

## ПРОГНОЗУВАННЯ КОРИСНОГО СТРОКУ СЛУЖБИ УЛЬТРАФІОЛЕТОВИХ ЛАМП У ФОТОБІОЛОГІЧНИХ І ФОТОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

**А. О. СЕМЕНОВ**, кандидат фізико-математичних наук, доцент;

**Г. М. КОЖУШКО**, доктор технічних наук, професор;

**Т. В. САХНО**, доктор хімічних наук,  
старший науковий співробітник;

**Г. О. БІРТА**, доктор сільськогосподарських наук, професор

(Вищий навчальний заклад Укоопспілки

«Полтавський університет економіки і торгівлі»)

**Анотація.** У роботі представлено результати прогнозування корисного строку служби ультрафіолетових розрядних ламп низького тиску за спадом променевого потоку. Мета статті – дослідження спаду променевого потоку ртутних розрядних ламп низького тиску у процесі горіння та вибір математичної моделі спаду УФ-С потоку для прогнозування корисного строку служби цих ламп. У дослідженнях використано метод математичної екстраполяції. Представлено математичну модель, що дає можливість оцінювати корисний строк служб ультрафіолетових ламп низького тиску. Корисний строк служби УФ-ламп можна оцінювати за незавершеними випробуваннями після 2 500–3 000 год. Корисний строк служби для досліджених ламп за зниження променевого потоку до 70 % початкового значення становив 8,3 тис. год і відповідно до 80 % – 4,6 тис. год.

**Ключові слова:** УФ-випромінювання, променевий потік, строк служби, метод найменших квадратів.

**Постановка проблеми в загальному вигляді та зв'язок із найважливішими науковими чи практичними завданнями.** Для проектування опромінювальних установок із використанням ультрафіолетового випромінювання діапазону С важливо знати, як змінюється променевий потік джерела у процесі строку служби. Сьогодні як джерела УФ-С випромінювання широко використовуються ртутні розрядні лампи низького тиску в колбах із кварцевого й увіолевого скла [1, 2]. Відомо, що у процесі роботи відбувається зниження потоку ультрафіолетового випромінювання через окислення ртуті в лампі й осідання продуктів реакції на внутрішню поверхню колби, що знижує прозорість скла під дією УФ-випромінювання та інших факторів [3].

Бактерицидна доза ультрафіолетових ламп залежить від потужності променевого потоку й часу опромінення. Ці параметри й визначають ефективність дії ультрафіолетових ламп [2, 4].

Вищевказані фактори, зокрема механізм і

ступінь впливу для різних конструкцій ламп, режимів живлення, а також умов експлуатації, недостатньо вивчені. Актуальність роботи визначається необхідністю здійснення досліджень зміни променевого потоку у процесі експлуатації ультрафіолетових ламп і прогнозування їх корисного строку служби.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Для ламп, що використовуються в опромінювальних установках фотобіологічної та фотохімічної дії [4, 5], наприклад, в установках бактерицидного знезараження води [6], повітря [7, 8] та передпосівного опромінювання насіння сільськогосподарських культур [9], важливо знати параметри УФ-С потоку у процесі роботи та прогнозувати час, протягом якого можна експлуатувати конкретні типи ламп і забезпечувати необхідний рівень опроміненості, тобто прогнозувати корисний строк служби ламп. Корисний строк служби – це час, протягом якого променевий потік лампи за певних режимів живлення й умов експлуатації не зменшується

нижче встановленого рівня, наприклад, 60 %, 70 % або 80 % початкового значення.

Виробники ультрафіолетових ламп низького тиску декларують строк служби ламп на рівні 10-12 тис. год, але без відповідних протоколів випробувань спаду променевого потоку. Ця величина викликає недовіру споживачів.

