

## ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ НАНОМАТЕРІАЛІВ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Кеуш Л.Г.<sup>1</sup>, Коверя А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національна металургійна академія України  
пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпро  
linakeush@gmail.com;

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49027, м. Дніпро  
koveriaA@nmu.org.ua

Галузі застосування нанотехнологій і наноматеріалів досить широкі: хімія, медицина, біологія, електроніка, оптика, сільське господарство, металургія та інші. Наноматеріали входять до складу різних продуктів і систем, що використовуються в повсякденному житті. Специфічні фізико-хімічні властивості, порівняно з широкомасштабним застосуванням, призводять до збільшення впливу наноматеріалів на навколишнє середовище та живі організми.

Питання екологічної безпеки і впливу наноматеріалів на живі організми та навколишнє середовище дуже складні і ще до кінця не вивчені. Тому важливим для суспільства є розуміння впливу і поводження з наноматеріалами, а для України одним із головних питань сьогодення є розроблення та впровадження нормативних документів, що дасть змогу зменшити негативний вплив нанотехнології та розширити культуру поводження з наноматеріалами.

Оцінка життєвого циклу наноматеріалів і продуктів, що містять наноматеріали, відіграє важливу роль в управлінні ризиками, а також надає інформацію та оцінку викидів на кожному етапі життєвого циклу продуктів. Потенційний негативний вплив залежить від можливих викидів наночастинок під час життєвого циклу нанопродуктів, їхньої екологічної поведінки і потенційного ефекту під час потрапляння в живі організми. Проте кількісне вимірювання концентрацій наноматеріалів у реалістичних умовах є дуже складним, дорогим і трудомістким.

У роботі досліджено життєвий цикл наноматеріалів за кожним із чотирьох основних етапів: мета і сфера визначення; інвентаризаційний аналіз життєвого циклу; оцінка впливу життєвого циклу та інтерпретація. Окрім того, проаналізовано вплив наноматеріалів на важливі екологічні проблеми, виконано оцінку ризиків і розглянуто питання біоаккумуляції наноматеріалів. *Ключові слова:* наноматеріали, навколишнє середовище, оцінка життєвого циклу, викиди, біоаккумуляція.

### Life cycle assessment of nanomaterials and their impact on the environment. Kieush L., Koveria A.

Applications of nanotechnologies and nanomaterials are quite wide, namely chemistry, medicine, biology, electronics, optics, agriculture, metallurgy, etc. Nanomaterials are part of the various products and systems used in everyday life. Specific physical and chemical properties, compared to widespread application, lead to an increase in the impact of nanomaterials on the environment and living organisms.

The issues of environmental safety and the impact of nanomaterials on living organisms and the environment are very complex and have not been fully understood. Therefore, it is important for society to understand the impact and handling of nanomaterials; as well as for Ukraine one of the main issues today is the development and implementation of regulatory documents, which will reduce the negative impact of nanotechnology and will expand the management of nanomaterials handling.

Life cycle assessment of nanomaterials and products containing nanomaterials is essential in risk management and provides information and estimation of emissions at each stage of the product life cycle. The potential negative impact depends on the possible emissions of nanoparticles during the life cycle of the nano-products, their environmental behavior and the potential effect upon entry into living organisms. However, quantitative measurement of nanomaterial concentrations under realistic conditions is very complicated, expensive and time-consuming.

The life cycle of nanomaterials has been studied in each of the four main stages, namely purpose and scope; life cycle inventory analysis; life cycle impact assessment and interpretation. Moreover, the impact of nanomaterials on important environmental issues was analyzed; the risk assessment was performed, as well as the issues of bioaccumulation of nanomaterials were considered. *Key words:* nanomaterials, environment, life cycle assessment, emissions, bioaccumulation.

**Постановка проблеми.** Нанотехнології та наноматеріали становлять надзвичайний інтерес, оскільки мають значний потенціал для поліпшення матеріалів і технологій, ніж це можливо з використанням звичайних матеріалів [1–3]. Сьогодні нанотехнології визнані Європейською Комісією однією з шести «ключових сприяючих технологій», що присутні практично в будь-якому промисловому секторі [4–6]. Європейська Комісія спільно з Об'єднаним дослідницьким центром Європейської Комісії [7] та нау-

ковим висновком SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) [8] надали визначення терміну «наноматеріал» – це природний, супутній або виготовлений матеріал, який містить частинки у вільному стані або як агрегату, або агломерату, і для 50 % або більше частинок зовнішній розмір перебуває в діапазоні 1–100 нм.

