

УТИЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ ЯК АСПЕКТ ЕКОЛОГІЧНОЇ ПРОБЛЕМИ

Демчук Л. І.¹, Русецька Н. М.²

¹Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005
ke_dlm@ztu.edu.ua

²Житомирський агротехнічний коледж
вул. Покровська, 96, м. Житомир, 10031
rusya050@ukr.net

У статті розглянуто та систематизовано наукові підходи в необхідності вирішення проблеми стійкої утилізації електронних засобів, визначено поняття відходів електричного та електронного обладнання як екологічної категорії, наведено етапи життєвого циклу для типового електронного виробу з урахуванням його повторного використання.

Метою статті є обґрунтування утилізації електронних засобів.

Для досягнення поставленої мети було виконано наступні завдання:

- аналіз сучасних технологій утилізації відходів електронного та електричного обладнання;
- аналіз впливу на довкілля при утилізації відходів електронного та електричного обладнання;
- аналіз досвіду утилізації відходів електронного та електричного обладнання;
- розроблення рекомендацій щодо утилізації відходів електронного та електричного обладнання.

Досліджено міжнародний досвід розв'язання даної проблеми, зокрема проєкт «Best of 2 World». Визначено економічні переваги впровадження масштабного перероблення електронних відходів в Україні.

Було доведено, що стійка рециркуляція таких відходів може набути значення вторинного сировинного резерву для різних галузей промисловості, будівництва та енергетики.

Проаналізовано, що утилізація електронних засобів є важливою екологічною проблемою, оскільки вони містять шкідливі речовини, які можуть забруднювати навколишнє середовище та завдати шкоди здоров'ю людини.

Для розв'язання даної проблеми роз'яснено, що для утилізації електронних засобів необхідно вживати комплекс заходів, включаючи: створення ефективних систем збирання та перероблення електронних відходів, що дозволить відокремлювати цінні матеріали та безпечно утилізувати шкідливі речовини; прийняття законів, які регулюють утилізацію електронних засобів та встановлюють відповідальність за їх безпечне поводження; підвищення обізнаності населення про небезпеку електронних відходів та важливості їх правильної утилізації; розроблення та виробництво електронних пристроїв, які містять менше шкідливих речовин та є більш придатними для перероблення.

Проінформовано про те, що у багатьох країнах існують успішні програми з утилізації електронних відходів. Наприклад, в Європейському Союзі діє Директива про відходи електричного та електронного обладнання (WEEE), яка встановлює вимоги до збирання та перероблення електронних відходів. Міжнародний досвід свідчить, що динаміка обсягів відходів електронних виробів є синхронною динаміці проданих в окремій країні таких товарів, але з відставанням, що приблизно відповідає тривалості життєвого ци-

клу відповідного устаткування. Зокрема, Україна посідає 36 місце по споживанню електронної та комп'ютерної техніки, тому проблема утилізації електронних відходів набуває своєї актуальності як аспект екологічної проблеми.

Утилізація електронних засобів є серйозною екологічною проблемою, яка потребує комплексного розв'язання. Тільки спільними зусиллями зі сторони держави, бізнесу та громадян можна досягти успіху у вирішенні цього питання.

Ключові слова: перероблення відходів, важкі метали, циркулярна економіка, токсичні матеріали, ресурсозбереження, зелене виробництво.

Recycling of electronic equipment as an aspect of the environmental problem. *Demchuk L., Rusetska N.*

The article reviews and systematises scientific approaches to the need to address the problem of sustainable recycling of electronic means, defines the concept of waste electrical and electronic equipment as an environmental category, and presents the stages of the life cycle for a typical electronic product with due regard for its reuse.

The purpose of the article is to substantiate the recycling of electronic means.

To achieve this goal, the following tasks were set and completed:

- analysis of modern technologies for recycling waste electronic and electrical equipment;
- to analyse the environmental impact of recycling waste electronic and electrical equipment;
- analysis of the experience of recycling waste electronic and electrical equipment;
- development of recommendations for the disposal of waste electronic and electrical equipment for Ukraine.

International experience in solving this problem, in particular the Best of 2 World project aimed at developing an alternative solution to this problem, is studied. The economic benefits of introducing large-scale e-waste recycling in Ukraine are determined.