**Формування цілей статті (постановка завдання).** Мета статті – дослідження спаду променевого потоку ртутних розрядних ламп низького тиску у процесі горіння та вибір математичної моделі спаду УФ-С потоку для прогнозування корисного строку служби цих ламп.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Відпалити розрядні лампи низького тиску потужністю 20 Вт у схемі з електронним ПРА.
2. Провести дослідження зниження променевого потоку УФ-С після 100 год і далі через кожні 500 год.
3. Отримані результати апроксимувати математичною моделлю.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Математичну модель спаду променевого потоку УФ-С розрядної лампи низького тиску можна побудувати, використовуючи метод математичної екстраполяції [10].

Рекомендованим методом прогнозування строку служби за спадом променевого потоку є підбір емпіричної експоненціальної для опису отриманих даних за спадом променевого потоку окремо для кожної умови випробування. Подальша екстраполяція цієї підібраної функції до моменту часу, коли променевий потік зменшується до мінімального прийняттого рівня (наприклад 70 % від початкового значення), дозволяє оцінити величину корисного строку служби ультрафіолетових ламп низького тиску.

На основі значень променевого потоку  $F_1, F_2 \dots F_m$ , отриманих вимірюваннями в момент часу  $t_1, t_2 \dots t_m$ , потрібно підібрати таку функцію  $F = F(t)$ , яка описує процес не тільки всередині інтервалу часу  $(t_1, t_m)$  але й поза ним (у точках  $t_{m+1}, t_{m+2} \dots t_{m+m}$ ). Точність оцінювання променевого потоку значною мірою залежить від підбору емпіричної функції. Вид функції можна приблизно визначити, якщо помістити дані вимірювання в декартову систему координат і з'єднати їх плавною кривою, а по-

тім порівняти отриману криву із графіком уже відомої функції.

За допомогою комп'ютерних програм можна знайти коефіцієнти одночасно для кількох видів емпіричних формул і порівняти розраховані за ними значення з даними вимірювань. Для цього виникає необхідність розробки алгоритмів розрахунку зазначених коефіцієнтів. Найбільшого застосування (за порівняно нескладних розрахунків) отримав метод найменших квадратів.

Під час обробки результатів вимірювань із виявлення функціональної залежності між параметрами необхідно розрахувати значення середньоквадратичного відхилення  $\sigma$ , відхилення в кожній точці  $\varepsilon$ , а також відносну похибку між вимірюваними й розрахунковими даними. За величиною середньоквадратичного відхилення можна розглядати близькість розміщення експериментальних і розрахункових точок, а за знаками відхилень – розміщення експериментальних і розрахункових точок відносно графіка емпіричних функцій.

Обробку експериментальних даних із виявлення закону спаду променевого потоку доцільно спочатку проводити за результатами завершених досліджень. Вибір функції здійснюється як за величиною середньоквадратичного відхилення, так і за значенням відносної похибки у вимірюваних точках.

Після вибору функції виникає питання встановлення передісторії, тобто визначення кількості точок вимірювання променевого потоку у процесі горіння ламп, за якими будуватиметься тренд. Зазвичай, чим більша тривалість передісторії, тим точніший прогноз.

Як приклад прогнозування корисного строку служби за спадом світлового потоку можна взяти методики для світлодіодних модулів [11]. Під час цього строку служби визначається як період часу, протягом якого джерело світла випромінює задану величину світлового потоку.

Нами була взята за основу методика прогнозування спаду світлового потоку світловипромінювальних діодів, яка описана в [9, 12], де рекомендованим методом прогнозування корисного строку служби за спадом світлового потоку є підбір емпіричної експоненціальної кривої для опису отриманих даних щодо спаду світлового потоку для кожної умови випробувань.

Експериментальні дані, які використовуються для описуваної екстраполяції, спочатку

нормалізуються до одиниці (100 %) за 0 год горіння для кожного зразка в межах даної вибірки, потім усереднюються в кожній точці вимірювань спаду світлового потоку.