Протягом життєвого циклу наноматеріалів їхній вплив на навколишнє середовище і здоров'я живих організмів варіюється. Це, у свою чергу, залежить

від виду сировини і товарного призначення наноматеріалів. Для того щоб оцінити вплив кожного з етапів від отримання наноматеріалів до їх видалення або переробки, необхідно проводити оцінку життєвого циклу. Оцінка життєвого циклу (Life Cycle Assessment) – це інструмент, здатний оцінювати потенційні екологічні впливи продуктів або систем протягом життєвого циклу.

**Актуальність і мета дослідження.** Специфічні фізико-хімічні властивості, порівняно з широкомасштабним застосуванням, призводять до збільшення впливу наноматеріалів на живі організми та навколишнє середовище. Оцінка життєвого циклу є досить важливим інструментом для виявлення потенційного впливу наноматеріалів, починаючи від виробництва до остаточного видалення (переробки) [9–12]. Метою дослідження була оцінка впливу наноматеріалів на навколишнє середовище на кожному етапі життєвого циклу.

**Етапи оцінки життєвого циклу наноматеріалів.** Методологію оцінки життєвого циклу визначено в ISO 14040 та ISO 14044 [13; 14]. Відповідно до документа, оцінка життєвого циклу поділяється на чотири головних етапи: 1) мета і сфера визначення; 2) інвентаризаційний аналіз життєвого циклу; 3) оцінка впливу життєвого циклу і 4) інтерпретація. Оцінювані категорії впливу включають місцеві (наприклад, екотоксичність), регіональні (підкислення) і глобальні (зміни клімату, використання ресурсів).

Оцінка першого етапу «мета і сфера визначення» встановлює контекст дослідження, цільову аудиторію, мету і межі дослідження. Матеріали і джерела енергії, що досліджуються, ідентифікуються відповідно до меж систем і кількісно оцінюються разом з інформацією про результати, включно з викидами і відходами.

Наступний етап містить збір даних, включно з можливими викидами у виробництві кінцевого продукту й оцінкою впливів. Інвентаризаційний аналіз

життєвого циклу є методологією для оцінки споживання ресурсів (вхід) і кількості потоків та викидів (вихід), спричинених або іншим чином пов'язаних із життєвим циклом продуктів (рис. 1) [15].

Дані інвентаризації життєвого циклу називають «cradle-to-gate» (часткові дані до етапу використання). Вкрай важливо, щоб використані дані аналізу були настільки репрезентативними, наскільки це можливо. Бази даних інвентаризаційного аналізу сьогодні більш підходять для сипучих матеріалів і не надають широкомасштабної інформації про нанорозмірні матеріали, властивості яких можуть відрізнятися від сипучих матеріалів.

Дослідження інвентаризаційного аналізу показують потенційні викиди в навколишнє середовище «первинних» наноматеріалів (які не зазнали жодних трансформацій під час попадання в навколишнє середовище), незалежно від стадії життєвого циклу. Насправді викиди «первинних» наноматеріалів можуть бути лише на етапі виробництва, наноматеріали – на етапах використання та під час переходу у відходи, найімовірніше, не матимуть первинної форми. Для цього є дві основні причини: по-перше, нанопродукти можуть зазнати старіння, яке може вплинути на властивості матеріалів, що потрапляють до навколишнього середовища; по-друге, наноматеріали, які потрапляють до навколишнього середовища, найімовірніше, пройдуть трансформаційний процес, який також може змінити їхні властивості [16].

Отже, на цих стадіях життєвого циклу потенціал викидів і властивості наноматеріалів будуть більше пов'язані з матрицею (продуктом), в яку включені наночастинки (тобто тип нанопродуктів, що досліджується), та способом, за допомогою якого вони були введені, а не від властивостей самих наноматеріалів. Отже, дані інвентаризаційного аналізу повинні бути встановлені індивідуально для кожного етапу життєвого циклу, протягом якого наноматеріали можуть виділятися, беручи до уваги також

