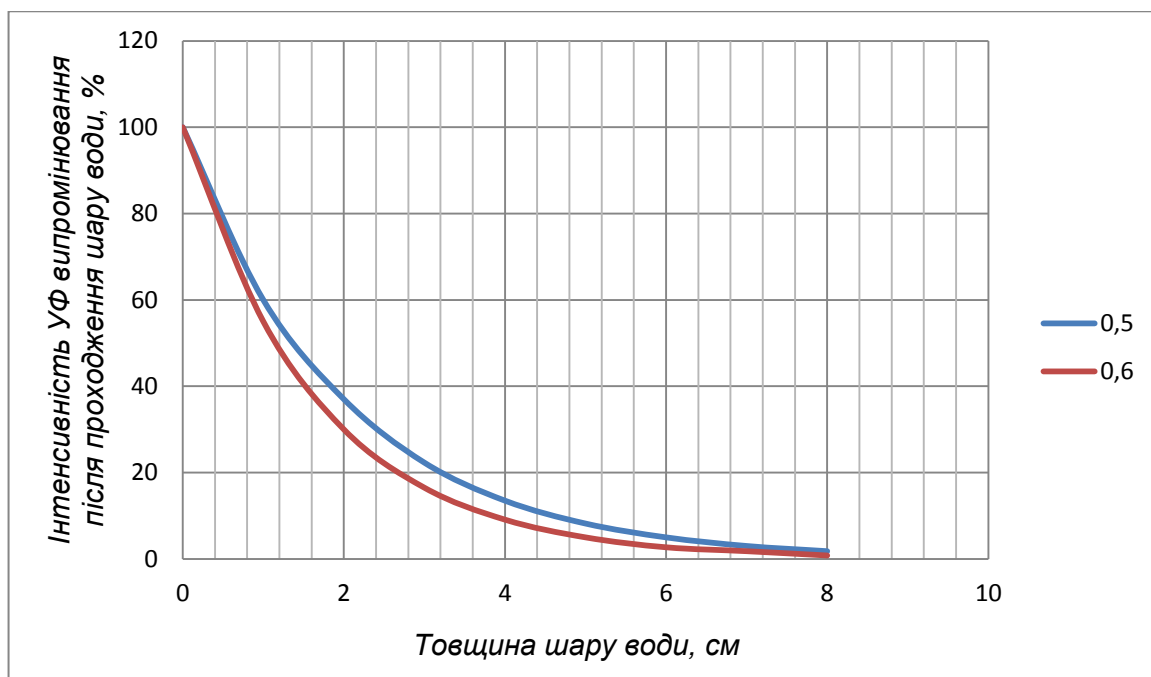


Рис. 2. Інтенсивність УФ випромінювання після проходження шару стічної води в залежності від величини коефіцієнту поглинання α ($\alpha_1 = 0,5 \text{ см}^{-1}$, $\alpha_2 = 0,6 \text{ см}^{-1}$)

Як видно з цієї діаграми, інтенсивність УФ променів доволі швидко знижується в залежності від товщини шару води, через який вони проходять. При розрахунках УФ установок для знезараження стічної води рівень остаточної інтенсивності УФ променів вибирають в інтервалі 10 – 15%. Такий рівень остаточної інтенсивності УФ опромінення гарантує доволі надійні показники знезараження. Цьому рівню остаточної інтенсивності відповідає шар води завтовшки 4 – 5 см. При цьому в достатньо повній мірі стає можливим ефективне використання всього міжлампового об'єму (об'єму між УФ лампою та стінками камери знезараження), через який проходить вода, що знезаражується. При більш високому рівні остаточної інтенсивності УФ променів (більше 15%) значна частка УФ енергії може бути невикористаною. При меншому рівні остаточної інтенсивності УФ випромінювання, у зв'язку з сильним його поглинанням, зростає кількість води, яка не отримує необхідну для знезараження кількість УФ енергії.

Вплив УФ опромінення на мікроорганізми, які знаходяться у воді

Закономірність зменшення кількості мікроорганізмів, які знаходяться у воді, описуються наступною формулою [2]:

$$P_1 = P_0 e^{-Et/k} = P_0 e^{-D/k}, \quad (3)$$

де P_1 – кількість мікроорганізмів, які залишилися у воді після її УФ опромінення;
 P_0 – кількість мікроорганізмів, які знаходилися у воді перед початком її опромінення;
 E - інтенсивність УФ випромінювання, яке було поглинуто шаром води, мВт/см²;
 k – коефіцієнт, який характеризує стійкість мікроорганізму до дії УФ променів;
 t – тривалість опромінення, с;
 $D = E \cdot t$ - величина енергії УФ опромінення, яка була поглинута водою, або доза ультрафіолетового опромінювання, або доза УФ опромінення, мДж/см².

