

УДК 621.327

**А. О. СЕМЕНОВ**, канд. фіз.-мат. наук, доц., Полтавський університет економіки і торгівлі;

**Т. В. САХНО**, д-р хім. наук, проф., Полтавський університет економіки і торгівлі;

**Г. Д. КОБИЩАН**, канд. техн наук, ст. викл., Полтавський університет економіки і торгівлі

## МОДЕЛЮВАННЯ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ БАКТЕРИЦИДНОМУ ЗНЕЗАРАЖЕННІ ВОДИ

В роботі представлені результати поширення УФ-випромінювання в воді. Сформовані основні загальні критерії для розробки і проектування УФ-установок для бактерицидного знезараження води. Наведена залежність інтенсивності випромінювання від коефіцієнта проникності. На основі проведених досліджень запропоновано гідродинамічну модель, яка дає можливість розрахувати ефективну дозу бактерицидного знезараження. Запропонована модель враховує чутливість мікроорганізмів до УФ-випромінювання і конструктивні особливості установки.

**Ключові слова:** УФ-випромінювання, доза бактерицидного знезараження, інактивація мікроорганізмів, гідродинамічна модель.

**Вступ.** Знезараження води з використанням УФ-випромінювання відноситься до числа фізичних, так званих, безреагентних методів [1]. Ці методи мають ряд істотних переваг перед хімічними реагентними методами, головною з яких є відсутність змін складу і властивостей води.

Опромінювачі для знезараження води поділяються на пристрої навісного типу, коли джерело УФ-випромінювання знаходиться над поверхнею води, і зануреного типу, коли ультрафіолетові лампи в кварцових чохлах знаходяться у воді.

У практиці для знезараження води застосовують установки з зануреними джерелами бактерицидного випромінювання, в яких, на відміну від установок із незануреними джерелами випромінювання, досягається більш висока інтенсивність бактерицидного випромінювання [2]. Лампи в таких установках розміщують у спеціальних кварцових чохлах, прозорих для бактерицидних променів [3].

Загальні умови для розробки і проектування УФ-установок для бактерицидного знезараження води в цілому визначаються наступними умовами:

- витрати води;
- необхідна степінь бактерицидного знезараження;
- якість води (параметри, що визначають не тільки УФ-проникнення, а її фізико-хімічні властивості);
- максимально можливі з технічного або економічного погляду втрати напору води при знезараженні;
- вимоги до енергоефективності;
- вимоги до автоматизації, контролю та управління;
- інші зовнішні умови (приміщення, температурний режим і т.п.).

При розробці УФ-установок для бактерицидного знезараження питної води потрібно враховувати наступні принципи:

- головним критерієм ефективності УФ-знезараження є УФ-доза, значення якої визначається правильним вимірюванням УФ-інтенсивності та її підрахунком в зоні знезараження;

- головною гідродинамічною задачею при проектуванні УФ-установки та її камери опромінювання є необхідність забезпечити при максимальній ефективності знезараження мінімальні втрати напору води.

Слід відмітити, що в загальному випадку при розробці УФ-установок завжди потрібно вирішувати задачі, що протирічать одна одній: кожен об'єм рідини в камері опромінювання повинен отримувати необхідну дозу для бактерицидного знезараження; необхідність максимального використання УФ-випромінювання, яке втрачається на сусідніх джерелах випромінювання або на стінках камери опромінювання за рахунок поглинання; для води з різним коефіцієнтом УФ-проникнення потрібно враховувати необхідну УФ-дозу, збільшення якої можливе за рахунок зменшення міжлампової відстані і т.д.

Якість води, а саме її прозорість для УФ випромінювання в промисловості та комунальному господарстві коливається в значному діапазоні. Вимоги до ступеня і умов бактерицидного знезараження в залежності від характеристик води, забезпечують необхідність розробки УФ-установок для знезараження води із конкретними технічними параметрами. Наприклад для води, що містить велику кількість зважених частинок, необхідно забезпечити відповідну швидкість і умови перебування води в камері опромінення, при яких виключається можливість осідання частинок.

Дослідження і особливості проектування установок для бактерицидного знезараження води за допомогою ультрафіолетового випромінювання представляє складну задачу для дослідників, оскільки фізика води вивчена не достатньо [4].