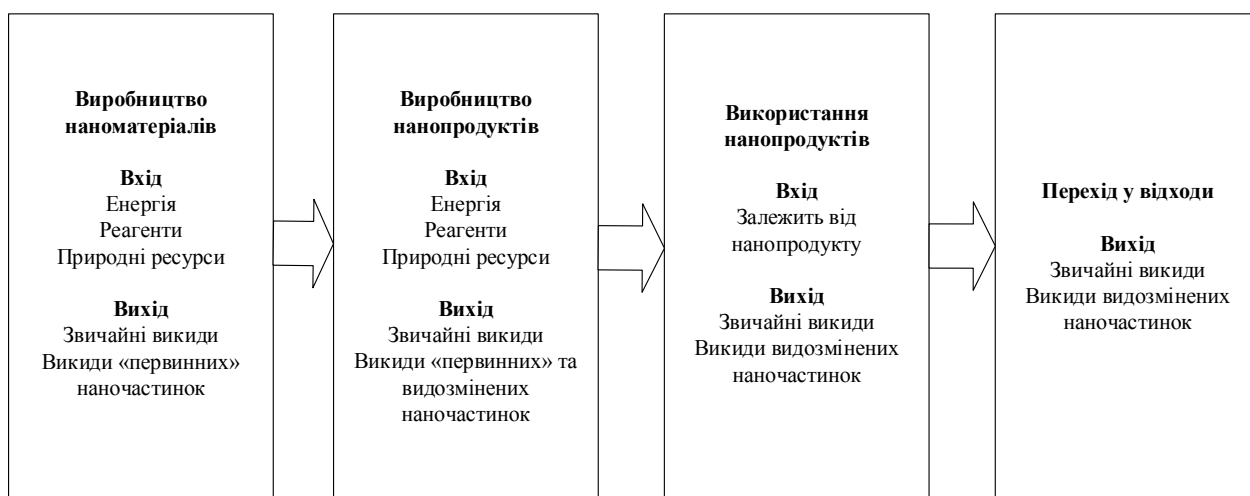


Рис. 1. Схематичне зображення вимог інвентаризаційного аналізу для кожного етапу життєвого циклу, що враховує потенційні викиди протягом життєвого циклу нанопродуктів

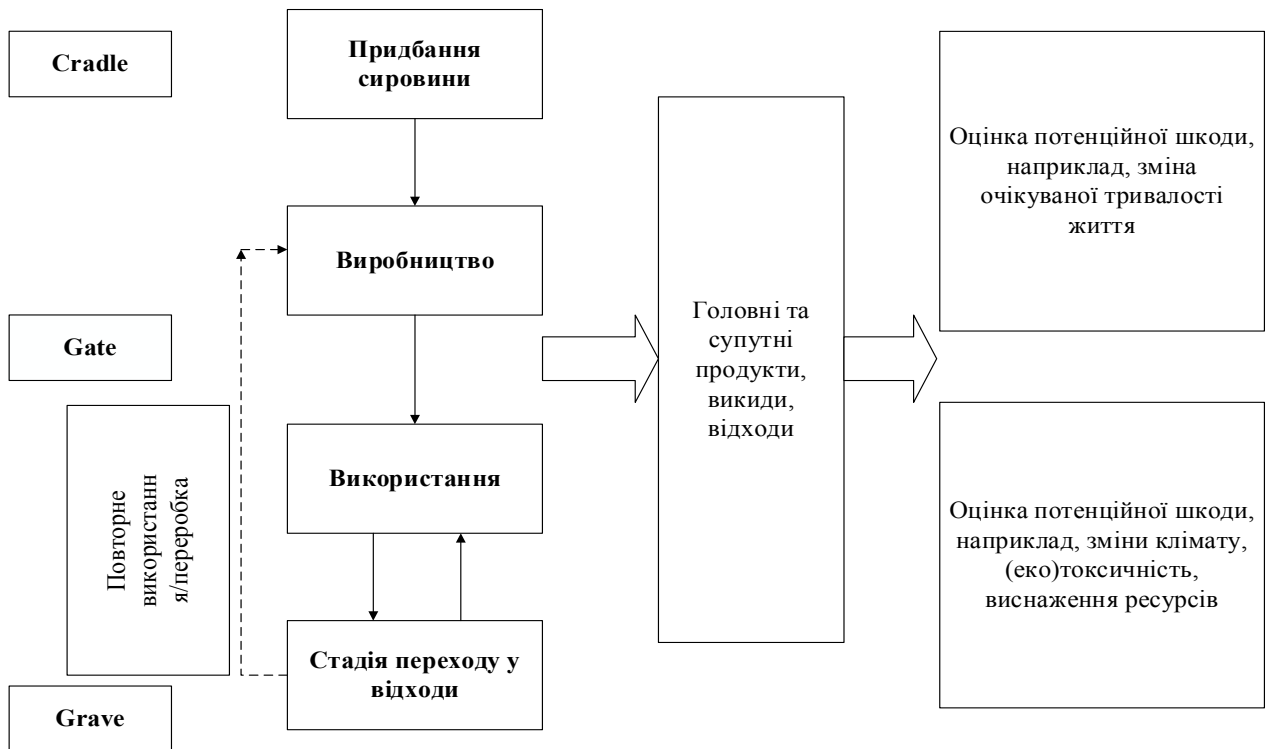


Рис. 2. Схеми життєвого циклу наноматеріалів [10]