Подальша екстраполяція цієї підбраної функції до моменту часу, де променевий потік зменшується до певного прийнятого рівня (наприклад, до 80, 70 або 60 % від початкового потоку), дозволяє оцінити величину корисного строку служби. Підбір емпіричної експоненціальної кривої спаду променевого потоку  $F(t)$  за час  $t$ , яка має загальний вигляд

$$F(t) = B \exp(-\alpha t) \quad (1)$$

здійснюється знаходженням величини  $B$  – початкової постійної, і  $\alpha$  – постійної швидкості спаду променевого потоку за методом найменших квадратів. Після розрахунку постійних  $B$  та  $\alpha$  шукане значення тривалості горіння (строку служби  $\tau_p$ ), протягом якого відбувається зменшення до заданого рівня променевого потоку, розраховується за формулою:

$$\tau_p = \frac{\ln\left(100 \frac{B}{p}\right)}{\alpha}, \quad (2)$$

де  $p$  – деякий заданий рівень від початкового значення променевого потоку.

Отже, за рекомендованого критичного рівня  $p = 0,7$  від початкового значення потоку маємо:

$$\tau_{70} = \frac{\ln\left(100 \frac{B}{0,7}\right)}{\alpha}. \quad (3)$$

Підбір за методом найменших квадратів здійснюється так: узявши логарифм від обох частин співвідношення (1) отримаємо:

$$\ln F(t) = \ln B \exp(-\alpha t). \quad (4)$$

Позначивши  $\ln F(t) = y$ ,  $-\alpha = m$ ,  $b = \ln B$ , отримуємо рівняння прямої лінії:

$$y = mx + b. \quad (5)$$

Для набору  $n$  експериментальних точок на графіку  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , ...,  $(x_n, y_n)$  метод найменших квадратів для величин  $m$  та  $b$  дасть відповідно:

$$m = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, \quad (6)$$

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{n}, \quad (7)$$

де  $n$  – загальна кількість усереднених експериментальних точок  $x_k = t_k$ ,  $y_k = \ln F_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Провівши необхідні розрахунки та зворотні перетворення, знаходимо  $B = \exp b$ ,  $\alpha = -m$ .

Нами проведені дослідження зниження променевого потоку УФ-С у процесі горіння розрядних ламп низького тиску потужністю 20 Вт типу ZW20D15W(Y) у схемі з електронним ПРА торговельної марки «Tridonic». Колби ламп виготовлені із кварцового скла. Випробування ламп проводили за напруги живлення 220 В, у режимі 8-разового вимикання протягом доби на час по 15 хв. Вимірювання потоку випромінювання в діапазоні довжин хвиль УФ-С проводили з використанням радіометра енергетичної освітленості ультрафіолетового діапазону (Тензор-31) згідно з [13] після 100 год, 500 год і далі через кожні 500 год до 6 000 год.

Отриманий прогноз корисного строку служби досліджених УФ-ламп за стабільністю променевого потоку до рівня 0,6 початкового значення становить 12,5 тис. год, до рівня 0,7 – 8,3 тис. год, до рівня 0,8 – 4,6 тис. год.

Результати вимірювання променевого потоку та результат розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

### Результати вимірювання променевого потоку та розрахунків під час підбиранні емпіричної кривої методом найменших квадратів

Час, год	Потік, відн. од.	$\ln F(t)$	$x$	$y$	$xy$	$x^2$
100	1					
500	0,97	-0,0305	500	-0,03	-15,3	250 000
1 000	0,93	-0,0726	1 000	-0,07	-72,6	1 000 000
1 500	0,92	-0,0834	1 500	-0,08	-125,1	2 250 000
2 000	0,90	-0,1054	2 000	-0,11	-210,8	4 000 000
2 500	0,88	-0,1278	2 500	-0,13	-319,5	6 250 000