**Мета роботи.** Мета роботи полягає в моделюванні гідродинамічних процесів, що відбуваються в установках ультрафіолетового знезараження води, для розробки методики розрахунку ефективної бактерицидної дози знезараження мікроорганізмів.

**Методика експериментів.** Номенклатура УФ-установок та систем знезараження для різних технологічних процесів, задач і відповідно, характеристик води, достатньо різноманітна і широка. Відомо, що УФ-установки проектуються і будуються з використанням різної елементної бази (тип ламп, пускорегулююча апаратура і т.п.), що суттєво змінює технічні параметри установок в залежності від задачі. Тому при проектуванні установок потрібно детально розглядати і аналізувати умови з врахуванням специфіки їх використання.

При розробці установок для ультрафіолетового (УФ) знезараження води враховують важливу характеристику - УФ-дозу інактивації мікроорганізмів, що забезпечує бактерицидне знезараження [3]. Тому, при встановленні відповідності УФ-установок вимогам нормативної документації потрібно проводити теоретичні розрахунки необхідної УФ-дози, яка визначається з допомогою

експериментальних методів або моделювання [5]. Величина, що характеризує дозу бактерицидного знезараження - УФ-опроміненість, повинна бути не нижче вказаного значення для виду бактерій в будь-якій віддаленій точці камери знезараження від джерела УФ-випромінювання.

Основними характеристиками УФ-установок є: продуктивність, проникність УФ-випромінювання, а також доза УФ-опромінення, що забезпечує бактерицидне знезараження. При конструюванні установок для УФ-знезараження води розробникам потрібно вирішити ряд завдань, що пов'язані з вивченням гідродинамічного потоку, зменшенням втрати напору, досягненням максимального перемішування водневого середовища в зоні опромінення і т. п.

Фізичний процес поширення світла в водному середовищі (поглинаюче середовище) описується законом Бугера-Ламберта-Бера [4], згідно з яким, для паралельного пучка світла з довжиною хвилі  $\lambda$  та інтенсивністю  $I_0$ , що пройшов у поглинаючому середовищі відстань  $l$ , інтенсивність визначається формулою:

$$I = I_0 e^{-k_\lambda l} \quad (1)$$

де  $k_\lambda$  – коефіцієнт поглинання середовища, який залежить від довжини хвилі.

Для зручності, при розрахунку УФ-установок, використовують коефіцієнт проникнення  $k$ , який завжди менше 1, що характеризує спад інтенсивності УФ-випромінювання з довжиною хвилі 253,7 нм, при проходженні в водному середовищі певної відстані, наприклад 50 мм, яка визначає допустимий спад величини інтенсивності [6]. У такому випадку інтенсивність  $I_0$  в середовищі з коефіцієнтом проникнення  $k$  на пройденій відстані  $l$ :

$$I = I_0 k^{\frac{l}{50}} \quad (2)$$

де  $l$  – має розмірність [мм]. Коефіцієнт проникнення для кожного середовища визначається експериментально-дослідним шляхом.

Для проведення розрахунків при проектуванні УФ-установок необхідно знати просторовий розподіл інтенсивності випромінювання УФ-лампи, або у разі знезараження води, системи «УФ-лампа+кварцовий чохол»  $I(k, x, y)$ , де  $k$  – коефіцієнт проникнення;  $x, y$  – координати в площині, перпендикулярній поздовжній осі лампи.

Розрахунок розподілу інтенсивності проводиться за допомогою чисельних методів. УФ-випромінювач, тобто лампа, поділяється на велику кількість точкових джерел випромінювання: чим більша їх кількість, тим достовірніше результат розрахунку. В такому випадку для кожної фіксованої відстані від осі джерела випромінювання розраховується внесок від кожної випромінюючої точки. При цьому враховується залежність коефіцієнта заломлення і відбиття від довжини хвилі. Якщо розглядати багатолампову систему, розрахунок середньої опроміненості враховує перекривання однієї лампи іншими. Результатом розрахунку є залежність інтенсивності від відстані до осі джерела випромінювання і від координати уздовж осі джерела випромінювання.

Інтенсивність опромінювання є функцією дози опромінення  $H$ , розрахунок якої представляє складну задачу. В загальному випадку, для розрахунку

необхідні наступні дані: розподіл інтенсивності УФ- випромінювання в камері знезараження і розрахунок течії потоків води. Для спрощення вирішення даної задачі користуються різними моделями [5, 7]. Скористуємося загальноприйнятою розрахунковою моделлю, яка використовується для УФ-установок, модель - повного перемішування, яка дозволяє розрахувати середню дозу, що необхідна для інактивації мікроорганізмів [3].

