

УДК 628.94:535

П. П. ГОВОРОВ, О. В. КОРОЛЬ, Т. І. РОМАНОВА

## **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИСТЕМА ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ НА ОСНОВІ СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА**

*Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова  
61002, вул. Революції, 12, м. Харків, Україна  
E-mail: govorov\_fp@mail.ru*

**Анотація.** В статті розглядається енергоефективна технологія знезараження питної води, що базується на використанні світлодіодних джерел світла для генерації ультрафіолетового випромінювання. Запропоновано структуру системи знезараження води, методику та алгоритм розрахунку світлорозподілу світлодіодних джерел світла, що забезпечують ефективне використання електричної енергії на знезараження води.

**Ключові слова:** ультрафіолетове випромінювання, світлодіодні джерела світла, бактерицидна установка, структура, методика, алгоритм, програма розрахунку світлорозподілу.

**Аннотация.** В статье рассматривается энергоэффективная технология обеззараживания питьевой воды базирующийся на использовании светодиодных источников света для генерации ультрафиолетового излучения. Предложено структуру системы обеззараживания воды, методику и алгоритм расчета светораспределения светодиодных источников света которые обеспечивают эффективное использование электрической энергии на обеззараживание воды.

**Ключевые слова:** ультрафиолетовое излучение, светодиодные источники света, бактерицидная установка, структура, методика, алгоритм, программа расчета светораспределения.

**Abstract.** In the article the energy-efficient technology of disinfection of drinking water which is based on the use of LED light sources for generating ultraviolet radiation. The structure of the system of water disinfection technique and algorithm for calculating the light distribution of LED light sources that provide efficient use of electricity in the disinfection of water.

**Keywords:** ultraviolet radiation, LED light sources, bactericidal installation, structure, methods, algorithm, the program of calculation of light distribution.

### **ВСТУП**

Існуючі методи очищення води, а також схеми її знезаражування не спроможні забезпечити сучасні вимоги до якості питної води і не в повній мірі відповідають вимогам енергоефективності у зв'язку із застосуванням малоефективної техніки та технологій.

Існуючі бактерицидні установки побудовані на використанні ультрафіолетових газорозрядних ртутно-аргонових або ртутно-кварцових ламп. Наявність у воді завислих речовин та низька світлова віддача ламп знижують ефективність процесу знезаражування. Крім того, конструкція установок дозволяє здійснювати очистку води тільки в місцях що мають дуже високу бактеріальну забрудненість. У зв'язку з цим установки для знезараження води на основі існуючих бактерицидних ламп являються малоефективними, хоча досить привабливими взагалі. Тому пошук нових та вдосконалення існуючих технологій знезараження питної води є важливою і актуальною задачею.

### **РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Технологія ультрафіолетового опромінення при знезараженні питної та стічної води застосовується досить широко. При впливі на органічні клітини різних бактерій ультрафіолетовим випромінюванням спостерігається руйнація клітин мікроорганізмів у спектрі від 200 до 400 нм. [1] Тому,

для підвищення ефективної роботи бактерицидних установок, необхідним є пошук енергоефективних джерел світла, що працюють в діапазоні 200—400 нм. Як свідчать аналіз, високі техніко-економічні показники забезпечують бактерицидні установки, що працюють на основі використання світлодіодних джерел світла, які нарівні з покращенням енергетичних характеристик, забезпечують ще й можливість зменшення ефекту післядії за рахунок розосередження установки і багатоступеневої структури системи знезараження води. У той же час, дослідження процесів знезараження води та визначення вимог до бактерицидних установок на основі ультрафіолетових світлодіодних джерел світла досі не проводилось.

Тому, для виявлення загальних закономірностей створення світлового простору світлодіодними світловими приладами авторами розроблена методика синтезу світлових приладів на основі відомої кривої сили світла (КСС) одиничного світлодіодного джерела світла. Для формування кривої сили світла приладу використана модель виду [2]:

$$I'(\lambda) = F(I(\lambda), N, K) = F(I_0, N, 2\theta_{0,5}, K), \quad (1)$$

де  $I(\lambda)$  — розподіл сили світла світлового пристрою (СП);  $I(\lambda)$  — розподіл сили світла одного світлодіода (СД);  $N$  — число світлодіодів в приладі;  $I_0$  — осьова сила світла одного СД;  $2\theta_{0,5}$  — кут свічення одного світлодіода;  $K$  — коефіцієнт, що враховує розподіл сили світла від оптичного елемента світлового приладу.