It is proved that sustainable recycling of such waste can become a secondary raw material reserve for a number of industries, construction and energy sectors.

It is analysed that the disposal of electronic means is an important environmental problem, since they contain harmful substances that can pollute the environment and harm human health.

To solve the problem, it is explained that the recycling of electronic equipment requires a set of measures, including: the creation of effective e-waste collection and recycling systems that will allow the separation of valuable materials and safe disposal of harmful substances; the adoption of laws regulating the recycling of electronic equipment and establishing responsibility for their safe management; raising public awareness of the dangers of e-waste and the importance of its proper disposal; development and production of electronic waste treatment facilities; and the development of new technologies.

The participants were informed that international experience shows that many countries already have successful e-waste recycling programmes. For example, the European Union has the Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive, which sets out requirements for the collection and recycling of electronic waste. International experience shows that the dynamics of waste electronic products is synchronous with the dynamics of such goods sold in a particular country, but with a lag that roughly corresponds to the life cycle of the relevant equipment. In particular, Ukraine ranks 36th in terms of consumption of electronic and computer equipment, so the problem of e-waste disposal is gaining relevance as an aspect of the environmental problem.

Recycling of electronic equipment is a serious environmental problem that requires a comprehensive solution. Only through joint efforts of the government, business and citizens can we succeed in this area and ensure safe e-waste management for the environment and human health.

Keywords: waste recycling, heavy metals, circular economy, toxic materials, resource conservation, green manufacturing.

Постановка проблеми

З розвитком технологій кількість електронних пристроїв, які використовуються, постійно зростає. Це призводить до збільшення кількості електронних відходів, які потребують утилізації. Електронні відходи містять небезпечні речовини, такі як свинець, ртуть, кадмій та інші важкі метали. Якщо ці речовини потрапляють у ґрунт або воду, вони можуть забруднити навколишнє середовище та завдати шкоди здоров'ю людини.

Крім того, неправильна утилізація електронних відходів може призвести до втрати цінних ресурсів (золото, срібло та інші метали).

Заводи з виготовлення електронної техніки порівняно з підприємствами інших галузей промисловості дають відносно невелику кількість викидів у навколишнє середовище. Більшість промислових виробництв розташовані у містах, тому природоохоронні заходи на таких підприємствах життєво необхідні.

Велика кількість процесів, операцій та матеріалів, що використовуються під час виготовлення електронних засобів, є джерелами величезної кількості речовин, що мають несприятливий вплив на людину та довкілля. Під час виготовлення елементної бази, електронних виробів, оброблення, вирощування напівпровідникових кристалів, виготовлення інтегральних схем у процесі гальванічного виробництва утилізація вихідних матеріалів часто відбувається з низьким коефіцієнтом використання. І як наслідок, величезна кількість відходів потрапляє у атмосферу, гідросферу, забруднює воду та ґрунт. Відтак, поряд із виснаженням природних запасів дефіцитних матеріалів відбувається забруднення навколишнього середовища, що веде до згубних наслідків для окремих екосистем та біосфери.

Негативний вплив на навколишнє середовище відбувається протягом усього життєвого циклу виробу, від придбання сировини, виготовлення виробу до його утилізації після закінчення терміну застосування.

Пошуки шляхів виходу із ситуації що склалася, призводять до висновку, що без знання екологічних принципів організації живої матерії, без усвідомлення професійної відповідальності кожного громадянина та учасника виробничого процесу неможливе подальше існування людства. Ці заходи повинні мати законодавчі обмежувальні документи, що регламентують процеси виробництва нової та утилізації відпрацьованої електронної продукції.

Актуальність дослідження

Виробництво електроніки протягом останніх 30 років стало певною мірою залежати від південно-китайського та американського ланцюга

постачання. Пандемія COVID-19 разом з глобальними економічними потрясіннями значно прискорила поляризацію Південного Китаю та Америки на два глобальні ланцюги постачання, особливо в галузі електроніки. Ці реалії надають Україні унікальну можливість стати ключовою євразійською технологічною, інфраструктурною, виробничою та агробізнесовою базою та перетворитися на важливу складову нової глобальної системи ланцюгів постачання.

Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР), що є найбільшим іноземним інвестором в Україні. Є думка, що європейські компанії повинні почати вирішувати проблеми з такими ланцюгами постачання, створивши «глобальний ланцюг вартості» із залученням до цього процесу нашу країну, яка має низку переваг:

- вдале географічне розташування;
- 19 Угод про вільну торгівлю із 46 країнами, включно з Поглибленою та всеохоплюючою зоною вільної торгівлі між Україною та Європейським Союзом (ЄС);
- наявність кваліфікованої робочої сили;
- конкурентні витрати на виробництво.

Усе це в поєднанні дає можливість Україні стати важливою виробничою платформою для виробництва електроніки, що орієнтується на внутрішній та експортний ринки.

Проте, ЄС споживає 43% експорту з України, отже наша країна вже є невід'ємною частиною європейського ланцюга постачання. Завдяки проведенню глибоких економічних реформ та імплементації Угоди про асоціацію Україна-ЄС, ще до пандемії інвестори вже розглядали Україну як стабільний та передбачуваний ринок, що розвивається. Низка вітчизняних та зарубіжних виробників електроніки вже мають в Україні свої виробничі потужності. Кількість таких компаній буде поступово зростати і Україна має перспективи на те, щоб стати ключовою ланкою в ланцюгах постачання у світі після завершення військових дій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні дослідження доводять, що проблеми утилізації електронних відходів як складової екологічного менеджменту досить широко розглядаються у працях таких вчених, як Хомяков В.,

Абалкін Л., Єремєєв І., Ящук Л., Краснянський М., Виговська Є., та інших. Вчені зробили значний внесок у розробку науково-практичних засад вирішення проблем поводження з електронними відходами. Але, попри великої кількості наукових розробок, проблеми формування економічного механізму управління електронними відходами залишаються невирішеними.

Новизна дослідження полягає в тому, що з'явилося кілька інноваційних підходів до утилізації електронних відходів, які допомагають зменшити їх негативний вплив на екологію.

Методологічне значення потребує в утилізації електронних засобів комплексного підходу, що поєднує знання з інженерії, хімії, екології, економіки та соціології. Це сприяє розвитку міждисциплінарних методів дослідження та вирішення складних проблем. Проблема утилізації електронних засобів є складною системою, що включає виробництво, споживання, збирання, перероблення та утилізацію. Такі дослідження потребують системного аналізу для виявлення ключових факторів та розроблення ефективних стратегій. Для управління проблемою утилізації електронних засобів необхідно розробляти моделі, які враховують різні сценарії та дозволяють прогнозувати наслідки різних рішень.

Загальнонаукове значення полягає в правильній утилізації електронних засобів. Неправильна утилізація може призвести до забруднення навколишнього середовища важкими металами та іншими шкідливими речовинами. Електронні засоби також містять цінні матеріали такі як, золото, срібло, мідь тощо. Їх повторне використання сприяє не тільки збереженню природних ресурсів але й зменшенню потреби у видобутку. Утилізація електронних засобів є важливим елементом циркулярної економіки, яка передбачає повторне використання матеріалів та зменшення кількості відходів. Забруднення навколишнього середовища шкідливими речовинами з електронних відходів може негативно впливати на здоров'я людини, спричиняючи важкі захворювання.

Загалом, утилізація електронних засобів є важливою проблемою, яка має значний вплив на екологічну безпеку, ресурсозбереження та здоров'я людини. Її дослідження та вирішення потребує комплексного підходу та міждисциплінарної співпраці.

Виклад основного матеріалу

Екологічні проблеми електронної промисловості стають дедалі гострішими, що пов'язано, з одного боку, із розширенням таких виробництва, а з іншого – із складним виготовленням електронних виробів з використанням токсичних речовин.

Протягом тривалого часу більшість електронних гаджетів виготовляли у США. І тільки порівняно недавно, такі виробництва перемістилися за кордон у розвиваючі країни, при цьому використовуючи дешеву робочу силу та слабе місцеве законодавство. Власники фірмового знаку передали контракти на виготовлення електроніки своїм новим партнерам. І як наслідок, такі електронні вироби, які ми купуємо, збираються в примітивних майстернях (наприклад, у Китаї) де робітників змушують працювати понаднормово для високої інтенсивності виробництва.