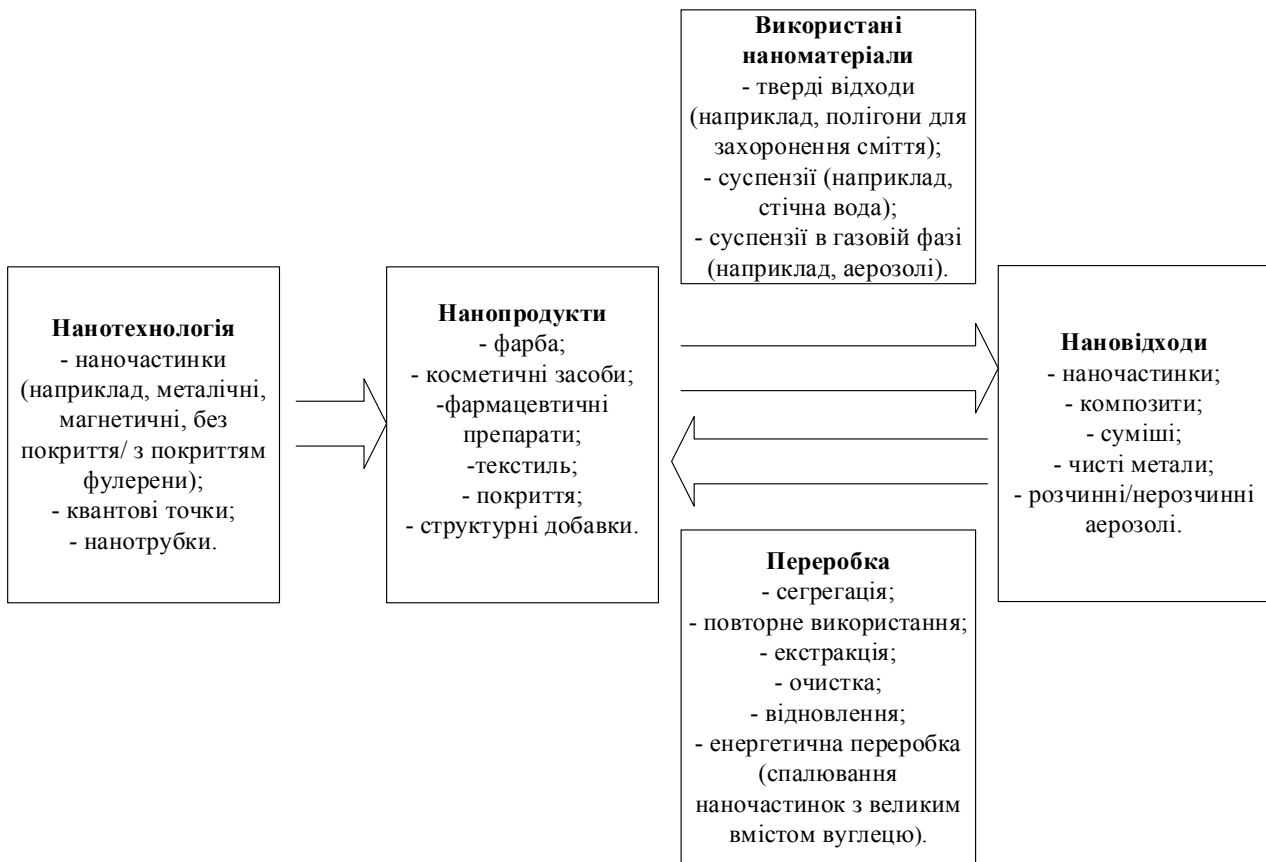


Рис. 3. Схематичне зображення можливих шляхів викидів упродовж життєвого циклу нанопродуктів [17]

тип матриці і характер будь-яких процесів перетворення, що можуть виникнути під час потрапляння до навколишнього середовища.

На наступному етапі оцінки впливу життєвого циклу результати інвентаризаційного аналізу представляють із метою підкреслення потенційного впливу на навколишнє середовище, здоров'я людини і природні ресурси. Застосування факторів для характеристики впливу перетворює дані інвентаризаційного аналізу в результати впливу на різні категорії. Наприклад, метан  $\text{CH}_4$  і оксид азоту  $\text{N}_2\text{O}$  показують потенціал впливу на зміни клімату за допомогою встановлених методів характеристики і пов'язаних із ними факторами. Токсичність і вплив на здоров'я наноматеріалів під час їх використання і закінчення терміну служби є ключовими для оцінки впливу.

На заключному етапі відбувається інтерпретація отриманих результатів інвентаризаційного аналізу й оцінки впливу життєвого циклу наноматеріалів та виконується аналіз, враховуючи невизначеності і прогалини в даних із погляду поставленої мети і сфери, яка визначається на початку аналізу.

