

References

1. Jastrzebski K., (2024) Cłapa M., Kaczmarek L., Kaczorowski W., Sobczyk-Guzenda A., Szymanowski H., Zawadzki P., Kula O., Spatial Graphene Structures with Potential for Hydrogen Storage, *Energies* 2024, 17, 2240. <https://doi.org/10.3390/en17102240>
2. Lekshmi GS. (2024) Engineering of brewery waste-derived graphene quantum dots with ZnO nanoparticles for treating multi-drug resistant bacterial infections. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12 (2).
3. Leyko J. (2023) An experimental device for evaluation of hydrogen sorption. *Metrology and Measurement Systems* 30: 367-376.
4. Kaczmarek L (2021) Functionalization Mechanism of Reduced Graphene Oxide Flakes with BF₃•THF and Its Influence on Interaction with Li⁺ Ions in Lithium-Ion Batteries. *Materials* 14 (3) 679.
5. Kaczmarek L. (2020) The Influence of the Size and Oxidation Degree of Graphene Flakes on the Process of Creating 3D Structures during Its Cross-Linking. *Materials* 13(3).
6. Kaczmarek L. (2019) The influence of the hydrogenation degree on selected properties of graphene as a material for reversible H₂ storage. *International Journal of Hydrogen Energy* 44(41).
7. Kaczmarek L. (2014) Functionality of graphene as a result of its heterogenic growth on SiC nanoparticles on the basis of reversible hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy* 39(34).

УДК 621.321

ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЇ ТА УТИЛІЗАЦІЇ СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Багіров Сабір Агабагір огли

кандидат технічних наук, доцент

Азербайджанський Технічний Університет

E-mail : sabirbagirov4@gmail.com

Постановка проблеми. За останні роки виробництво та застосування світлодіодних (СВД) виробів займає чільне місце у світлотехнічній промисловості [1]. Вони широко використовуються у зовнішньому та внутрішньому освітленнях, у технологічних процесах, у медицині, у сільському господарстві тощо. Їх поширення пов'язане з високою енергетичною ефективністю та якістю освітлення, зумовленим різновидом спектрального складу випромінювання [2, 3]. Якісне світло підвищує продуктивність праці, покращує настрій, позитивно впливає на тривалість сну [4, 5].

Аналіз світової літератури, міжнародних законодавчих актів показує, що окрім завдань підвищення енергоефективності та покращення якості світла ведуться інтенсивні дослідження для вирішення питань екології та утилізації, як у процесі виробництва, так і при виході з ладу СВД. Європейська Директива 2012/19/ EU спрямована на запобігання утворенню відходів електричного та електронного обладнання та скорочення цих відходів шляхом повторного використання, переробки та інших форм відновлення [6]. Директива, прийнята Європейським Союзом, обмежує зміст шкідливих речовин в електронному та електричному устаткуванні, має на меті скоротити забруднення, запобігти руйнуванню навколишнього середовища, отруєнню шкідливими речовинами та виникненню проблем зі здоров'ям людей, які працюють і користуються електричним та електронним обладнанням [7]. Директива 2009/125/ЄС націлена на скорочення негативного впливу на навколишнє середовище, встановлює вимогу до екологічного проектування при продажу або експлуатації джерел світла [8].

На 2025 рік очікується підвищення загальної кількості СВД насамперед за рахунок заміни ними при реконструкції існуючих освітлювальних установок та попиту, що росте, на високоякісні СВД [9]. У 2024 році обсяг світового ринку СВД освітлення досяг 90,3 млрд. доларів США. За даними IMARC Group до 2033 обсяг ринку досягне 183,7 млрд доларів США при середньорічному темпі зростання 8,2% в період 2025-2033 років [10]. Це означає, що при великому зростанні виробництва і застосування збільшується кількість СВД, що вийшли з ладу, і набуває актуальності питання екології та утилізації цих ламп і світильників.

Метою даної роботи є аналіз екології та утилізації відходів СВД та розробка заходів щодо підвищення ефективності процесів у цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За останні десять років активно обговорюються проблеми відходів СВД, що вийшли з ладу. Розглядається потенційний вплив компонентів на довкілля не тільки від СВД ламп, а також від люмінесцентних ламп, компактних люмінесцентних ламп та ламп розжарювання, пропонується вжити спеціальних заходів для їх утилізації після закінчення терміну служби [11-13]. Зазначається, що компактні люмінесцентні лампи та СВД класифікуються як небезпечні відходи через надмірний рівень свинцю, міді, цинку, ніж нормативна межа, одночасно лампа розжарювання не є небезпечною.