Найбільшим контрактом на виробництво електроніки володіє компанія Hon Hai Precision Industry, Ltd Тайваню (Foxconn) [3, 4]. Ця компанія володіє 13 підприємствами тільки в Китаї, а у всьому світі зайнято майже 1 мільйон робітників. Давно відомо, в яких нелюдських умовах фірма Apple виробляє iPhones і iPads. Застосовувана поточінна система призвела до того, що в 2020 р. майже 20 робітників намагалися покінчити життя самогубством.

Досліджено, що на таких заводах робітники працюють від 36 до 160 годин на місяць. Хоча на законодавчому рівні встановлена межа 36 годин; на дев'яти з десяти заводів мінімальна щомісячна заробітна платня становить 138 доларів, що не забезпечує прожитковий мінімум робітників, при цьому умови праці на поточковій лінії дуже важкі, а робочий день триває понад 10 годин на добу. Робітники працюють без перерв на всіх заводах було виявлено випадки дискримінації під час прийому на роботу.

Швидкий розвиток електроніки, призводить до швидкого застарівання техніки та подальшої утилізації. Потрібно зазначити, що цьому сприяє й агресивна рекламна кампанія фірм-виробників. Життєвий цикл телевізорів, телефонів, приладів глобальної навігації, офісного обладнання тощо стає дедалі коротшим, а собівартість виробленої продукції – вищою.

Необхідно враховувати, що у відходи надходить, як правило, величезна кількість надзвичайно дефіцитних матеріалів (сталі, пластику, кольорових і дорогоцінних металів, скла, деревини тощо), які потрібно повторно використати у виробництві. Багато цінних компонентів електронних виробів (золото, срібло, рідкісні метали), що містяться в друкованих платах, акумуляторах, кабелях, екранних моніторах, ртутних вимикачах тощо, також виключаються з виробничого обороту [5].

Електронні засоби та їхні компоненти, що руйнуються на звалищах (напівпровідникові чіпи, комп'ютерні клавіатури, монітори, пристрої зберігання інформації) стають джерелами 1000 різних матеріалів, що надходять у навколишнє середовище, включно з розчинами хлорованих речовин, бромованими препаратами-гасниками полум'я, полівінілхлоридами, важкими металами, пластиками, газами тощо.

Одна тільки електронно-променева трубка може містити від одного до трьох кілограмів свинцю. У великому телевізійному моніторі його виявиться ще більше.

Плоскі панельні телевізори та монітори містять менше свинцю, але більше ртуті. Приблизно 40% важких металів, включно зі свинцем, ртуттю і кадмієм, що виявляються в навколишньому середовищі, зобов'язані своєю присутністю електронних виробів, що викидаються і потрапляють на звалища [5].

Під час спалювання відходів на відкритих полігонах виникає особлива проблема утворення токсичних продуктів горіння. Це стосується, зокрема, пластмас, що використовуються при виготовленні електронних засобів. У цьому випадку характерне утворення надзвичайно небезпечних хімічних речовин – діоксинів.

Особливу небезпеку становлять PBDE, які інтенсивно виділяються в процесі горіння пластмас. Наразі ці речовини заборонені до використання, хоча у виробів, вироблених до 2014 р., вони містяться в досить високих кількостях.

Значні екологічні та економічні кроки обіцяє перероблення відходів електронної промисловості та повторне їх використання.

Вона має здійснюватися шляхом поділу відходів на окремі однорідні компоненти, виділення хімічними методами цінних для подальшого

використання компонентів, направлення їх для повторного використання.

Багато країн роблять серйозні кроки в цьому напрямку, насамперед у сфері законодавства та регламентування процесів утилізації та зберігання відходів виробництва. Європейський Союз був одним з перших та ще у 2003 році впровадив директиву про відходи електричного та електронного обладнання (WEEE Directive). Оновили документ у 2012 році. Найрозвинутіші системи переробки ВЕЕО в ЄС наразі мають Болгарія, Німеччина та Швеція.