Дослідження, що охоплює весь життєвий цикл наноматеріалів – від сировини до переробки або повторного використання – називається «cradle-to-grave», зображено на рисунку 2. Оцінку можна проводити, опускаючи будь-яку стадію.

Наприклад, може бути виконана оцінка без урахування етапів використання та закінчення терміну служби; таке дослідження проводять від сировини до використання («cradle-to-gate»). Недоліком такого підходу є те, що створюються потенційні «сліпі плями», і вплив наноматеріалів на іншому етапі життєвого циклу може залишитися непоміченим, погіршуючи якість оцінки життєвого циклу. Зниження навантаження на навколишнє середовище через якісні або кількісні зміни енергії та ресурсів на одному етапі пов'язано зі збільшенням навантаження на іншому етапі життєвого циклу.

На рисунку 3 показано шлях від наноматеріалів до отримання нановідходів. Представлена схема підкреслює необхідність постійного спостереження за поведінкою із нанопродуктами і пропонує переробку з метою зменшення кількості нановідходів, що потрапляють до навколишнього середовища. Наночастинки можуть бути виділені із забруднених або залишкових фарб, косметики або фармацевтичних препаратів. Інші нанопродукти, текстиль або покриття можуть призвести до утворення наночастинок із композитів. У випадку металевих наночастинок токсичні іони можуть бути виділені через вимивання, проте малоімовірно, що наночастинки відокремлюються від структурних компонентів. Інші нанопро-

Таблиця 1

Вплив наноматеріалів на важливі екологічні проблеми [18]

Наноматеріали	Використання енергії	Потенціал глобальних кліматичних змін	Потенціал токсичності для людини	Потенціал екотоксичності	Потенціал виснаження озонового шару	Посилання
Вуглецеві нанотрубки				+		[19]
Нанотрубки		+				[20]
Вуглецеві нанотрубки та фулерени	+	+		+		[21; 22]
Вуглецеві нанотрубки	+	+			+	[23]
Квантові точки	+	+				[24]
Наноглина	+	+				[25; 26]
Наноглина	+	+			+	[27]
Наноглина та вуглецеві нанотрубки	+	+			+	[28]
Вуглецеві нановолокна	+	+	+		+	[29]
Вуглецеві нановолокна	+					[30]
Діоксид Титану		+			+	[31]
Нанорозмірні метали платинової групи	+					[32]
Наночастинки Аргентуму		+			+	[33]
Оксиди Титану та Цирконію	+	+				[34]
Наночастинки Срібла		+			+	[35]

дукти можуть бути утилізовані як складні суміші або суспензії, що містять наночастинки, які важко відокремити від інших матричних компонентів.

У таблиці 1 наведено низку оцінок життєвого циклу наноматеріалів. У деяких дослідженнях було обрано обмежену кількість (1–3) категорій впливу матеріалів, що мають велике значення, тоді як в інших дослідженнях було обрано більш широкий спектр категорій впливу для таких матеріалів, як двоокис титану, вуглецеві нанотрубки, наноглина і наночастинки срібла.

Грунтуючись на численних прикладах, представлених у таблиці 1, оцінка життєвого циклу відіграє важливу роль у керівництві технологічним розвитком виробництва наноматеріалів із метою зниження впливу на навколишнє середовище.

Дослідження, наведені в таблиці 1, надають інформацію щодо результатів, які стосуються впливу наноматеріалів на важливі екологічні проблеми, такі як використання енергії та води, глобальні кліматичні зміни, підкислення, створення фотохімічного озону, екотоксичність, токсичність для людини і виснаження озону.

Дослідження з оцінки життєвого циклу, загалом, засновані на різній кількості включених категорій впливу. Наприклад, вплив на категорії зміни клімату і використання енергії розглядається частіше, ніж вплив на інші категорії, що також характерно для досліджень з оцінки життєвого циклу. Оцінка життєвого циклу може також використовуватися для оцінки екологічних переваг додатково до впливу на навколишнє середовище.

Оцінка впливу наночастинок на навколишнє середовище є складним завданням з двох основних причин: по-перше, отримання аналітичних вимірювань концентрації наноматеріалів у навколишньому середовищі ускладнено через відмінності вироблених наночастинок від природних і супутніх наночастинок, а по-друге, відсутність репрезентативних або точних вхідних даних.

Потенційний токсикологічний вплив наноматеріалів залежить від можливих викидів наночастинок під час життєвого циклу нанопродуктів, їхньої екологічної поведінки і потенційного ефекту під час потрапляння в живі організми.