Продовж. табл. 1

Час, год	Потік, відн. од.	$\ln F(t)$	$x$	$y$	$xy$	$x^2$
3 000	0,86	-0,1508	3 000	-0,15	-452,4	9 000 000
3 500	0,85	-0,1625	3 500	-0,16	-568,8	12 250 000
4 000	0,82	-0,1985	4 000	-0,20	-794,0	16 000 000
5 000	0,79	-0,2357	5 000	-0,24	-1178,5	25 000 000
6 000	0,75	-0,2877	6 000	-0,29	-1726,2	36 000 000
Суми		-1,4549	25 000	-1,46	-5463,2	112 000 000
$m$						-0,0000366
$b$						-0,0545
$a$						0,0000366
$B$						0,9469585
$\tau_{60}$						12 467,9
$\tau_{70}$						8 256,15
$\tau_{80}$						4 607,75

Розрахунки проводили за результатами вимірювання до 3 000 год. Для оцінки точності прогнозу випробування продовжили до 6 000 год та оцінили відносну похибку прогнозу від експериментальних даних у точках вимірювання. Похибка не перевищувала  $\pm 3\%$ .

**Висновки із зазначених проблем і перспективи подальших досліджень у поданому напрямі.** Описана математична модель прогнозування корисного строку служби ультрафіолетових ламп за стабільністю променевого потоку. Ця методика дає можливість оцінити корисний строк служби ультрафіолетових ламп низького тиску за результатами їх випробувань на спад променевого потоку, спричиненого деградацією матеріалів у лампах у процесі їх функціонування.

Корисний строк служби УФ-ламп у діапазоні спектра УФ-С можна оцінювати за незавершеними випробуваннями після 2 500-3 000 год за результатами спаду променевого потоку з точністю до  $\pm 3\%$ . Корисний строк служби (за зниження променевого потоку до 70 % початкового значення) для досліджених ламп становить 8,3 тис. год.

У подальшому планується провести дослідження ультрафіолетових ламп низького тиску у схемі з електромагнітним дроселем для визначення ефективності використання різних схем включення в установках фотохімічної й фотобіологічної дії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ультрафиолетовые технологии в современном мире : коллективная монография / [Ф. В. Кармазинов, С. В. Костюченко, Н. Н. Кудрявцев, С. В. Храменков]. – Долгопрудный : Из-во Дом «Интеллект». – 2012. – 392 с.
2. Вассерман А. Л. Ультрафиолетовое излучение в профилактике инфекционных заболеваний / А. Л. Вассерман, М. Г. Шандала, В. Г. Юзбашев. – Москва : Медицина, 2003. – 208 с.
3. Причины проявления «тусклых» энергоэкономичных люминесцентных ламп и рекомендации по их устранению / [Ю. А. Мещеряков, А. С. Федоренко, И. Ф. Голикова и др.] // Расчет параметров и конструирование источников света. Труды ВНИИИС. – Саранск, 1989. – Вып. 21. – С. 61–72.
4. Семенов А. О. Безозонні бактерицидні лампи для установок фотохімічної і фотобіологічної дії / А. О. Семенов, Г. М. Кожушко, Л. В. Баля // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 4/1 (24). – С. 4–7.
5. Семенов А. О. Аналіз ролі УФ-випромінювання на розвиток і продуктивність різних культур / А. О. Семенов, Г. М. Ко-

жушко, Т. В. Сахно // Світлотехніка та електроенергетика. – 2017. – № 2. – С. 3–16.