Кращі європейські практики впровадженні в основу законопроектів «Про відходи електричного та електронного обладнання». Документ розроблений з урахуванням вимог Директив №2008/98/ЄС та №2012/19/ЄС. Він передбачає впровадження системи розширеної відповідальності виробника – тобто механізму, за якого виробники відповідатимуть за весь життєвий цикл власної продукції аж до її утилізації. Дана директива вимагає від усіх європейських виробників обладнання та комплектуючих брати на себе відповідальність за вироблений продукт після закінчення терміну його служби, включно зі стадіями збирання, перероблення та утилізації. У Великій Британії ввели заборону на викид відпрацьованої радіоелектроніки (старих телефонів, телевізорів, комп'ютерів тощо) на сміттєві звалища. Для таких товарів з'являються окремі місця утилізації відповідно до програми, розробленої у співпраці з представниками електронної промисловості. Такі заходи дають змогу щорічно відсіювати до 4500 тонн електронного сміття, а у сфері його перероблення створюються нові робочі місця.

Потрібно зазначити, що процес перероблення телевізорів, комп'ютерів, моніторів, принтерів, сканерів, телефонів, факсів і відеозаписувальних пристроїв може принести значну вигоду хоча б завдяки повторному використанню видобутих із них кольорових металів [6].

З отриманих під час перероблення продуктів електроніки вже зараз виробляють хорошої якості коробки, вивіски, деталі свічників, таблички та інші вироби за порівняно низькою ціною.

У США і в Європі існують спеціальні ринки, де продаються демонтовані і відновлені компоненти плат. Вони надходять на ринок із виробництв, де використовують робототехнічні систе-

ми, що забезпечують можливість ідентифікації та демонтажу тільки тих компонентів, яких бракує на складі. Однак доводиться рахуватися з тим, що швидке оновлення елементної бази та відносно низька вартість нових компонентів призведуть до серйозного обмеження повторного використання демонтованих компонентів невизначеної давності.

У Німеччині фірма FUBA перевела на комерційну основу виділення від 92 до 95% металів з відходів порожніх друкованих плат завдяки використанню механічних і гідрометалургійних методів розділення. Вони включають подрібнення, гранулювання, магнітне розділення, класифікацію та електростатичне розділення. Сукупність композицій, одержувана від цієї обробки, знайшла своє застосування у виготовленні виробів, що мають у своєму складі велику кількість скловолокна, а також як наповнювачі у виробництві будівельних матеріалів. Особливо успішним виявилось застосування склополімерних композицій для виробництва ємностей і піддонів, стійких до хімічного впливу, за технологією, розробленою фірмою FUBA. Металеві складові відходи друкованих плат (переважно мідь) розчиняються в сульфатній та нітратній кислотах з подальшим відновленням міді.

У китайському місті Гуйюй (його ще називають Гуйюй-Парк електроніки) розташовано найбільше у світі підприємств із переробки електронних відходів. Понад 17 тисяч підприємств з утилізації електронних відходів забезпечує роботою десятки тисяч людей. При цьому щорічно утилізували 1,5 млн т електронних відходів, що приносило \$ 75 млн доходу.

Необхідно, однак, зауважити, що процес перероблення електронних відходів у Китаї перебуває на надзвичайно низькому рівні. Жодних заходів з охорони праці не вживається. Широко використовується ненормована ручна праця жінок і дітей. Найчастіше перероблення електронних відходів відбувається в примітивних умовах, де відсутні засоби захисту і норми екологічного контролю. Спроби отримання золота або платини з електронних відходів пов'язані з ризиком втрати здоров'я, що не може бути компенсовано жодними матеріальними вигодами. Зокрема, у результаті дослідження крові у китайських дітей, які проживають у провінції Гуан-

донг, вміст свинцю становить у середньому 15,3 мкг/децилітр.

Основна причина цього сміттевого «цунамі» – шалений споживчий попит на різні гаджети та іншу електроніку. Термін їх використання досить короткий, оскільки технології швидко змінюються, а ремонт виробниками у більшості випадків не передбачається. Очікується, що у 2030 році за рік утвориться аж 82 млн тонн, тобто, на 33% більше, ніж у 2022 році. За даними звіту Світового економічного форуму за 2022 рік, глобальна вартість електронного сміття становить 70 млрд доларів, що перевищує ВВП багатьох країн. А на сміттєзвалища викинули корисних елементів на суму орієнтовно 62 млрд дол.