Моделювання світлорозподілу світлодіодів здійснювалося на основі кривих ламбертовського типу з використанням сплайн-апроксимації, як найбільш ефективного опису цього процесу. Знаходження шуканої сплайн-функції, що описує розподіл сили світла світлодіодного джерела світла в просторі, зведено до рішення системи лінійних рівнянь алгебри. Для цього розроблено програмне забезпечення Light Power, що забезпечує розрахунок КСС світлодіодних приладів з довільним розташуванням і орієнтацією відносно певного центру світлодіода, а також для кожного стану середовища пропускання. На рис. 1 представлений алгоритм розрахунку параметрів і характеристик світлових приладів на основі світлодіодних джерел світла.

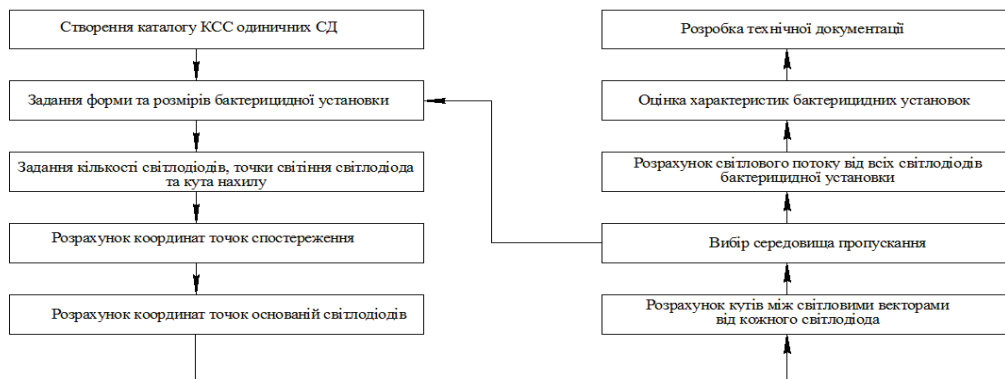


Рис. 1. Алгоритм розрахунку бактерицидних установок зі світлодіодними джерел світла

Результатом розрахунку є графік світлорозподілу в площині, де розташовані точки спостереження. Графік є кривою сили світла (КСС) в довільно вибраній площині, що проходить через вісь лампи. Величина сили світла в цій залежності є результат складання сил світла в точці спостереження, від усіх світлодіодів, які розміщені в світлодіодній лампі (СДЛ). Величина кута визначена, як кут між віссю лампи і променем, проведеним в точку спостереження. Для обчислення сили світла використовується закон квадрата відстані  $I = E \cdot L^2$ . Для розрахунку КСС СДЛ використовуються КСС одиничних світлодіодів (СД), що наведені в паспортних даних. В розглянутих умовах КСС СД — це кубічний сплайн апроксимації, отриманий на основі експериментальних вимірів для одиничного світлодіода. КСС модельованої СДЛ розраховується в два етапи.

На першому етапі створюється каталог КСС одиничних світлодіодів різних модифікацій, з яких передбачається створювати СДЛ.

На другому етапі в точках спостереження здійснюється розрахунок сили світла від усіх світлодіодів лампи.

Другий етап завдання здійснюється у відповідності з розробленою методикою:

— розрахунок координат точок спостереження залежно від кута спостереження для заданого крока зміни кута;

— розрахунок координат точок підстав світлодіодів для заданих точок світіння світлодіода і кута нахилу осі світлодіода до осі лампи;

— розрахунок кутів між світловими векторами від кожного світлодіода і вектором, задаючого вісь світлодіода.

Застосування розробленої методики дозволяє розрахувати КСС від СДІ для любых умов застосування. Розрахунок КСС для СДІ зводиться до розрахунку сили світла в будь-якій точці середовища пропускання  $A_i$  з координатами  $(x_a, y_a, z_a)$  в системі координат, у якій вісь  $OZ$  співпадає з віссю лампи. Точка початку координат є уявним центром світимості лампи, який може бути вибраний довільно в області площини розміщення діодів. Площина  $XOY$  перпендикулярна осі  $OZ$  і проходить через точку нуль осі  $OZ$ . Напрямок осі  $OX$  вибирається довільно. Алгоритм, застосований в завданні для розрахунку точок спостереження  $A_i$  середовища пропускання, заснований на твердженні, що ці точки знаходяться в площині  $XOZ$ .

Для розрахунку координат точок світіння середовища пропускання застосовано алгоритм розрахунку координат, який полягає в знаходженні координат рівновіддалених точок середовища пропускання, при обертанні їх навколо початку координат. Для того, щоб скористатися цим алгоритмом задаються наступні величини [2]:

— відстань до точок розрахунку  $R$  від нульової точки системи координат;

— крок зміни кута при руху точці розрахунку навколо точки нульової осі  $OZ$ . На основі кроку виконується розрахунок кута між точкою розрахунку і негативним напрямом осі  $OZ$ .