Токсичний ефект наночастинок залежить від низки параметрів, наприклад розміру, розчинення, структури поверхні і агрегації/агломерації. Зміна розміру наночастинок показує різницю в токсичності. У роботі [36] наночастинки срібла з розміром 15 нм були набагато токсичнішими порівняно з частинками розміром 30 нм. Кристалічна структура наноматеріалів також відіграє певну роль, наприклад, частинки  $\text{TiO}_2$  у формі кристалічної структури більш токсичні для організмів, порівняно з рутиловою структурою [37].

Певні типи наноматеріалів можуть повністю розчинятися у водних середовищах залежно від екологічних умов, які, у свою чергу, впливають на токсичність. Для наночастинок  $\text{Ag}$ , які можуть потра-

пляти до прісної води, токсичність залежатиме від потенціалу внутрішньої токсичності наноматеріалу і іонів, утворених шляхом окисного розчинення [38]. Токсикологічні ефекти також можуть бути пов'язані зі зміною структури поверхні наноматеріалів, які можуть бути спричинені видаленням або зміною покриття матеріалу. Зміна структури поверхні, наприклад, природними та антропогенними хімічними речовинами в навколишньому середовищі може призвести до підвищеної рухливості, біодоступності, агрегації (головним чином, до гідрофобних поверхонь), седиментації, розчинення і диспергування (головним чином, до гідрофільних поверхонь), отже, можуть збільшуватися фактичний вплив і токсичність.

**Оцінка ризиків.** Залежно від типу наночастинок можуть виділятися в атмосферу у формі аерозолів, а також потрапляти до ґрунтів і поверхневої води. Наночастинки можуть потрапляти до навколишнього середовища як «первинні», так і трансформовані – у вигляді агрегатів або введені в матрицю.

Наночастинки, які навмисно або випадково потрапляють до навколишнього середовища, розсіюються в ньому, досягаючи води, ґрунту та повітря. Там вони можуть зберігатися протягом тривалого часу або потрапляти до різних організмів. Вони можуть мати екотоксикологічну небезпеку, зазнавати біодеградації або біоаккумуляції.

Система оцінки ризику має дещо різні форми, але зазвичай включає в себе чотири етапи [39]:

- ідентифікація небезпеки (іноді називається формулюванням проблеми);
- оцінка впливу;
- оцінка дозування або оцінка небезпеки;
- характеристика ризику.

Іноді процес управління ризиками або етап зменшення ризику додається після основних чотирьох етапів, але найчастіше не розглядається як частина оцінки ризику, а скоріше як подальша дія, що відбувається у відповідь на оцінку ризику [40]. Ідентифікація небезпеки полягає у визначенні потенційних небезпек, пов'язаних із хімічними речовинами, наприклад, чи є речовина токсичною або біоаккумулятивною.

Слід також враховувати, що для дослідження токсичності наноматеріалів аналізується початковий матеріал. Також фізико-хімічні властивості наноматеріалів можуть змінюватися протягом життєвого циклу, тому проблема включення життєвого циклу в оцінку ризиків наноматеріалів розглядається у роботі [41]. У конкретних умовах більш небезпечні наноматеріали можуть утворюватися протягом життєвого циклу, наприклад, через розпад покриття або фотоактивацію. Кількісне вимірювання концентрації наноматеріалів у реалістичних умовах є дуже складним, дорогим і трудомістким. Це особливо стосується випадку, коли такі фізико-хімічні властивості, як ступінь агломерації, розподіл розмірів тощо, повинні вимірюватися в реальних умовах.

**Біоаккумуляція наноматеріалів.** Вважається, що біоаккумуляція являє собою процес, який надає додаткову інформацію для оцінки ризику наноматеріалів за екотоксичністю, що особливо важливо для наноматеріалів, оскільки їх видалення може бути дуже повільним.

Для оцінки екологічного ризику наноматеріалів процедура перевірки може полягати у визначенні концентрації наноматеріалів у відповідних тестованих організмах. Аналіз швидкості розчинення у фізіологічно важливих середовищах може дати інформацію про потенціал накопичення та оцінку впливу наноматеріалів на здоров'я людини.

Більш повну інформацію можна отримати шляхом вимірювання внутрішніх концентрацій у тканинах під час дослідження токсичності в декількох ключових часових періодах або включаючи вимір внутрішніх концентрацій у тканинах до і після періоду очищення. Такі дані можуть використовуватися для кращого вирішення проблеми поглинання, а отже, для накопичення наноматеріалів. Зв'язування токсикокінетичних даних, включно з інформацією про накопичення і ліквідацію, фізико-хімічні властивості і швидкості розчинення наноматеріалів у фізіологічно важливих середовищах, може полегшити проблему біоаккумуляції в майбутньому.