Потрібно зазначити, що значення коефіцієнту стійкості мікроорганізмів до дії УФ променів k залежить від типу мікроорганізмів і для різних типів мікроорганізмів значення цього коефіцієнту відрізняється одне від одного.

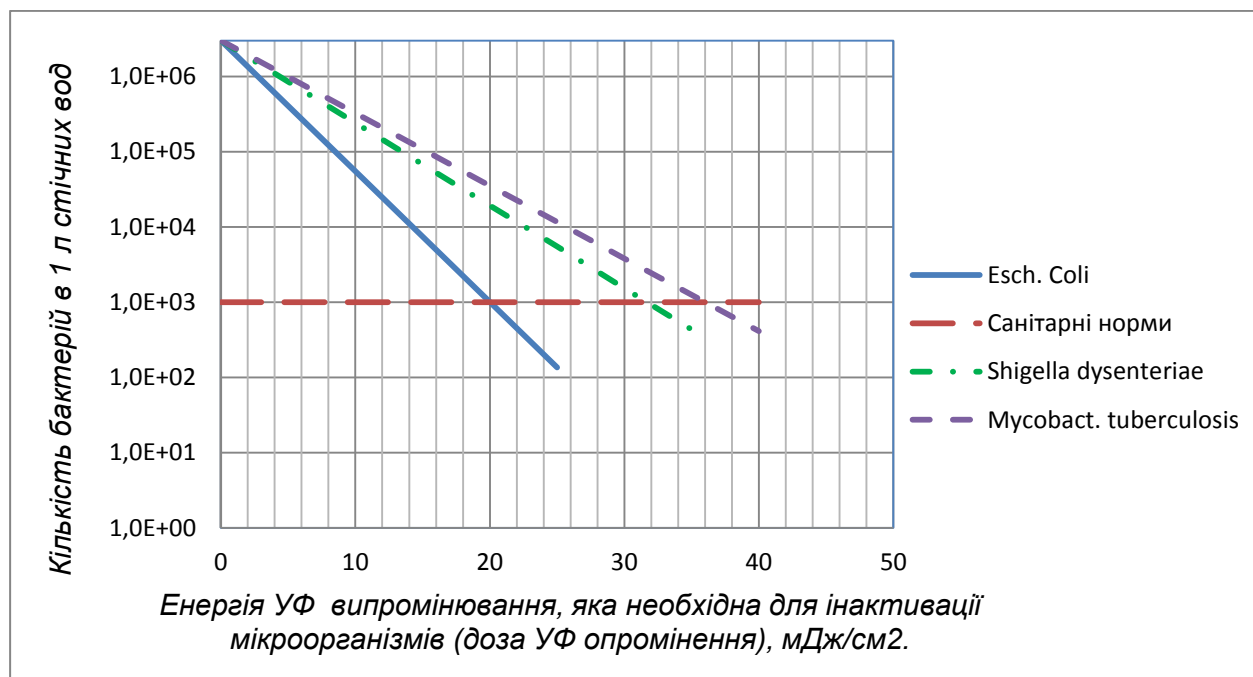


Рис. 3. Зниження кількості бактерій в 1 літрі води в залежності від дози УФ опромінення для деяких бактерій: 1 - Escherichia Coli ($k = 2,5$ мДж/см²), 2 - Shigella dysenteriae ($k = 3,96$ мДж/см²), 3 - Mycobacterium tuberculosis ($k = 4,5$ мДж/см²), 4 – згідно СанПіН 4630 – 88 [3] та СанПіН 2.1.5.980-00 [4]

Враховуючи, що в стічній воді після біологічного очищення нерідко присутні шматки мулу, розміром декілька міліметрів, для знезараження стоків використовують трохи завищені дози УФ опромінення. Так, згідно діючих нормативних документів, доза УФ опромінення, яка необхідна для знезараження стічної води, не повинна бути меншою ніж 30 мДж/см^2 (300 Дж/м^2). При цьому для підвищення надійності знезараження стічної води від наявних у ній вірусів рекомендується застосовувати підвищену дозу УФ опромінення – 40 мДж/см^2 (400 Дж/м^2) [1].