6. Semenov A. A. Device for germicidal disinfection of drinking water by using ultraviolet radiation / A. A. Semenov, G. M. Kozhushko, T. V. Sakhno // Вестник Карагандинского университета. Сер. : Физика. – 2016. – № 1 (81). – С. 77–80.
7. Семенов А. О. Пристрої для бактерицидного знезараження повітря ультрафіолетовим випромінюванням / А. О. Семенов, Г. М. Кожушко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 3. – № 10 (69). – С. 13–17.
8. Semenov A. A. Bactericidal irradiators for ultraviolet disinfection of indoor air / A. A. Semenov, G. M. Kozhushko // European Applied Sciences. – 2013. – Т. 13. – № 1. – P. 226–228.
9. Семенов А. О. Ефективність проростання насіння ріпаку при передпосівному опроміненні його УФ-випромінюванням різного спектрального складу / А. О. Семенов, Г. М. Кожушко, Т. В. Сахно // Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2018. – № 3 (90). – С. 27–31.
10. Мальков М. Спад светового потока светодиодных сборок и долгосрочное прогнозирование их срока службы / Михаил Мальков // Lumen & expertunion. – 2012. – 1 июня. – С. 123–136.
11. Модулі світлодіодні загального освітлення. Вимоги щодо характеристик. LED modules for general lighting. Performance requirements [Електронний ресурс] : IEC/PAS 62717:2011. – Режим доступу: [webstore.iec.ch/publication/20755](http://webstore.iec.ch/publication/20755) (дата звернення: 18.09.2018). – Назва з екрана.
12. Kailin Pan. Study on Reliability and Lifetime Prediction of High Power LEDs / Kailin Pan, Yu Guo, Weitao Zhu, Xin Wang, Bin Zhou // TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. – 2014. – V. 12. – № 2. – P. 1132–1142.
13. Джерела ультрафіолетового випромінювання: методика виконання вимірювань параметрів ультрафіолетового випроміню-

вання. МВУ 11-038-2007, ННЦ «Інститут метрології». – Харків, 2007. – 33 с.

## REFERENCE

1. Karmazynov, F. V., Kostjuchenko, S. V., Kudrjavcev, N. N., Hramenkov, S. V. (2012). *Ul'trafiyoletovyye tehnologyy v sovremennom myre: Kollektivnaya monografyja*. Dolgoprudnyy: Yz-vo Dom "Yntellekt", 392.
2. Vasserman, A. L., Shandala, M. G, Juzbachev, V. G. (2003). *Ul'trafiyoletovoe izluchenie v profilaktike infekcionnyh zabojevanij*. Moscow : Medicina, 208.
3. Mescheriakov, Yu. A. Fedorenko, A. S., Holykova, Y. F., Uvarova V. Y., Prytkov A. A. (1989). *Prychyny proiavleniya "tusklykh" enerhoekonomychnykh liumynestsentnykh lamp y rekomendatsyy po ykh ustranenyiu. Raschet parametrov y konstruyrovanye ystochnykov sveta*. Trudy VNYYYS, Vol. 21, 61–72.
4. Semenov, A. O., Kozhushko, G. M., Balja, L. V. (2015). Bezozonni baktericidni lampi dlja ustanovok fotohimichnoi i fotobiologichnoi dii. *Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*, 4/1 (24), 4–7.
5. Semenov, A. O., Kozhushko, G. M., Sakhno, T. V. (2017). Analiz roli UF-vyprominiuvannia na rozvytok i produktyvnist' riznykh kul'tur. *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka*, 2, 3–16.
6. Semenov, A. O., Kozhushko, G. M., Sakhno, T. V. (2016). Device for germicidal disinfection of drinking water by using ultraviolet radiation. *Vestnyk Karahandynskoho unyversyteta : Seryia "Fyzyka"*, 1 (81), 77–80.
7. Semenov, A. O., Kozhushko, G. M. (2014). Prystroi dlja bakterytsydnoho znezarazhennia povitria ul'trafiyoletovyim vyprominiuvanniam. *Skhidno-Yevropejs'kyj zhurnal peredovykh tekhnolohij*, 3, 10 (69), 13–17.
8. Semenov, A. A., Kozhushko, G. M. (2013). Bactericidal irradiators for ultraviolet disinfection of indoor air. *European Applied Sciences*, 13, 1, 226–228.