Принцип моделі повного перемішування полягає в тому, що кожна елементарна частинка рідини проходить через всі точки УФ-опромінення і перебуває в кожній з них рівні проміжки часу. У моделі повного перемішування середня доза визначається наступною формулою:

$$\langle H \rangle = \langle I \rangle \cdot \langle t \rangle \quad (3)$$

де  $\langle I \rangle$  – усереднена інтенсивність в камері знезараження;  $\langle t \rangle$  - середній час перебування рідини в камері знезараження.

Середня інтенсивність обчислюється наступним чином:

$$\langle I \rangle = \frac{L}{V} \iint I(k, x, y) dx dy \quad (4)$$

де  $V$  – об'єм зони знезараження;  $L$  – довжина дуги лампи (міжелектродна відстань);  $I(k, x, y)$  – інтенсивність в поперечному перерізі установки в точці з координатами  $x, y$  для коефіцієнта проникнення УФ-випромінювання  $k$ . Середній час перебування рідини в камері знезараження визначається наступним відношенням:

$$\langle t \rangle = \frac{V}{Q} \quad (5)$$

де  $Q$  – продуктивність установки. Таким чином, в моделі повного перемішування середня доза бактерицидного знезараження з врахуванням формул (4) і (5) визначається:

$$\langle H \rangle = \frac{\nu \cdot L}{Q} \iint I(k, x, y) dx dy \quad (6)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт запасу для врахування застійних зон (як правило  $\nu \cong 0.8$ ). Врахування застійних доз є обов'язковим, оскільки конструкція установки, не здатна забезпечити рівномірність потоку для всіх ділянок в камері знезараження.

Перевага моделі повного перемішування полягає у відносній простоті розрахунку і у відсутності залежності від чутливості мікроорганізмів до УФ-випромінювання. Для установок, що використовується для бактерицидного знезараження води цього недостатньо, оскільки модель повного перемішування не дозволяє врахувати вплив різних конструктивних елементів (пристроїв для перемішування, решіток і т. п.). Для вирішення цього недоліку пропонується використовувати гідродинамічне моделювання або експериментальні методи, що дозволяють вимірювати функцію розподілу часу перебування, по якій можна судити про ефективність установки бактерицидного знезараження.

Наявність сучасного програмного забезпечення робить можливим проведення гідродинамічного моделювання і на його основі створити методику

розрахунку ефективної дози бактерицидного знезараження.

Моделювання руху потоків води в установках УФ-знезараження відбувається шляхом чисельного рішення системи рівнянь, що складається з рівняння Нав'є-Стокса.

Розрахунок бактерицидної дози знезараження проводиться наступним чином: об'єм води, що потрапляє в камеру опромінювання і заповнює її, розіб'ємо на елементарні об'єми (струмені), для кожної точки такого струменя відомі компоненти швидкості і координати. Якщо кількість струменів рівна  $n$ , а кожний струмінь розділений на  $i$  елементарних відрізків, тоді, за визначенням, доза опромінення  $i$ -го відрізка  $n$ -го струменя визначається :

$$H_i^n = I_i(k) \cdot t_i \quad (7)$$

де  $t_i$  – час проходження елементарним об'ємом  $i$ -го відрізка;  $I_i$  – УФ-інтенсивність на відрізку  $i$ , що залежить від пропускання води  $k$ . УФ-інтенсивність в будь-якій точці може бути обчислена шляхом підсумовування інтенсивностей всіх ламп.

Доза, отримана  $n$ -м струменем, буде дорівнювати:

$$H^n = \sum_i H_i^n \quad (8)$$

Відомо, що дезактивація мікроорганізмів УФ-випромінюванням підпорядковується експоненціальному закону, тобто якщо в кожному елементарному об'ємі води на вході міститься  $N_0$  бактерій (вважаємо, що кількість бактерій на вході розподілена рівномірно), то на виході отримаємо кількість бактерій для  $n$ -го струменя:

$$N_n = N_0^n \cdot e^{-qH^n} \quad (9)$$

де  $q$  – коефіцієнт, що характеризує чутливість бактерій до ультрафіолету і є індивідуальним для кожного виду бактерій, вірусів і т. д. Тоді загальна кількість бактерій на виході установки  $N$ :

$$N = \sum_n N_n \quad (10)$$

а на вході установки:

$$N_0 = \sum_n N_0^n \quad (11)$$

Загальна кількість бактерій на виході установки дозволяє отримати ефективну дозу бактерицидного знезараження  $H_{ef}$  :

$$H_{ef} = \frac{\ln N / N_0}{-q} \quad (12)$$

де  $N_0$  – загальне число бактерій на вході в установку.