**Головні висновки.** Питання екологічної безпеки і впливу наноматеріалів на людину і навколишнє середовище є дуже складними і до кінця не вивченими. Складність оцінки впливу наночастинок на навколишнє середовище виникає з двох основних причин: отримання аналітичних вимірювань концентрації наноматеріалів у навколишньому середовищі ускладнено через відмінності вироблених наночастинок від природних і супутніх наночастинок, а також через відсутність репрезентативних або точних вхідних даних.

Дослідження з оцінки життєвого циклу наноматеріалів загалом засновані на різній кількості включених категорій впливу, тому є декілька підходів до оцінки. В роботі детально розглянуто чотири етапи оцінки життєвого циклу: 1) мета і сфера визначення; 2) інвентаризаційний аналіз життєвого циклу, який полягає у зборі даних, включно з можливими викидами у виробництві кінцевого продукту й оцінкою впливів; 3) оцінка впливу життєвого циклу і 4) інтерпретація отриманих результатів інвентаризаційного аналізу і кінцева оцінка впливу життєвого циклу наноматеріалів. Крім того, розглянуто вплив наноматеріалів на важливі екологічні проблеми. Виконано оцінку ризиків і розглянуто питання біоаккумуляції наноматеріалів.

### Література

1. Наноматеріали із вугілля та продуктів його піролізу : монографія / В.М. Шмалько, Л.Г. Кеуш, О.І. Зеленський. Дніпропетровськ : ЛІПА, 2018. 168 с. ISBN 978-966-981-030-4.
2. Нанотехнології в нафтогазовій промисловості : монографія / Кеуш Л.Г., Коверя А.С. Дніпропетровськ : ЛІПА, 2019. 140 с. ISBN 978-966-981-136-3.
3. Carbon Derived Sources for Nanomaterials Production: monograph / L. Kieush, V. Shmalko, O. Zelenskyi, A. Koveria. Ottawa : Accent Graphics Communications, 2019. 90 p. ISBN: 978-1-77192-483-2.
4. A European strategy for key enabling technologies – A bridge to growth and jobs: EC, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. – 2012. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2012:0341:FIN:EN:PDF>.
5. Analysis of smart specialisation strategies in nanotechnologies. Advanced manufacturing and process technologies / European Commission, Brussels. 2015. 140 p.
6. NanoData Impact Assessment, Energy, Health, ICT, Manufacturing, Photonics, European Commission. 2018. 28 p.
7. Lövestam G., Rauscher H., Roebben G. et al. Considerations on a Definition of Nanomaterial for Regulatory Purposes. Joint Research Centre of the European Commission, European Commission Brussels, Belgium. 2010.
8. Opinion on the scientific basis for the definition of the term “nanomaterial”. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), European Commission Brussels, Belgium. 2010.
9. Lazarevic D., Finnveden G. Life cycle aspects of nanomaterials. Environmental Strategies Research KTH – Royal Institute of Technology : Stockholm (Sweden). 2013.
10. Gavankar S., Suh S., Keller A.A. Life cycle assessment of engineered nanomaterials / J. Njuguna, K. Pielichowski & H. Zhu (eds.) Health and environmental safety of nanomaterials, Woodhead Publishing : Cambridge (United Kingdom). 2014.
11. ILCD handbook: general guide for life cycle assessment – detailed guidance. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environmental and Sustainability, European Union. 2010.
12. Salieri B., Turner D.A., Nowack B. et al. Life cycle assessment of manufactured nanomaterials: Where are we? *NanoImpact*. 2018. Vol. 10. P. 108–120.
13. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. International Standardisation Organisation (ISO), European Standard EN ISO 14044: Geneva, 5, 2006.
14. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. International Standardization Organization (ISO), European Standard EN ISO 14040: Geneva, 2006.
15. Rebitzer G., Ekvall T., Frischknecht R. et al. Life Cycle Assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and application. *Environment International*. 2004. Vol. 30. P. 701–720.
16. Mitrano D.M., Nowack B. The need for a life-cycle based aging paradigm for nanomaterials: importance of real-world test systems to identify realistic particle transformations. *Nanotechnology*. 2017. Vol. 28 (7). P. 072001.
17. Bystrzejewska-Piotrowska G., Golimowski J., Urban P.L. Nanoparticles: Their potential toxicity, waste and environmental management. *Waste Manage*. 2009. Vol. 29. P. 2587–2595.