9. Semenov, A. O., Kozhushko, G. M., Sakhno, T. V. (2018). Efektyvnist' prorostannia nasinnia ripaku pry peredposivnomu oprominenni joho UF-vyprominenniam riznoho spektral'noho skladu. *Visnyk Poltavs'koi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, 3 (90), 27–31.
10. Mal'kov M. (2012) Spad svetovoho potoka svetodyodnykh sborok y dolhosrochnoe prohozyrovanye ykh sroka sluzhby. *Lumen & expertunion*, 1, 123–136.
11. IEC/PAS 62717:2011. *Moduli svitlodiodni zahal'noho osvittlenia. Vymohy schodo kharakterystyk*. Available: [webstore.iec.ch/publication/20755](http://webstore.iec.ch/publication/20755).
12. Kailin, Pan, Yu, Guo, Weitao, Zhu, Xin, Wang, Bin, Zhou. (2014). Study on Reliability and Lifetime Prediction of High Power LEDs. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 12, 2, 1132–1142.
13. MVU 11-038-2007. *Dzherela ul'trafiolietovoho vyprominiuvannia : metodyka vykonannia vymiriuvan' parametriv ul'trafiolietovoho vyprominiuvannia*. (2007). Kharkiv: NNTs "Instytut metrolohii", 33.

**А. А. Семенов**, кандидат физико-математических наук, доцент; **Г. М. Кожушко**, доктор технических наук, профессор; **Т. В. Сахно**, доктор химических наук, старший научный сотрудник; **Г. А. Бирта**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Высшее учебное заведение Укоопсоюза «Полтавский университет экономики и торговли»). **Прогнозирование полезного срока действия ультрафиолетовых ламп в фотобиологических и фотохимических процессах.**

**Аннотация.** В работе представлены результаты прогнозирования полезного срока службы ультрафиолетовых разрядных ламп низкого давления за спадом лучевого потока. Цель статьи – исследование спада лучевого потока ртутных разрядных ламп низкого давления в процессе горения и выбор математической модели спада УФ-С потока для прогнозирования полезного срока службы этих ламп. В исследованиях использован метод математической экстраполяции. Представлена математическая модель, которая дает возможность оценивать полезный срок службы ультрафиолетовых ламп низкого давления. Полезный срок службы УФ-ламп можно оценивать по незавершенным испытаниям после 2 500-3 000 ч. Полезный срок службы для исследованных ламп при снижении лучистого потока до 70 % начального значения составил 8,3 тыс. ч. и в соответствии с 80 % – 4,6 тыс. ч.

**Ключевые слова:** УФ-излучение, лучевой поток, срок службы, метод наименьших квадратов.

**A. Semenov**, PhD, Associate Professor; **G. Kozhushko**, Dc. Tech. Sci., Professor; **T. Sakhno**, Dc. Chem. Sci., SRF; **G. Birta**, Dc. Agr. Sci., Professor (Poltava University of Economics and Trade). **The prediction of the useful lifetime of ultraviolet lamps in photo-biological and photo-chemical activities.**

**Annotation.** The paper presents the results of the prediction of the useful lifetime of ultraviolet discharge lamps at low pressure for reducing the radiation flux. It is important to know how to change the radiation flux of the source during the service life for the design of irradiation installations using ultraviolet radiation of the C range. The bactericidal dose of ultraviolet lamps depends on the power of the radiation flux and the irradiation time. These parameters and determine the effectiveness of ultraviolet lamps. The aim of the study: determination of the decrease of the radiation flux of low pressure mercury discharge lamps in the combustion process and the choice of the mathematical model of UV-C flux to predict the useful life of these lamps. Research methodology: the mathematical model of prediction of the useful life of ultraviolet lamps for the stability of the beam is described. This technique makes it possible to evaluate the useful life of ultraviolet lamps of low pressure, based on their test results, on the decay of the radiation flux caused by the degradation of materials in the lamps during their operation. A mathematical model is presented, which makes it possible to evaluate the useful life of ultraviolet light pressure lamps. The useful life of UV lamps in the range of the UV-C spectrum can be estimated from unfinished tests after 2 500-3 000 hours. By the results of a decrease in the radiation flux with an accuracy of  $\pm 3\%$ . A useful lifetime for the tested lamps with a decrease in the radiant flow to 70% of the initial value was 8,3 thousand h. and according to 80 % – 4,6 thousand hours.

**Keywords:** UV radiation, ray flux, service life, least squares method.