Ультрафіолетові системи знезараження стічної води

На практиці для знезараження стічної води широко використовується знезаражуючі системи з заглибленими у воду ультрафіолетовими випромінювачами. Такі системи, на відміну від знезаражуючих систем з незаглибленими УФ випромінювачами, дозволяють максимально повно (понад 90%) використовувати енергію УФ опромінення. Існують два основних типу ультрафіолетових знезаражуючих систем з заглибленими випромінювачами. До першого типу відносяться УФ системи в яких ультрафіолетові випромінювачі розміщені у закритому корпусі – камері знезараження (корпусні УФ системи). Стічна вода до камери знезараження подається по закритому трубопроводу. Такі системи як правило розташовують в окремих приміщеннях.



Рис. 4. Установа для знезараження стічних вод корпусного типу продуктивністю $500 \text{ м}^3/\text{годину}$ з системою механічного очищення кварцових чохлаів

До другого типу відносяться лоткові (або каналні) системи в яких УФ випромінювачі розташовані безпосередньо у відкритому лотку (каналі). УФ установки лоткового типу як правило складаються з кількох окремих касет, кожна з яких містить по декілька УФ ламп. Такі касети розміщуються у відкритому лотку (каналі). Лоткові УФ системи можуть розташовуватися як в окремій будівлі, так і на відкритому повітрі. Основною перевагою лоткових систем є зменшення капітальних витрат при побудові знезаражуючих систем.



Рис. 5. Знезаражуюча касета В8КС.01 з амальгамними УФ лампами та вбудованим механізмом очищення кварцових чохлаів



Рис. 6. Шафа управління 3В8КС.02, забезпечує одночасну роботу трьох знезаражуючих касет В8КС.01

УФ установки для знезараження стічних вод корпусного типу

УФ установки корпусного типу складаються з камери знезараження і шафи управління. Камера знезараження являє собою металевий корпус, усередині якого розташовані ультрафіолетові лампи і механізм для очищення кварцових труб. Для запобігання безпосереднього контакту з водою, що знезаражується і стабілізації температури УФ ламп, вони поміщуються в труби зі спеціальну кварцового скла (кварцові чохлаи). Корпус камери знезараження і механізм очищення кварцових труб виконуються з нержавіючої сталі та інших стійких до корозії матеріалів. Установки корпусного типу розташовується в закритому приміщенні. Вода, що знезаражується, по вхідному колектору



поступає всередину камери знезаражування, де вона піддається опроміненню ультрафіолетовим променями в дозі, яка гарантує її повне знезараження. Знезаражена вода через вихідний колектор скидається до поверхневого водойму або в каналізацію. Очищення захисних кварцових чохлаів від органічних та мінеральних відкладень проводиться за допомогою вбудованого очисного механізму з електричним приводом. Управління роботою механізмом очищення кварцових чохлаів здійснюється в автоматичному режимі. Періодичність очищування кварцових чохлаів встановлюється за допомогою спеціального мікропроцесорного реле або контролера через 12, 24, 36 або 48 годин. Така періодичність очищення кварцових чохлаів забезпечує їх високу прозорість на протязі всього строку експлуатації установки, що надає постійно високу ефективність знезаражування води.

Установки оснащуються датчиком наявності води (або реле протоку), який забезпечує вмикання і вимикання установки в залежності від наявності в ній стічної води (або її протоку через камеру знезаражування).

В деяких УФ установках, наприклад в установках серії УДВ (НВО «ЛИТ», Росія), ОДВ (ТзОВ «Промышленные системы УФ обеззараживания», Росія), УОВ – УФТ (Компанія «УФ – Тех», Росія) та деяких інших очищення кварцових чохлаів здійснюється за рахунок промивання всієї внутрішньої порожнини камери знезаражування спеціальними миючими засобами. Таке очищення кварцових чохлаів має як свої переваги, так і недоліки. Безперечною перевагою такого метода очищення є те, що разом з зовнішньою поверхнею кварцових чохлаів миється вся внутрішня поверхня камери знезаражування. Але для проведення промивання необхідно зупинити процес знезаражування. Тривалість промивки камери знезаражування складає кілька десятків хвилин. Після чого необхідно зробити нейтралізацію миючого засобу і злити його в каналізацію. Головними недоліками цього методу є зупинка процесу знезаражування стоків і використання великої кількості хімічних реактивів (щавлева кислота та ін.). Враховуючи, що забруднення кварцових чохлаів здійснюється постійно, їх очищення необхідно робити не рідше ніж один раз у декілька днів, а то і частіше. Це значно ускладнює експлуатацію УФ установок з очищенням кварцових чохлаів за рахунок промивання спеціальними миючими засобами та приводить до завищення експлуатаційних витрат.