18. Arvidsson R. Life cycle assessment and risk assessment of manufactured nanomaterials / P.I. Dolez eds.) // Nanoengineering – Global approaches to health and safety issues, Gothenburg, Sweden : Elsevier, 2015.
19. Eckelman M.J., Mauter M.S., Isaacs J.A. et al. New perspectives on nanomaterial aquatic ecotoxicity: production impacts exceed direct exposure impacts for carbon nanotubes. *Environ Sci Technol.* 2012. Vol. 46. P. 2902–2910.
20. Healy M.L., Dahlben L.J., Isaacs J.A. Environmental assessment of single-walled carbon nanotube processes. *J Ind Ecol.* 2008. Vol. 12. P. 376–393.
21. Kushnir D., Sanden B.A. Energy requirements of carbon nanoparticle production. *J Ind Ecol.* 2008. Vol. 12. P. 360–375.
22. Kieush L. Coal pyrolysis products utilisation for synthesis of carbon nanotubes. *PetCoal.* 2019. Vol. 61 (3). P. 461–466.
23. Singh A., Lou H.H., Pike R.W. et al. Environmental impact assessment for potential continuous processes for the production of carbon nanotubes. *Am J Environ Sci.* 2008. Vol. 4. P. 522–534.
24. Sengul H., Theis T.L. An environmental impact assessment of quantum dot photovoltaics (QDPV) from raw material acquisition through use. *J Cleaner Prod.* 2011. Vol. 19. P. 21–31.
25. Joshi S. Can nanotechnology improve the sustainability of biobased products? *J Ind Ecol.* 2008. Vol. 12. P. 474–489.
26. Lloyd S.M., Lave L.B. Life cycle economic and environmental implications of using nanocomposites in automobiles. *Environ Sci Technol.* 2003. Vol. 37. P. 3458–3466.
27. Roes A.L., Marsili E., Nieuwlaar E. et al. Environmental and cost assessment of a polypropylene nanocomposite. *J Polym Environ.* 2007. Vol. 15. P. 212–226.
28. Roes A.L., Tabak L.B., Shen L. et al. Influence of using nanoobjects as filler on functionality-based energy use of nanocomposites. *J Nanopart Res.* 2010. Vol. 12. P. 2011–2028.
29. Khanna V., Bakshi B.R., Lee L.J. Carbon nanofiber production. *J Ind Ecol.* 2008. Vol. 12. P. 394–410.
30. Khanna V., Bakshi B.R. Carbon nanofiber polymer composites: evaluation of life cycle energy use. *Environ Sci Technol.* 2009. Vol. 43. P. 2078–2084.
31. Grubb G.F., Bakshi B.R. Life cycle of titanium dioxide nanoparticle production. *J Ind Ecol.* 2011. Vol. 15. P. 81–95.
32. Lloyd S.M., Lave L.B., Matthews H.S. Life cycle benefits of using nanotechnology to stabilize platinum group metal particles in automotive catalysts. *Environ Sci Technol.* 2005. Vol. 39. P. 1384–1392.
33. Meyer D., Curran M., Gonzalez M. An examination of silver nanoparticles in socks using screening level life cycle assessment. *J Nanopart Res.* 2011. Vol. 13. P. 147–156.
34. Osterwalder N., Capello C., Hungerbuhler K. et al. Energy consumption during nanoparticle production: how economic is dry synthesis? *J Nanopart Res.* 2006. Vol. 8. P. 1–9.
35. Walser T., Demou E., Lang D.J. et al. Prospective environmental life cycle assessment of nanosilver T-shirts. *Environ Sci Technol.* 2011. Vol. 45. P. 4570–4578.
36. Hussain S.M., Braydich-Stolle L.K., Schrand A.M. et al. Toxicity evaluation for safe use of nanomaterials: recent achievements and technical challenges. *Adv Mater.* 2009. Vol. 21 (16). P. 1549–1559.
37. Hall S., Bradkey T., Moore J.T. et al. Acute and chronic toxicity of nano-scale TiO<sub>2</sub> particles to freshwater fish, cladocerans, and green algae, and effects of organic and inorganic substrate on TiO<sub>2</sub> toxicity. *Nanotoxicology.* 2009. Vol. 3 (2). P. 91–97.
38. Miseljic M., Olsen S.I. Life-cycle assessment of engineered nanomaterials: a literature review of assessment status. *J Nanopart Res.* 2014. Vol. 16. P. 2427.
39. Guidance on information requirements and chemical safety assessment. Part A: introduction to the guidance document. ECHA. Helsinki, 2011.
40. Leeuwen C.J., Vermeire T.G. Risk assessment of chemicals: an introduction. Dordrecht : Springer. 2007.
41. Erdely A., Dahm M.M., Schubauer-Berigan M.K. et al. Bridging the gap between exposure assessment and inhalation toxicology: some insights from the carbon nanotube experience. *J Aerosol Sci.* 2016. Vol. 99. P. 57–162.