Нестача матеріальних ресурсів, небезпечні відходи, зміна клімату роблять актуальними розробки енергоефективних та малотоксичних освітлювальних установок [14]. Однак отримані результати відносяться до конкретних конструкцій СВД ламп і це обмежують загальні висновки. Рекомендується ширший аналіз світового ринку СВД технологій, провести всебічний огляд порівняння опублікованих досліджень щодо оцінки життєвого циклу.

Термін служби СВД, що відслужив, є новим типом електронних відходів і містить значну кількість цінних і небезпечних металів. Масова кількість термін служби СВД, що минув, вимагає належного управління та переробки, як з точки зору матеріальних ресурсів, так і з точки зору екології [15].

Прямою заміною СВД компактних люмінесцентних ламп і ламп розжарювання підтверджує збільшення номенклатури та масового виробництва СВД у всьому світі, відповідно, в результаті з кожним роком збільшується кількість термінів СВД, що минув, [16, 17]. Наведено металеві відходи лінійної СВД методом вилугування миш'яку, свинцю, міді та оцінено небезпечні характеристики токсичності. У лінійних СВД концентрація вилугування миш'яку, свинцю та міді були вищими за нормативний рівень, цих СВД можна віднести до небезпечних відходів [16]. Двома методами вилугування для порівняння результатів токсичності перевірено сурму, срібло, алюміній, мідь та отримано значні відмінності між двома використаними вилугувуючими складами. Характеристика також дозволила виявити наявність миш'яку, що вважається шкідливою речовиною для здоров'я. Показано необхідність переробки СВД відходів, як з погляду екології, так і з економічної точки зору через наявність критично важливих металів та потенціал їх відновлення [17].

Результати дослідження. Аналіз конструктивних елементів штучних джерел світла показує, що рівень безпеки відходів можна розділити на три групи: підвищена безпека, низька безпека, безпечна. СВД можна віднести до другої групи безпеки і рахувати з низьким ступенем безпеки (таблиця 1).

Таблиця 1 – Класи безпеки відходів відпрацьованих ламп

Класи безпеки	Характеристика відходів	Найменування
I	Підвищена безпека	Газорозрядні ртутні лампи
II	Низька безпека	СВД, галогенні лампи розжарювання
III	Безпечна	Вакуумні лампи розжарювання

З метою мінімізації утворення відходів, забруднення довкілля, досягнення збільшення терміну служби СВД необхідно:

1. Вести статистику, облік і контроль елементів і вузлів, що найчастіше вийшли з ладу; 2. Застосовувати високоефективні технології та використовувати якісні матеріали без погіршення якісних та кількісних показників; 3. Під час експлуатації проводити ремонт, технічне обслуговування, профілактику та чищення; 4. Впровадити принципи технологій замкнутого циклу для повторного використання ресурсів вторинної обробки; 5. Знайти можливі заміни небезпечних хімічних елементів та сполук безпечними аналогами; 6. Розробити технології, що відповідають сучасним екологічним вимогам; 7. У централізованому порядку організувати сортування відходів лише на рівні виробництва відділення небезпечних відходів від менш небезпечних.