УФ установки лоткового (канального) типу

УФ установки лоткового (канального) типу складаються з знезаражуючих касет (які розміщуються в порожнині каналу), шаф з елементами живлення УФ ламп, блоків управління роботою механізмів очищення кварцових чохлаів, системи регулювання постійного рівня води у каналі, шафи управління та іншого необхідного обладнання. Однією з особливостей УФ установок лоткового типу є необхідність їх оснащення системою автоматичної підтримки рівня води у каналі. При недостатньому рівні води у каналі частина УФ ламп, які розташовані у верхній частині знезаражуючих касет (при горизонтальному розташуванні УФ ламп у касеті), або верхня частина УФ ламп (при їх вертикальному розташуванні) не будуть знезаражувати воду. Це буде негативно впливати на ефективність знезаражування стоків і може привести до порушень у роботі механізмів очищення кварцових чохлаів. При високому рівні води у каналі може настати аварійна ситуація, яка приведе до затоплення касети. Для підтримки постійного рівня води у лотку (каналі) застосовують спеціальні автоматичні регулюючі засувки, які зменшують площину поперечного перерізу каналу при зменшенні потоку води і навпаки, збільшують її при зростанні потоку.



Рис. 7. Засувка для регулювання рівня води у каналі



Рис. 8. Шафа управління роботою регулюючої засувки АСКРВК – 1

Головною особливістю застосування УФ установок лоткового типу є те, що їх можна розміщувати у лотку (каналі) на відкритому просторі. Але при цьому необхідно передбачити систему стабілізації температури у шафах з електричним обладнанням.



Рис. 9. Знезаражуючі касети В6КС.01 з вбудованим механізмом очищення кварцових чохлаів



Рис. 10. Шафи ПРА для живлення УФ ламп, які встановлені у касетах В6КС.01



Рис. 11. Знезараження стічних вод на Центральній станції аерації у м. Кривий Ріг

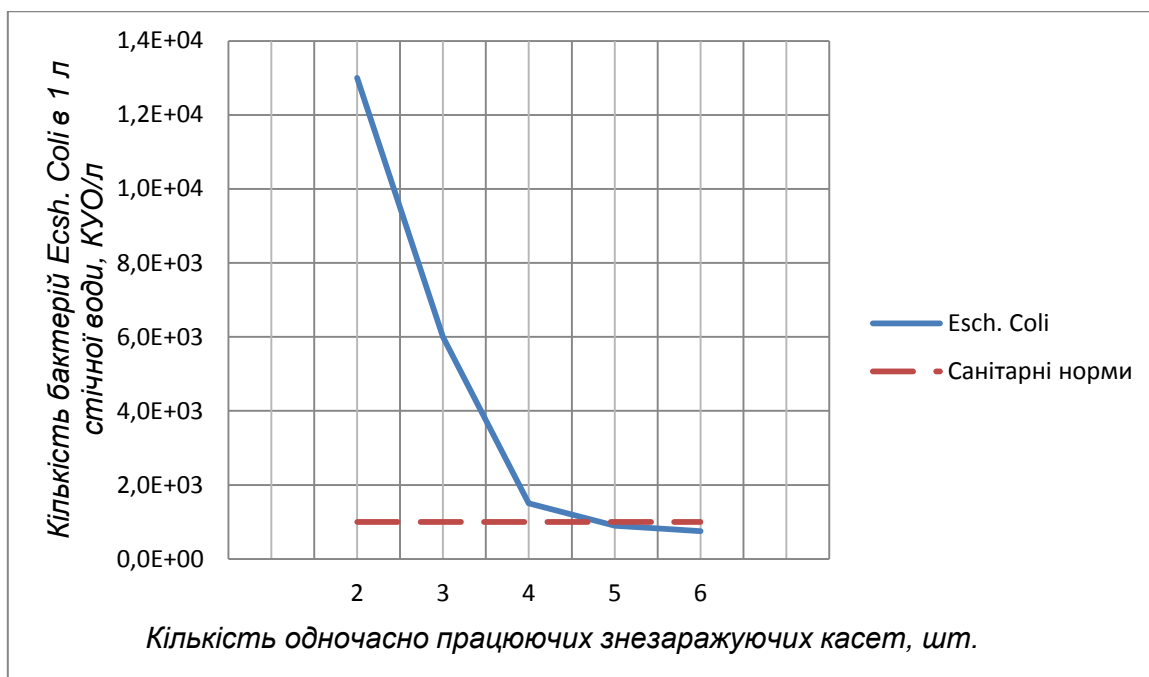


Рис. 12. Ефективність знезараження стічної води в залежності від числа одночасно працюючих знезаражуючих касет В6КС.01