Ефективне управління електронними відходами має ключове значення для зменшення екологічного впливу та економічних втрат від цього швидкозростаючого глобального виклику. В Міністерстві захисту довкілля та природних ресурсів України було розроблено проєкт Закону «Про електричне та електронне обладнання та відходи електричного та електронного обладнання», який наразі знаходиться на фінальній стадії громадського обговорення. Його впровадження дозволить Україні, навести лад у сфері електронних відходів.

Екологічний підхід у галузі виробництва продуктів електроніки може принести і приносить вже в даний час істотну економічну вигоду тим країнам, які усвідомили необхідність термінових заходів у сфері захисту здоров'я свого населення і навколишнього середовища. Уряди цих країн стимулюють наукові дослідження щодо захисту здоров'я свого населення і довкілля.

Усі наявні та потенційні підходи до обробки твердих відходів передбачають механічні та механіко-гідрометалургійні методи. Внаслідок самої природи відходів гідрометалургійній обробці передують механічне подрібнення і сепарація. Основною перевагою систем механічного очищення є сухий режим роботи без використання будь-яких хімічних речовин, у той час як застосування мокрих процесів з використанням хімікатів створює небезпеку для навколишнього середовища. Необхідно зазначити, що гідрометалургійний підхід є хорошою альтернативою переплавленню відходів, а також дає можливість отримати більш високий вихід відновлених металів.

Під час виробництва електронних продуктів та їхніх компонентів (напівпровідникових чипів, комп'ютерних клавіатур, моніторів, пристроїв зберігання інформації) використовується понад 1000 різних матеріалів, включно з розчинами хлорованих речовин, полівінілхлориди, важкі метали, пластики, гази тощо, багато з яких здатні завдавати важкої шкоди навколишньому середовищу і здоров'ю робітників.

Значна шкода робітникам виникає на стадії складання та монтажу електронного виробу, де використовуються розплавлені припої, лаки, фарби та пластмаси, в яких містяться токсичні добавки.

Робітники, зайняті у виробництві електроніки, можуть піддаватися впливу понад тисячі різних хімічних речовин. Багато з цих речовин збільшують ризик захворювання на онкологічні захворювання та спричиняють пошкодження репродуктивної функції людини. Основні ризики пов'язані з вмістом в електронних виробах важких металів, такими як: свинець, ртуть, кадмій. Небезпека свинцю для людини визначається його значною токсичністю і здатністю накопичуватися в організмі. За ступенем впливу на живі організми свинець віднесено до класу високонебезпечних речовин поряд із миш'яком, кадмієм, ртуттю, селеном, цинком, фтором і бензпіреном [2].

Свинець спричиняє пошкодження мозку в дітей, у зв'язку з чим вживання багатьох продуктів для них обмежене. Ртуть токсична в дуже малих дозах, вона впливає на мозок і пошкоджує нирки. Вона може потрапити в організм уже з грудним молоком. Усього 1/70 чайної ложки ртуті може спричинити отруєння близько 100 000 квадратних метрів озерної поверхні, роблячи рибу непридатною до вживання в їжу. Кадмій акумулюється в тілі людини і може спричинити пошкодження нирок. Найбільшої шкоди завдає пентабромдифеніловий ефір. Ці сполуки здатні поширюватися на великі відстані та чинити хронічний вплив на живі організми.

Згадані хімічні речовини та матеріали здатні чинити шкідливий вплив на здоров'я робітників і суспільства загалом. Нині найпоширенішим є процес отримання високочистих твердих матеріалів шляхом хімічного осадження з газової фази (ХОГФ) (англ. *Chemical vapor deposition, CVD*) - плазмохімічний процес, який також використо-

вується в індустрії напівпровідників для створення тонких плівок, селективного видалення і модифікації матеріалів. Як правило, під час процесу CVD підкладка поміщається в пари однієї або декількох речовин, які, вступаючи в реакцію і/або розкладаючись, виробляють на поверхні підкладки необхідну речовину. Часто утворюється також газоподібний продукт реакції, що виноситься з камери з потоком газу. На відміну від інших технологій газофазні процеси вигідно відрізняються підвищеною якістю одержуваних продуктів, можливістю точного управління параметрами процесу. Газофазні процеси знайшли широке застосування хімічно стійких матеріалів:

- Al_2O_3 , благородні, тугоплавкі метали та їхні сплави;
- глибоке і наскрізне припаювання матеріалів IV групи (C, Ge, Si, SiC, SiGe);
- сполук із високим аспектним відношенням за субмікронних топологічних розмірів формованих елементів складу (GaAs, AlN, InP) і (CdTe, ZnO);
- конформне осадження ненапружених діелектричних покриттів (SiN_x , SiO_x , SiON_x);
- атомно-шарове осадження, широкий спектр дифузійних процесів;
- газофазна епітаксія з металоорганічних сполук.

Зниженню ризику впливу на здоров'я людей і стан навколишнього середовища могла б послужити заміна токсичних гідридів металів менш небезпечними матеріалами. Останніми роками активізувалися дослідження з використання МОС-елементів як альтернативи гідридам. Наприклад, $\text{As}(\text{CH}_3)_3$, $\text{As}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$, $\text{C}_4\text{H}_9\text{PH}_2$, $\text{C}_3\text{H}_7\text{PH}_2$ замість AsH_3 , PH_3 . Найкращі результати дає використання частково заміщених МОС $\text{AsH}_2(\text{C}_2\text{H}_5)$, $\text{AsH}_2(\text{C}_4\text{H}_9)$.

Екологічну ситуацію порушують викиди в секторі виробництва напівпровідникових приладів та електронної апаратури, що утворюються під час процесів дифузії, очищення, які містять парникові гази, токсичні, хімічно і корозійно-активні речовини (пари кислот, легувальні домішки, чистячі гази та леткі органічні сполуки).

Рекомендовано виключити за можливості застосування токсичних компонентів під час виготовлення електронних засобів. Зусилля проєктувальників спрямовані на виготовлення елементів

конструкції з чистих пластмас без добавок барвників, мінімізацію складу застосовуваних пластмас та інших матеріалів. Виконання цих вимог призведе до спрощення подальшого перероблення та утилізації знятих з експлуатації електронних приладів.

Обмеження використання небезпечних компонентів може розширити можливості, підвищити економічну ефективність виробництва електронного обладнання та скоротити негативний вплив на здоров'я робітників.

Висновки

Поліпшення екологічної ситуації в електронній промисловості може бути здійснене при створенні так званої зеленої електроніки, в рамках якої токсичні матеріали під час виробництва засобів електроніки замінюються нетоксичними і такими, що легко розкладаються в навколишньому середовищі. Важливим є впровадження на підприємствах стандартів систем екологічного менеджменту. Водночас дослідження з альтернатив токсичних матеріалів та інвестиції для безпечної утилізації електронних відходів катастрофічно відстають від темпів появи нових електронних пристроїв. Необхідні нові стандарти з випробування використовуваних матеріалів, особливо в галузях, пов'язаних із медициною, аерокосмічними технологіями. Покращене тестування матеріалів і створення надійної бази даних щодо токсичності матеріалів може стимулювати виробників враховувати безпеку продукту на ранніх стадіях проектування після ухвалення експлуатаційних та економічних рішень.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про управління відходами» від 20 червня 2022 року
№ 2320-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
2. Recycling – From E-waste To Resources: United Nations Environment Programme and United Nations University. 2009. URL: http://www.unep.org/pdf/pressreleases/Ewaste_publication_screen_finalversionsml.pdf
3. Балде К.П., Форті В., Грей В. та ін. Глобальний моніторинг електронних відходів, 2020 рік. та ін. URL: : https://www.itu.int/en/ITUDE/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_RU.pdf?csf=1&e=t2aSZu
4. Liu X., Tanaka V., Matsui Y. Electrical and electronic waste management in China: progress and the barriers to overcome. J. Waste Management Research, 2006, 24, 92–101
5. Oladele A. Ogunseitan, Julie M. Schoenung, Jean-Daniel M. Saphores, Andrew A. Shapiro The Electronics Revolution: From E-Wonderland to E-Wasteland. J. Cience, 2009, 326, 670-671.
6. Про затвердження Порядку ведення державного обліку та паспортизації відходів : Постанова Кабінету Міністрів України від 01.11.1999 р. № 2034 : станом на 9 верес. 2020 р.
7. Утворення та утилізація відходів за матеріалами у 2016 році: Держстат України. 1998-2016. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/ns/ns_u/utvut_u2016.html.
8. Крайнов І.П., Крилюк В.М., Шаго Є.П. Управління екологічною безпекою в сфері поводження з відходами електронного та електричного обладнання: Екологічна безпека. № 1. 2012. С. 13–17.
9. Наявність у домогосподарствах окремих товарів тривалого користування: Держстат України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/>
10. Іщенко В.А. Поводження з небезпечними компонентами побутових відходів у Вінницькій області: Матеріали XLV Науково-технічної конференції ВНТУ, м. Вінниця, 23-24 березня 2016р. URL: http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all_ebmd/all_2016/paper/view/1055
11. Філатов Л.Г., Сидоренко С.В., Кононенко О.С. Поводження з електронними відходами в Україні: аналіз проблеми та шляхи вирішення. URL: http://archive.nbuv.gov.ua/portal/Natural/vcpi/NRvST/2012_34/index.htm
12. Сафранов Т.А., Шаніна Т.П., Приходько В.Ю. Класифікація твердих побутових відходів як передумова формування системи поводження з ними в регіонах України : монографія. Дніпро : Вид. Біла К.О, 2018. 100 с.
13. Сучасний стан політики поводження з електронними відходами в Україні та Європейському Союзі: кроки до зближення. Під заг. ред. О.М. Цигульової. – К.: ВЕГО «МАМА-86», 2013.-172 с.

14. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року : Розпорядження від 8 листопада 2017 р. № 820-р // КМУ. Київ: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>
15. Бондаренко І.М., Електронні системи: Навч. посібник / І.М. Бондаренко, О. В. Глухов, О. О. Кравчук // Харків: ХНУРЕ. 2019. – 219 с.
16. Бондаренко І.М., Сучасна компонентна база електронних систем: Навч. посібник / І. М. Бондаренко, О. В. Бородин, В. П. Карнаушенко // Харків: ХНУРЕ. 2020. – 268 с.
17. Важкі метали як фактор ризику для здоров'я людини та довкілля при поводженні з відходами електричного та електронного обладнання. URL: <http://protox.medved.kiev.ua/index.php/ua/issues/2015/>
18. Виговська Г.П. Вирішення проблеми електронних відходів: європейські підходи до української проблеми. URL: https://dspace.univd.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/443/Vyrishennia%20problemy%20elektronnykh%20vidkhodiv_yevropeiski%20pidkhody%20do%20ukrainskoi%20problemy_Shumilo_Vyhovska_Tsyhulova_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
19. Данилова Н. Чому давно пора зайнятися переробкою електронних відходів. Голова Асоціації управління відходами, для порталу Green Deal. URL: <https://interfax.com.ua/news/greendeal/778301.html>
20. Екологія, природокористування та охорона навколишнього середовища: прикладні аспекти: матер. VI Всеукр. наук.-практ. заоч. конф., м. Київ, 16 травня 2023 р. / за заг. ред. Х.С. Мітюшкіної. Київ: МДУ, 2023. 108 с.
21. Пендюр Т.В. Екологічне виховання та шлях вирішення проблем утилізації побутових відходів. Теорія і практика сучасної науки та освіти. 2020. Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції 22-23 жовтня 2020 р., Львівський форум. С.47-51.
22. Скорик О.О. Формування економічного механізму управління електронними відходами в Україні. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5433>
23. Тесленко І. Електронне сміття в Україні: викинути не можна переробити. URL: <https://www.unian.ua/consumers/818664-elektronne-smittya-vukrajini-vikinuti-ne-mojna-pererobiti.html>
24. Фалько В.В., Жук В.М. Світовий досвід щодо організації збору та утилізації електронних відходів та його впровадження в Україні. Збірник тез доповідей V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції СДУ: Суми, 2018. С. 77-81.
25. Як в Україні планують впроваджувати норми європейського законодавства щодо відходів електричного та електронного обладнання. URL: <https://kpmg.com/ua/uk/blogs/home/posts/2020/05/polluterpaysprinciple.htm>