По теоремі косинусів визначаються відстані до точок розрахунку та їх координат.

$$a = -R \cdot \cos(\gamma) \quad (2)$$

На рис. 2 зображена геометрична інтерпретація отримання координат точок розрахунку в результаті обертання точці розрахунку навколо центру координат.

Координати двох точок простору, вказані в певному порядку, задають єдиний вектор. Таким чином, якщо задати дві точки, що лежать на лучі осьової сили світла світлодіода. Цього достатньо для завдання напрямку осі світлодіода. Точка кінця вектора світлодіода повинна задаватися як координати оптичного центру світлодіода. Точка початку вектора світлодіода може бути вибрана довільно, але обов'язково повинна належати лучу осьової сили світла світлодіода. Для визначення координат точки початку вектора світлодіода в завданні кутом між осями світлодіода і лампи розраховується кут, отриманий в результаті проведення площини крізь вісь  $OZ$  і точку оптичного центру світлодіода. Із точки оптичного центру світлодіода відновлюється перпендикуляр до осі  $OZ$ . Гіпотенузою цього трикутника виступатиме відрізок геометричного променя з точки оптичного центру світлодіода до осі  $OZ$ . Кут між гіпотенузою і віссю  $OZ$  задається при конструюванні лампи і є кутом нахилу осі світлодіода до осі лампи. Точкою початку вектора світлодіода, виходячи з цієї побудови, являється точка перетину гіпотенузи з віссю  $OZ$ . Позначивши точку оптичного центру світлодіода координатами  $D_s(x_s, y_s, z_s)$  і використовуючи теорему тангенсів для прямокутного трикутника, знаходимо величину катета, що належить осі  $OZ$  у вигляді:

$$b = a \cdot \operatorname{tg}(\gamma) \quad (3)$$

де  $a$  — довжина катета, яку можна знайти з координат точки оптичного центру світлодіода.

У площину  $XOY$  проєкція точки оптичного центру діода має координати, відповідно  $x_s$  і  $y_s$ , довжина вектора від оптичного центру до осі  $OZ$ , дорівнює  $\sqrt{(x_s^2 + y_s^2)}$ . Таким чином, катет  $b$  визначається, як:

$$b = \operatorname{tg}(x_s^2 + y_s^2) \quad (4)$$

Координати точки перетину гіпотенузи з віссю  $OZ$  ( $0, 0, z_s + b$ ). На рис. 3 зображена геометрична інтерпретація отриманих координат точок основаній світлодіодів.

Можна задати координати точки початку вектора діода просто з геометричного зображення лампи. У завданні застосовується розрахунок координат точки початку вектора діода для кожного діода лампи по описаному алгоритму, якщо задані координати точки оптичного центру діода і кут нахилу осі діода до осі лампи. При завданні координат точок початку і кінця вектора

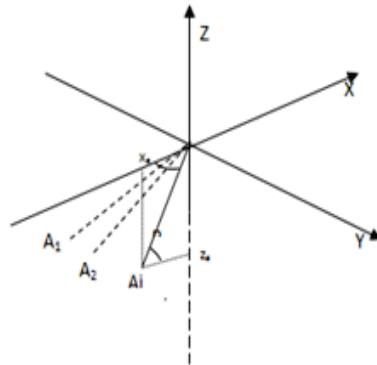


Рис. 2 – Визначення координат точки розрахунку

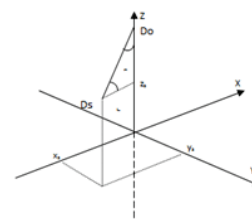


Рис. 3 – Визначення координат точки основи світлодіода

діода з геометричної побудови лампи, необхідність завдання кута нахилу осі діода до осі лампи відповідає.

Для розрахунку сили світла від оптичного центру світлодіода до точки розрахунку, визначається кут між вектором, задаючим вісь світлодіода і вектором з точки оптичного центру світлодіода до точки розрахунку.

Кут між векторами в просторі знаходиться, використовуючи поняття скалярного множення векторів у відповідності з цим, скалярним добутком двох векторів  $a(x_a, y_a, z_a)$  і  $b(x_b, y_b, z_b)$  є сума мнужень відповідних координат векторів:  $ab = x_a * x_b + y_a * y_b + z_a * z_b$ . З іншого боку, скалярним добутком цих векторів є добуток довжин векторів помножений на косинус кута між ними:

$$ab = |a| \cdot |b| \cdot \cos(\alpha) \quad (5)$$

Для знаходження кута між віссю світлодіода і вектором з оптичного центру світлодіода в точку спостереження, визначаються точки початку і кінця для кожного з векторів. На рис. 4 зображена геометрична інтерпретація отримання кута між векторами, задаючими вісь світлодіода і вектором з оптичного центру світлодіода, спрямованого в точку спостереження (вектор спостереження). Перший вектор задає вісь світлодіода і належить променю осьової сили світла світлодіода. Вектор, проведений з будь-якої точки, що лежить на промені осьової сили світла світлодіода  $Do$  до оптичного центру світлодіода  $Ds$ . Другий вектор — з точки оптичного центру світлодіода  $Ds$  до точки спостереження  $Ai$ .