Список використаних джерел

1. LED Lighting Market Report by Application (Retrofit, Retail and Hospitality, Outdoor, Offices, Architectural, Homes, Industrial), and Region 2025-2033. URL: <https://www.imarcgroup.com/led-manufacturing-plant> (дата звернення: 25.04.2025)
2. Неєжмаков П., Пітяков О., Шпак С., Кислиця С., Кожушко Г. Стан енергоефективності та якості світла світлодіодної продукції. Український метрологічний журнал. 2022. №1. стор. 12-19.
3. Багіров С.А., Шпак С.В., Кожушко Г.М., Кислиця С.Г., Эрмілова Н.В. Сучасний стан енергоефективності та якості світла світлодіодної продукції : Збірник наукових праць за матеріалами. III Міжнародної азербайджансько-української науково практичної конференції. 1-2 червня 2020 року. Баку-Полтава, 2020. С. 480-482.
4. Baghirov S., Kharchenko V., Shpak S., Pitiakov O., Kyslytsia S., Sakhno T., Kozhushko H. Influence of eco-design policy and energy labeling on the level of energy efficiency and functionality of LED lamps. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. April 2025. Issue 2. Volume 62. No 2. pp.42-59.
5. CIE158:2009, "Ocular Lighting Effects on Human Physiology and Behavior", p. 64, Vienna, Austria, 2009.
6. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast) Text with EEA relevance, Official Journal of the European Union, 27 July 2012, p. 38-71.
7. Restriction of hazardous substance in electrical and electronic equipment (RoHS). 18 December 2012. p. 28. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/rohs-directive_en#objectives (дата звернення: 25.04.2025)
8. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. 21 October 2009. p. 33. URL: https://www.ledinside.com/intelligence/2025/2/2025_02_19_2025lighting_en (дата звернення: 25.04.2025) URL: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/light-emitting-diode-global-market-report> (дата звернення: 25.04.2025)
9. Кожушко Г. М., Дугніст Л. В. Щодо перспектив розвитку ринку екологічно безпечних СВД-ламп в Україні. Сучасне Матеріалознавство та Товарознавство: Теорія, практика, освіта матеріали III Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. ПУЕТ. 22–23 березня 2016. Полтава, 2016. С. 246-251.
10. Baghirov S.A., Device and method for dosing mercury into a luminescent lamp. International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE).- March 2024.- Issue 58.- Volume 16.- Number 1.- p. 190-196.
11. Seong-Rin Lim, Daniel Kang, Oladele A. Ogunseitan, Julie M. Schoenung. Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED). Environmental Science and Technology. 2012. 47. P. 1040-1047.

12. Manuela Franz, Franz P. Wenzl. Critical review on life cycle inventories and environmental assessments of LED-lamps. Critical review in environmental science and technology. 2017. Vol. 47. No 21. P. 2017-2078.
13. Shen Fang, Wenyi Yan, Honbin Cao, Qingbin Song, Yi Zhang, Zhi Sun. Evalution on end-of-life LEDs by understanding the criticality and recyclability for metals recycling. Journal of Cleaner Production. 2018. 182. P. 624-633.
14. Yong Choi, Hyeong-Jin Choi, Seung-Whee Rhee. Estimation on hazardous characteristics of the components from linear type of end-of-life light-emitting-diode lamps. Journal of Material Cycles and Waste Management. March 2020. P. 307-314.
15. Rafaela Zamprogno Rebello, Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima, Luciana Harue Yamane, Renato Ribeiro Siman. Characterization of end-of-life LED lamps for the recovery of precious metals and rare earth elements. Resources, Conservation and Recycling. 2019. 153. P. 104557.

УДК 628.98

ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ОСВІТЛЕННЯ

Назаренко Леонід Андрійович,
доктор технічних наук, професор
Фелоненко Дмитро Юрійович,
аспірант

Ляшенко Олена Миколаївна,
кандидат технічних наук, доцент

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail: leonnaz@ukr.net

В наш час є велика кількість досягнень в розвитку нашого розуміння, як освітлення впливає на людину. Цьому сприяло відкриття нового фоторецептора в людській ретині. З технологічної точки зору, оригінальні електричні джерела світла, лампи розжарення, швидко зникають, в той же час як використання світлодіодів зростає стрімко і без границь. У вимірюваннях нова система фотометрії запропоновано для мезопічного бачення, і нові метрики введені для відчуття яскравості (світлоти) і кольорового передавання. В застосуваннях досліджені механізми впливу освітлювальних умов на людське самопочуття.

Незважаючи на численні спроби в експериментальному полі пошуків невізуального впливу світла на людину лише частково імплементована практика розвитку освітлювального продукту і світлового дизайну.

В наш час існують два фундаментальних підходи для опису і дослідження невізуального впливу.

Перший, запропонований проф. М. Реа [1], полягає в тому, що кількість циркадно-ефективного світла оцінюється в термінах циркадного світла (CLA 2.0). Подібно фотопічній освітленості, яка вимірюється в люксах, значення CLA 2.0 є спектрально зваженими миттєвими вимірюваннями опроміненості.

На відміну від фотопічної освітленості, яка має пік спектральної чутливості на довжині хвилі 555 нм, значення CLA 2.0 мають пік чутливості або на 460 нм, або 485 нм в залежності чи домінують короткі хвилі в «білому» спектрі світла. Відмітимо, що введена модель ніяким чином не прив'язана до Міжнародної системи одиниць (SI), що є суттєвим з точки зору можливості простежуваності вимірювань і міжнародних керівництв.

МКО запропонував вдосконалену стандартизовану метрологію [2,3], побудовану на концепції α -опік освітленості. Серцем підходу α -опік освітленості є функції спектральної