На рис. 12 наведені дані, які характеризують ефективність знезараження стічної води ультрафіолетовим випромінюванням на очисних спорудах м. Кривий Ріг (Центральна станція аерації). Кількість бактерій групи кишкової палички в воді перед її УФ знезараженням складала 2 350 000 КУО/дм³. Доза УФ опромінення при роботі 4 касет склала 23 мДж/см², при роботі 6 касет - 35 мДж/см². Проток води складав 1300 – 1350 м³/годину. Як видно з наведеного графіку ефективність знезараження напряму залежить від величини дози ультрафіолетового опромінення. Необхідна знезаражуюча УФ доза складає близько 30 мДж/см², що вище, ніж розрахована по формулі (3), але повністю відповідає вимогам до УФ установок, призначених для знезараження стічних вод. Виявлена розбіжність між розрахунками та фактично отриманими даними обумовлена насамперед наявністю грудок мулу, які виносяться з водою зі споруд біологічної очищення (у зв'язку з чим знижується прозорість води) та недостатнім перемішуванням стічних вод в зоні УФ опромінення.



Економічна доцільність застосування УФ технологій для знезараження стічної води

Перед прийняттям рішення щодо впровадження технологій ультрафіолетового знезараження стічних вод, безумовно, необхідно в'яснити економічну доцільність застосування цього методу знезараження. Для цього необхідно оцінити питому вартість знезараження 1 м³ стічної води.

Для розрахунків виберемо типові очисні споруди, які забезпечують очищення стічних вод у кількості 50 000 м³/добу. Однією з особливостей вибору будь якого обладнання для знезараження стоків, у тому числі і обладнання для знезараження за допомогою хлору, є те, що продуктивність установки для знезараження води необхідно вибирати враховуючи миттєві витрати стоків. Для очисних споруд які забезпечують очищення стічних вод у кількості 50 000 м³/добу максимальне значення коефіцієнту нерівномірності витрат стічних вод складає 1,47, а його мінімальне значення – 0,69 [5]. Тобто, для забезпечення ефективного знезараження стічних вод УФ установка повинна мати максимальну продуктивність $Q_{\max} = 3062,5$ м³/годину і мінімальну $Q_{\min} = 1437,5$ м³/годину. Враховуючі рекомендації [1], щодо вибору знезаражуючої УФ дози, вибираємо її величину яка дорівнює 35 мДж/см² (350 Дж/м²). Далі проводимо вибір типу УФ установки, яка забезпечить знезараження стічних вод необхідною дозою ультрафіолетового опромінення. При цьому необхідно звернути увагу на те, що величина УФ дози повинна бути вказана для стоків, які мають певну прозорість¹ (або коефіцієнт поглинання α). Як правило, після біологічного очищення прозорість стічних вод (при довжині хвилі УФ променів, яка дорівнюється 253,7 нм) складає 40 ... 50%. Цій прозорості відповідає коефіцієнт поглинання УФ опромінювання $\alpha = 0,6 \dots 0,5$ см⁻¹.

Використовуючи дані, які були наведені виробниками УФ обладнання, для знезараження стічних вод вибираємо установку лоткового (канального) типу ВОДОГРАЙ® 22В8КС. Ця установка складається з 22 знезаражуючих касет типу В8КС.01. В кожній касеті встановлено по 8 амальгамних УФ ламп потужністю 500 Вт кожна та автоматичний механізм очищення кварцових чохлаів. Загальна кількість УФ ламп складає 176 штук. Основні технічні параметри УФ установки наведені у таблиці 2.

¹ Прозорість води А зв'язана з коефіцієнтом поглинання (для заглиблених у стічну воду УФ випромінювачів) формулою $A = (1 - \alpha) \cdot 100\%$.



Таблиця 2. Основні технічні параметри УФ установки ВОДОГРАЙ® 22В8КС

Показник	Величина
Максимальна продуктивність, м ³ /годину	3 150
Середня продуктивність, м ³ /добу (м ³ /годину)	50 000 (2 080)
Доза УФ опромінення при прозорості води, яка дорівнюється 45% (коефіцієнт поглинання УФ опромінення – 0,55 см ⁻¹)	35 мДж/см ²
Тип УФ лампи	амальгамна
Ресурс УФ лампи	16 000 годин
Кількість УФ ламп	176 шт.
Напруга живлення	380/220 В, 3 ф.
Частота електричної мережі	50/60 Гц
Потужність у режимі максимальної продуктивності	90 кВт
Середня потужність	60 кВт
Коефіцієнт потужності (cos φ)	0,96

Як можна побачити, максимальна продуктивність цієї УФ установки складає 3150 м³/годину, що близько до необхідної. Середня потужність установки складає 60 кВт. При цілодобовій роботі УФ установки на протязі всього року кількість затраченої електричної енергії складе 60 кВт х 24 години х 365 діб = 525 600 кВт·годин. Якщо вартість 1 кВт·години складає 1,12 грн./кВт·год., то витрати на електроенергію, яка необхідна для знезараження стічних вод складуть 588 672 грн.

До експлуатаційних витрат, крім витрат за спожиту електричну енергію, входять витрати на купівлю УФ ламп, які необхідно замінити після закінчення терміну їх експлуатації, а також витрати на технічне обслуговування установки та на заробітну плату обслуговуючого персоналу. Враховуючи, що ресурс УФ ламп складає практично 2 роки безперервної експлуатації (16 000 годин), їх ціну, та те, що УФ установка експлуатується в автоматичному режимі без постійного обслуговування, орієнтовно ці витрати можна оцінити у 50% від вартості спожитої електричної енергії. Таким чином, загальні витрати на експлуатацію УФ установки складуть приблизно 900 000 гривень. Враховуючи, що кількість знезаражених на протязі року стоків складають 50 000 м³/добу х 365 діб = 18 250 000 м³, питомі витрати для знезараження 1 м³ стоків складуть 900 000 гривень : 18 250 000 м³ = 0,049315 грн. Тобто, собівартість УФ знезараження 1000 м³ стоків складає 49,315 гривень



Висновки

Застосування ультрафіолетового опромінювання для знезараження стічних вод має безперечні переваги перед діючими технологіями, які побудовані на застосовуванні хлору або його похідних: гіпохлориту натрію та ін.

По – перше, застосування методу УФ знезаражування стічних вод повністю виключає забруднення навколишнього середовища, поверхневих та підземних вод хлором та хлорорганічними сполуками. Ультрафіолетове випромінювання ефективно знищує не тільки бактерії але і, на відміну від хлорування, віруси. Це робить стоки абсолютно безпечними для навколишнього середовища.

По – друге, експлуатація УФ установок значно простіша ніж станцій, призначених для хлорування води 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.

По – третє, сучасні установки для знезараження води за допомогою ультрафіолетового опромінення, як правило, оснащені системою автоматичного управління, яка забезпечую їх експлуатацію в автономному енергозберігаючому режимі без постійного обслуговування. Кількість одночасно включених УФ ламп пропорційна миттєвим витратам води.

В – четвертих, собівартість знезараження стічної води складає близько 5 копійок за 1 м³ стоків, що приблизно дорівнює собівартості знезараження стоків за допомогою хлору.

Наведені переваги застосування методу знезараження стічних вод ультрафіолетовим опроміненням вказують на практичну, екологічну, санітарно – гігієнічну та економічну доцільність застосування методу знезараження стоків ультрафіолетовим опроміненням. Метод УФ знезараження питних та стічних вод рекомендован Міністерством регіонального розвитку, будівництва та житлово – комунального господарства України до широкого застосування на об'єктах водопідготовки та водовідведення.



Література.

1. Методические указания МУ 2.1.5.732 – 99 «Санитарно – эпидемиологический надзор за обеззараживанием сточных вод ультрафиолетовым излучением». Министерство здравоохранения Российской Федерации. М. 1999.
2. Соколов В.Ф. Обеззараживание воды бактерицидными лучами. С. 234. Изд. лит. по строительству. М. 1964.
3. СанПиН 4630 – 88 Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнений.
4. СанПиН 2.1.5.980 – 00 Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Министерство здравоохранения Российской Федерации, М. 2000.
5. СНиП 2.04.03 – 85 Канализация. Наружные сети и сооружения (с изм. 1986 г.).