Таким, чином запропонована модель дає можливість враховувати необхідну дозу інактивації бактерій з врахуванням конструктивних особливостей УФ-установки.

**Обговорення результатів.** Бактерицидна доза, що отримана вищесказаним чином, враховує чутливість мікроорганізмів до УФ-випромінювання, а також вплив елементів конструкції на ультрафіолетовий потік і, як наслідок, на ефективність бактерицидного знезараження. Модель гідродинамічного протікання води в камері опромінення УФ-установки дозволяє виявити ділянки неззараженої води, що дає можливість врахувати на стадії проектування конструктивні особливості.

Реальна продуктивність установок знезараження води залежить від концентрації та виду шкідливих мікроорганізмів і може бути визначена дослідним шляхом за результатами аналізу до УФ-обробки і після неї при різній пропускній здатності камери опромінювання і якості води [8]. Для перевірки роботи УФ-установки для знезараження води використовують метод «біотестування», суть якого полягає у визначенні ефективності дії УФ-променів на штампи бактерій, що вирощені в однакових умовах в ході всього «біотестування».

Подібні моделі, що дають можливість враховувати конструктивні особливості пристроїв на стадії проектування, можуть бути використані для розрахунку ефективної дози опромінення УФ-установок, що працюють по принципу, наприклад, поперечного протікання води.

В багатьох випадках при проектуванні УФ-установок потрібно враховувати також показники їх міцності, які забезпечують знезараження води, що знаходиться під тиском від 1 до 10 атм. і більше. Оскільки в УФ-установках використовуються крихкі матеріали: кварцові чохла, лампи, тому потрібно створити конструкцію, в якій напруженість нижча за межі текучості. Для цього необхідно врахувати і забезпечити мінімальні деформації в місцях кріплення кварцових чохлах або ламп. Для перевірки конструктивних рішень, що закладені в установці, використовують комп'ютерні розрахунки статистичної міцності. Крім того потрібно враховувати резонансні явища на окремих вузлах УФ-установках. Так для УФ-установок бактерицидного знезараження води небезпечними є частоти роботи насосів, що подають воду. Віддаленість УФ-установок від джерела частоти є необхідною умовою при проектуванні та їх розміщенні.

**Висновки.** Запропонована гідродинамічна модель дає можливість провести розрахунки необхідної бактерицидної дози інактивації мікроорганізмів, що враховує їх чутливість до УФ-випромінювання з урахуванням конструктивних особливостей установки. Модель на стадії проектування і розробки враховує найбільш необхідні умови створення УФ-установок, які на практиці забезпечать з врахуванням часу опромінення необхідний результат ефективності бактерицидного знезараження.

Подібний модельний підхід можна використати і для розрахунку УФ-пристроїв для бактерицидного знезараження повітря [9]. Математична модель для пристроїв бактерицидного знезараження повинна враховувати коефіцієнт багатократного відбивання, що вносить свій внесок у сумарну УФ-дозу і залежить від оптичних властивостей матеріалу в УФ-області [6].

**Список літератури:** 1. Gray, N. F. Ultraviolet Disinfection [Text] /\_N. F. Gray // Microbiology of Waterborne Diseases. - 2014. - № 2. - P. 617-630. 2. Stephen, B. Germicidal ultraviolet irradiation.

Modern and effective methods to combat pathogenic microorganisms [Text] / *B. Stephen, Jr. Martin, D. Chuck, James D. Freihaut, William P. Bahnfleth, Josephine Lau, Ana Nedeljkovic-Davidovic* [Text] // ASHRAE JOURNAL, 2008 – Т. 50 № 8. **3.** *Вассерман, А. Л.* Ультрафиолетовое излучение в профилактике инфекционных заболеваний [Текст] / *А. Л. Вассерман, М. Г. Шандала, В. Г. Юзбашев* // Медицина. - Москва, 2003. – 208 с. **4.** *Антонченко В. Я.* Основы физики воды [Текст] / *В. Я. Антонченко, А. С. Давыдов, В. В. Ильин* // Киев. Изд-во Наук. Думка, 1991, - 672 с. **5.** *Kowalski, W. J.* Mathematical Modeling of UVGI for Air Disinfection [Text] / *W. J. Kowalski, W. Bahnfleth, D. L. Witham, B. F. Severin, T. S. Whittam* // Quantitative Microbiology 2. - 2000. – P. 34–38. **6.** *Семенов, А. О.* Ультрафіолетове випромінювання та оптичні властивості матеріалів в УФ-області [Текст] / *А. О. Семенов, А. Д. Кобишчан, Н. В. Семенова* // Сборник научных трудов SWorld. – 2014. – Т. 2, № 1. – С. 76-80. **7.** *Elyasi, S.* Simulation of UV photoreactor for water disinfection in Eulerian framework [Text] / *S. Elyasi, F. Taghipour* // Chemical Engineering Science. – 2006. – Т. 61, № 14. - P. 4741 - 4749. **8.** *Sharifi-Yazdi, M. K.* Inactivation of pathogenic bacteria using pulsed UV-light and its application in water disinfection and quality control [Text] / *M. K. Sharifi-Yazdi* // Acta Medica Iranica. – 2006. – Т. 44, № 5. – P. 305 - 306. **9.** *Semenov, A. A.* Bactericidal irradiators for ultraviolet disinfection of indoor air [Text] / *A. A. Semenov, G. M. Kozhushko* // European Applied Sciences. – 2013. – Т. 1, № 13. – 226 - 228.

**Bibliography (transliterated):** **1.** *Gray, N. F.* (2014). Ultraviolet Disinfection. Microbiology of Waterborne Diseases, 2, 617-630. **2.** *Stephen, B. Martin, Jr., Chuck, D., James, D. Freihaut, William, P. Bahnfleth, Lau, J., Nedeljkovic-Davidovic, A.* (2008). Germicidal ultraviolet irradiation. Modern and effective methods to combat pathogenic microorganisms. ASHRAE JOURNAL, Vol. 50, №8. **3.** *Wasserman A. L., Shandala M. G., Yuzbashev V. G.* (2003). Ultraviolet radiation in the prevention of infectious diseases. M: Medical, 208 p. **4.** *Antonchenko, V., Davydov, A., Ilyin, V.* (1991). Basic physics of water. Kiev. Publishing House of Science Dumka. - 672 p. **5.** *Kowalski, W. J., Bahnfleth, W., Witham, D. L., Severin B. F., Whittam T. S.* (2000). Mathematical Modeling of UVGI for Air Disinfection. Quantitative Microbiology, 2, 34–38. **6.** *Semenov, A., Kobischan, A., Semenova, N.* (2014). Ultraviolet radiation and the optical properties of materials in the UV region. Collection of scientific papers SWorld. – Vol. 2, № 1, 76 - 80. **7.** *Elyasi, S., Taghipour F.* (2006). Simulation of UV photoreactor for water disinfection in Eulerian framework. Chemical Engineering Science. - Vol. 61, № 14, 4741 - 4749. **8.** *Sharifi-Yazdi, M. K.* (2006). Inactivation of pathogenic bacteria using pulsed UV-light and its application in water disinfection and quality control. Acta Medica Iranica. – Vol. 44, № 5, 305 - 306. **9.** *Semenov, A. A., Kozhushko, G. M.* (2013). Bactericidal irradiators for ultraviolet disinfection of indoor air. European Applied Sciences. – Vol. 1, № 13, 226 - 228.

*Надійшла (received) 17.06.2014*

**УДК 661.961.1**

**Н. Ф. ДОБРИЦКАЯ**, аспирант, НТУ «ХПИ»;

**В. Б. ТРОШЕНЬКИН**, канд. техн. наук, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков

### **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕРМОДИНАМИКИ НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА В РЕАКЦИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ВОДОЙ**

В статье проанализированы преимущества и недостатки методов термодинамики необратимых процессов и диффузионной кинетики, описывающих закономерности выделения водорода в реакциях взаимодействия алюминиевых сплавов с водой. Предложено принять за меру движущей силы реакции химический потенциал, а факторы, тормозящие процесс, могут быть

© Н. Ф. ДОБРИЦКАЯ, В. Б. ТРОШЕНЬКИН 2014