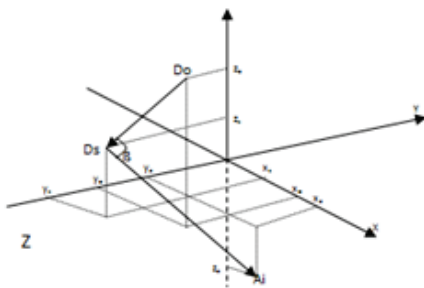


Рис. 4 – Визначення кута між віссю світлодіода і вектором розрахунку

Координати точок, що визначають обидва вектори:  $Ds(x_s, y_s, z_s)$  — точка оптичного центру світлодіода;  $Do(x_o, y_o, z_o)$  — точка основи світлодіода;  $Ai(x_i, y_i, z_i)$  — точка розрахунку (точка, в якій розраховується сумарна сила світла від світлодіодів розміщених в лампі).

Координати вектора світлодіода  $D(Do, Ds)$  і вектора розрахунку  $A(Ds, Ai)$  знаходяться використовуючи координати точок початку і кінця вектора:

$$D(x_s - x_o, y_s - y_o, z_s - z_o) \quad A(x_i - x_s, y_i - y_s, z_i - z_s)$$

Визначивши довжини векторів обчислюється їх скалярний добуток:  $DA = |D| * |A| * \cos(\beta)$

Використовуючи раніше знайдені довжини векторів і функцію  $\arccos$ , знаходиться необхідний кут. Використовуючи отриманий кут між вектором, що задає вісь світлодіода і

вектором з точки оптичного центру світлодіода до точки спостереження і провівши інтерполяцію з використанням функції апроксимації кубічного сплайна для вибраного світлодіода, вичисляємо силу світла від конкретно взятого світлодіода у вибраній точці спостереження. Підсумовуючи значення, отриманих сил світла від усіх світлодіодів СДЛ, отримуємо силу світла в даній точці спостереження.

Розроблений метод знаходження кута між вектором, який задає вісь світлодіода і вектором з точки оптичного центру світлодіода до точки спостереження, не залежить від методів розрахунку координат точок спостереження і точок підстав світлодіодів. Тому, він може бути застосований для будь-яких довільно вибраних точок спостережень, підстав світлодіодів і середовища їх розташування, що робить алгоритм придатним для розрахунку світлорозподілу від світлодіодних систем бактерицидного знезараження води.

## ВИСНОВКИ

1. Проведені дослідження дозволили встановити вимоги до бактерицидних установок.
2. Для визначених умов та призначення запропоновано структуру енергоефективної бактерицидної установки на основі ультрафіолетових світлодіодних джерел світла, що забезпечує розосереджене багаторівневе знезараження води.
3. Розроблена методика моделювання КСС СД СП по відомій КСС одиничного світлодіода і обґрунтована можливість її застосування для розрахунку і проектування бактерицидних установок на основі СД.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зеленков І. А. Електротехнологічні опромінювальні установки / І. А. Зеленков. — К : Вища школа, 2004. — 101 с.
2. Говоров Ф. П. Моделирование параметров и характеристик световых приборов на основе энергосберегающих светодиодных источников света / Ф. П. Говоров, Н. И. Носанов, Т. И. Романова, О.В. Король // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». Ч. 2. — Київ : ІЕДНАН України, 2012. — С. 95—101.

### SPYSOK LITERATURY

1. Zelenkov I. A. Elektrotekhnolohichni oprominyval'ni ustanovky / I. A. Zelenkov. — K : Vyshcha shkola, 2004. — 101 s.
2. Govorov F. P. Modelyrovanye parametrov y kharakterystyk svetovykh pryborov na osnove enerhosberehayushchykh svetodyodnykh ystochnykov sveta / F. P. Govorov, N. Y. Nosanov, T. Y. Romanova, O. V. Korol' // Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist». Ch. 2. — Kyiv : IEDNAN Ukrayiny, 2012. — S. 95—101.

Надійшла до редакції 2.12.2015 р.

**ГОВОРОВ ПИЛИП ПАРАМОНОВИЧ** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропостачання міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: govorov\_fp@mail.ru

**КОРОЛЬ ОЛЬГА ВІКТОРІВНА** — науковий співробітник науково-дослідної частини, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна,

**РОМАНОВА ТЕТЯНА ІВАНІВНА** — к-т техн. наук, науковий співробітник науково-дослідної частини, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна.