

УДК 504:620.3

І. Т. Богданов, д. пед. н., проф., ректор**Я. О. Сичікова**, к. т. н., доц., доц. каф.

Бердянський державний педагогічний університет

вул. Шмідта 4, м. Бердянськ, Україна, 71100

С. О. Вамболь, д. т. н., проф., зав. каф.**В. В. Вамболь**, д. т. н., доц., проф. каф.

Національний університет цивільного захисту України

вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ НАНОМАТЕРІАЛІВ ЧЕРЕЗ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ НАНОСТРУКТУР

Актуальність дослідження пояснюється тим, що більше 50 країн ведуть дослідження й розробки в галузі нанотехнологій і не менше 30 країн мають свої національні програми в цій галузі. В цій роботі визначені основні етапи життєвого циклу продуктів нанотехнологій й їх вплив на довкілля. Встановлено елементи системи управління якістю наноструктур, які відповідають за екологічну безпеку нанопродуктів застосовуваних у виробках мікроелектроніки й фотоелектричних перетворювачах енергії. Забезпечення якості наноструктур зумовлює подовження терміну експлуатації виробів на їх основі, тобто подовжується життєвий цикл продукції. Крім того, знижується ймовірність виділення наночастинок у довкілля через стабілізацію поверхневих властивостей зразків. Подано структурні компоненти розгорнутої схеми системи управління технологічним процесом електрохімічного розчинення кристалу. Задачами управління процесом електрохімічного розчинення кристалу є встановлення таких технологічних режимів, при яких стає можливим отримання наноструктур із прогнозованими й програмованими властивостями з урахуванням зовнішніх факторів.

Ключові слова: екологічна безпека, наноматеріали, управління якістю, життєвий цикл.

Постановка проблеми. Закон України від 19.06.2003 р. № 964-IV «Про основи національної безпеки України» наголошує, що створення нових технологій і виробництв обумовлено підвищенням вимог до матеріалів і виробів з них. При цьому кожен технологічний процес супроводжується шкідливими викидами в атмосферу [1] і утворенням відходів з подальшим накопиченням важких металів у ґрунті та стічних водах [2].

Наразі полімерні синтетичні матеріали становлять приблизно 40...60% загальної маси відходів [3], близько 10% складають інженерні наноматеріали (ENM) [4], а кількість наноматеріалів в побутових товарах постійно зростає [5] і, після закінчення терміну експлуатації так само потрапляє у відходи. За деякими оцінками приблизно 20000 т/рік нанокмпозитів вивозиться на звалища як відходи [6]. До наноматеріалів традиційно відносять об'єкти, один з характерних розмірів яких лежить в інтервалі від 1 до 100 нм. Тобто практично кожен синтетичний матеріал може містити частки нанометрового розміру.

У свою чергу токсичність наноматеріалів в значній мірі пов'язана з присутніми в них домішками [7]. В силу особливих хімічних і фізичних характеристик наноматеріалів наслідки для безпеки довкілля в цей час мало вивчені [8].

Небезпека наноматеріалів полягає також в тому, що наночастинок можуть мати значну кількість обірваних зв'язків, які здатні приєднувати до себе вільні радикали [9].

Більше 50 країн ведуть дослідження й розробки в галузі нанотехнологій і не менше 30 країн мають

свої національні програми в цій галузі. При цьому існують припущення, що потрапляння наночастинок в біосферу призводить до негативних наслідків, прогнозувати які наразі не є можливим через нестачу інформації. Дослідники відзначають, що токсичність наноматеріалів в значній мірі пов'язана з присутніми в них домішками, а не з самими матеріалами. Однак до сьогодні відомості про наслідки неконтрольованих викидів наночастинок в навколишнє природне середовище залишаються досить мізерними. Дослідження показали, що саме ті якості наноматеріалів, які роблять їх затребуваними, можуть нести потенційну екологічну загрозу. Сьогодні є важливим визначитись: або застосовувати потенційно-небезпечні матеріали, або відмовитись від них на користь екологічно чистих й достатньо досліджених. Наразі системний підхід з визначення ступеня небезпеки продуктів нанотехнологій протягом їх життєвого циклу відсутній. Також не відсутні досі методи визначення їхньої небезпеки на кожному етапі, недостатньо досліджені питання екологічної безпеки їх застосування. Принциповим питанням є розробка системи управління якістю наноструктур як складової системи управління екологічною безпекою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Небезпека наноматеріалів полягає в тому, що наночастинок можуть мати значну кількість обірваних зв'язків, які здатні приєднувати до себе вільні радикали [9]. Матеріали з наночастинками можуть містити вуглецеві волокна [10], вуглецеві нанотрубки [11], наночастинок кремнезему [12] і

оксиди металів [13]. При дослідженні екологічної безпеки таких матеріалів після закінчення терміну служби авторами робіт [6, 14] була розроблена інтегрована система для дослідження термічного розкладання вуглецевих нанотрубок в контрольованих умовах при високих температурах – 800 °C і вище. Однак згідно багаторічними спостереженнями за полігонами депонування відходів дослідниками встановлено, що температура в товщі полігону зберігається на рівні 20...80 °C відповідно до джерела [15] і відповідно до [16] – 20...65 °C, а вологість в найбільшій мірою залежить від пори року і коливається 40...80 %.

Деякі автори вважають, що для забезпечення безпеки наноматеріалів, потрібні методи їх ідентифікації в екологічних і біологічних системах [17]. Ці методи повинні мати можливість специфічно ідентифікувати наноматеріали, оскільки було доведено, що молекулярна і об'ємна форма матеріалів, що містять один і той же елементарний профіль, матимуть різні фізичні і хімічні властивості [18, 19].

В роботі [20] авторами показано, що стандартні токсикологічні методи не можуть бути застосовані до визначення небезпеки наноматеріалів. Це пояснюється тим, що їх властивості обумовлені, не тільки концентрацією, а й специфічними квантово-розмірними властивостями [21]. Таким чином, можна стверджувати, що багато вчених вказують на

потенційну небезпеку продуктів нанотехнологій для навколишнього середовища і здоров'я людини. Крім того, сучасна наука зосереджується на таких питаннях як: життєвий цикл товарів з названих матеріалів [22, 23], методи оцінки якості наноструктур [24], утилізація наноматеріалів і їх похідних [25].

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є встановлення елементів системи управління якістю наноструктур, які відповідають за екологічну безпеку нанопродуктів для виробів мікроелектроніки й фотоелектричних перетворювачів енергії. Для досягнення мети були поставлені й вирішені такі завдання:

- визначення основних етапів життєвого циклу продуктів нанотехнологій й їх впливу на довкілля;
- встановлення основних факторів, які впливають на якість наноструктур;
- встановлення елементів системи управління якістю наноструктур для управління екологічною безпекою наноматеріалів.

Життєвий цикл наноматеріалів. Проведення повного дослідження з безпеки застосування наноматеріалів й їх впливу на довкілля і організм людини є довготривалим і наукоємним процесом. До того ж наноматеріали можуть становити небезпеку як в процесі їх використання, так й всіх інших етапах життєвого циклу (рисунку 1).

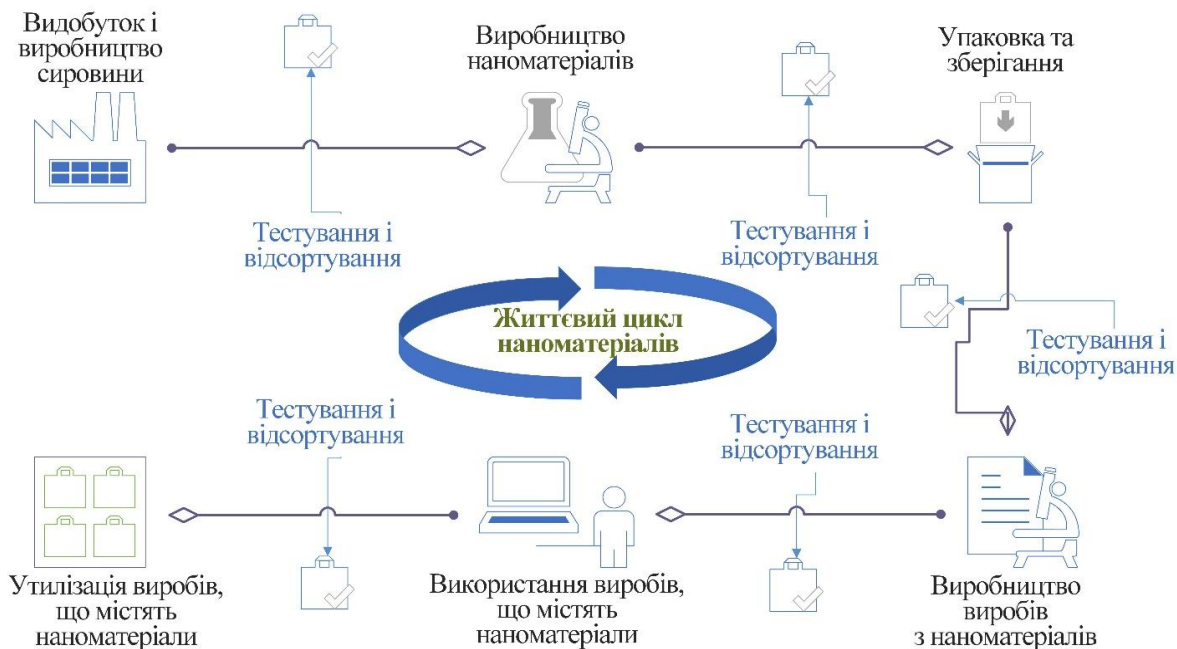


Рисунок 1 – Схема життєвого циклу наноматеріалів

Для оцінки екологічної безпеки наноматеріалів слід враховувати специфічні особливості кожної стадії. Стадія «Видобуток і виробництво сировини» характеризується виснаженням природних ресурсів, необхідністю розробки родовищ з більш складними

гірничо-геологічними й технічними умовами освоєння, значним порушенням ґрунтового покриву. Під «Виробництвом наноматеріалів» розуміємо безпосередній їх синтез. Відмітною особливістю цієї стадії є потрапляння у навколишнє середовище

наночастинок, застосовуваних для виготовлення наноматеріалу. Ті ж самі специфічні особливості наночастинок, як летючість, розчинність, взаємодія з повітрям і водою тощо, потребують уваги на стадії «Зберігання й пакування». Оскільки, наноматеріали далі інтегрують у виробу, то стадії «Виробництво виробів з наноматеріалів» й «Використання наноматеріалів» мають бути досліджені з точки зору забезпечення якості й надійності продукту, що безпосередньо впливає на безпеку під час експлуатації. Важливість дослідження стадії «Утилізація і відходи» обґрунтована тим, що в багатьох випадках виробу із наноматеріалами потрапляють у відходи, які розміщують на полігонах їх депонування. Під час термоокислювального розкладання відходів можлива міграція наночастинок у довкілля з виробів із нановключеннями. Ступінь небезпеки відходів для довкілля залежить від класу і концентрації токсичних речовин, які містяться у відходах, а також від синергічного ефекту декількох компонентів. На стадії «Тестування і відсортування» проводять виявлення придатних виробів до подальшого використання. Залежно від вимог, які висуваються до якості наноматеріалів, їх тестують візуальним оглядом, із використанням електронної

мікроскопії, фотолюмінесценції, рентгенівській дифрактометрії тощо. Вже на цій стадії є можливим утворення відходів.

Фактори, які впливають на якість наноматеріалів. Для створення нанопродукту необхідно застосовувати надсучасні методи синтезу й аналізу властивостей. Для цього необхідним є встановлення властивостей наноструктур, які будуть використані для певної галузі, й виділення чинників, які впливають на безпеку та якість наноматеріалів (таблиця 1). Наведені дані вказують на необхідність звернути увагу на покращення точності проведення контролю якості нанопродукції, дотримання режимів синтезу, застосування й утилізації. Доцільним є додати до етапів життєвого циклу продуктів нанотехнологій ще етап – «Реалізація споживачам», – оскільки якість будь-якого матеріалу необхідно розглядати з позицій застосування його як товару.

З таблиці 1 видно, що на якість продуктів нанотехнологій на кожному з етапів життєвого циклу впливають різні фактори. Системно оцінити якість наноматеріалів та їх екологічну безпеку є можливим після дослідження цих впливів.

Таблиця 1 – Основні фактори, які впливають на якість наноматеріалів й продуктів на їх основі

| № п/п | Назва фактору, який впливає на якість нанопродукту | Назва стадії | | | | | | |
|-------|--|----------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|
| | | Видобуток і виробництво сировини | Виробництво наноматеріалів | Зберігання й упаковка | Виробництво нанопродукту | Реалізація споживачам | Експлуатація нанопродукту | Утилізація й відходи |
| 1 | Якість сировини (напівпровідники) | + | + | + | + | | + | + |
| 2 | Якість сировини (електроліти, домішки тощо) | + | + | | + | | | + |
| 3 | Технології виробництва наноматеріалів | + | + | + | + | + | + | + |
| 4 | Технології тестування й контролю якості наноматеріалів | + | + | + | + | + | + | + |
| 5 | Кваліфікація персоналу | + | + | + | + | | | + |
| 6 | Якість обладнання | + | + | + | + | | | + |
| 7 | Вартість сировини і методів синтезу | + | + | + | + | + | + | |
| 8 | Дотримання режимів обробки й зберігання | + | + | + | + | + | + | + |
| 9 | Санітарно-гігієнічні умови | + | + | + | + | + | + | + |
| 10 | Точність вагового дозування | + | + | + | + | + | | + |
| 11 | Технології утилізації | + | + | + | + | | | + |

Елементи системи управління якістю наноструктур та їх взаємозв'язок. Забезпечення якості наноструктур зумовлює подовження терміну експлуатації виробів на їх основі, тобто подовжується життєвий цикл продукції. Крім того, знижується ймовірність виділення наночастинок у довкілля через стабілізацію поверхневих властивостей зразків. Це сприяє експлуатаційній надійності наноструктур і підвищенню рівня техногенно-екологічної безпеки.

Управління якістю наноструктур розглянемо на прикладі одного з методів синтезу наноструктурованих поверхонь – електрохімічному травленні

кристалів. Цей метод є загальноживим завдяки простоті, дешевизні і відсутності необхідності у високотехнологічному обладнанні. Технологія методу постає у тому, що оброблюваний кристал поміщають у електролітичну комірку з розчином електроліту. Як катод виступає пластина платини, анод – напівпровідник. Під час пропускання електричного струму на поверхні кристалу формуються наноструктури. Для нанопродуктів застосовуваних у виробіках мікроелектроніки й фотоелектричних перетворювачах енергії, наноструктури здебільшого являють собою поруваті шари.

Кажучи про управління процесом електрохімічного формування пор на поверхні напівпровідників, розглянемо систему управління в цілому та її підсистему – «напівпровідник – електроліт». Оскільки на підсистему – «напівпровідник – електроліт» діє безліч зовнішніх факторів, то вона є відкритою. Суб'єктом системи управління виступатиме процес електрохімічної обробки кристалів, а об'єктом управління, тобто керованою системою, вважатимемо підсистему «напівпровідник – електроліт». Стан керованої системи залежить від зовнішніх впливів, впливів з боку керуючого органу (управління) і дій самої керованої системи (рисунок 2). Під діями керованої системи розуміємо процеси самоорганізації утворення наноструктур на поверхні напівпровідників.

Основне завдання управління процесом електрохімічного розчинення кристалу (УПЕРК) полягає у здійсненні таких управлінських дій, які дадуть змогу забезпечити необхідний стан керованої системи. До того ж при цьому буде врахована інформація про зовнішні дії. Розгорнена схема з поясненням структурних компонентів і їх взаємодії представлена на рисунку 3.



Рисунок 2 – Загальна схема системи управління процесом електрохімічного розчинення кристалу

Зовнішнє середовище слід розуміти як сукупність всіх об'єктів/суб'єктів, що не входять в дану систему, і об'єктів/суб'єктів, чії властивості змінюються в залежності від стану системи (рисунок 4). Змінювання їх властивостей впливає на досліджувану систему.

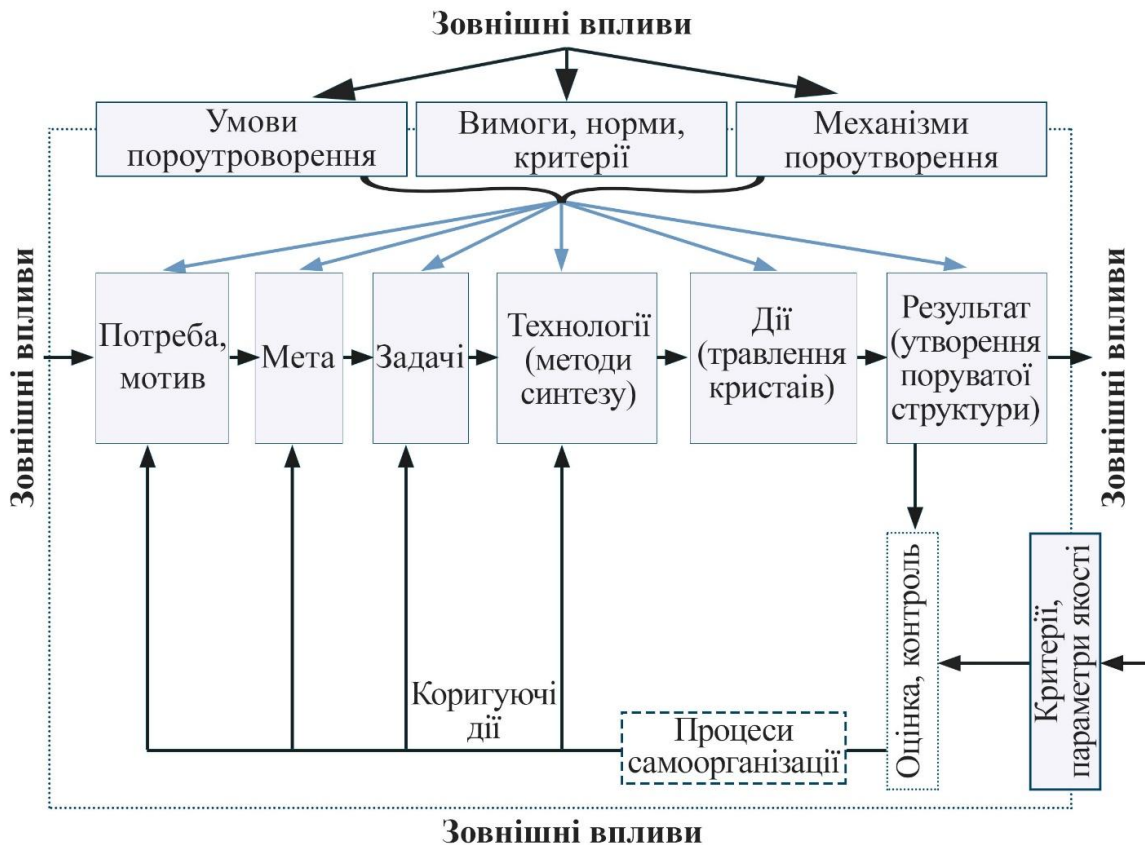


Рисунок 3 – Структурні компоненти розгорнутої схеми системи управління технологічним процесом електрохімічного розчинення кристалу



Рисунок 4 – Зовнішні впливи, що діють на систему «напівпровідник/електроліт»

Таким чином, під час управління процесом пороутворення на поверхні кристалу слід враховувати:

- умови пороутворення, під якими слід розуміти режими електрохімічної обробки кристалів;
- вимоги, що висуваються до якості одержаних наноструктур;
- механізми, що лежать в основі процесу пороутворення.

Управління процесом електрохімічного розчинення кристалу починається з потреби, що зумовлена необхідністю створення наноматеріалів із заданими властивостями. Це стає можливим лише за умови контрольованості процесу та розуміння основних механізмів, що лежать в основі пороутворення. Задачами управління процесом електрохімічного розчинення кристалу є встановлення таких технологічних режимів, при яких стає можливим отримання наноструктур із прогнозованими та програмованими властивостями. При цьому насамперед необхідно визначитися з методами синтезу наноструктур, які враховують додаткові умови й впливів зовнішніх факторів. Далі обирається певна дія (або набір дій), яка з урахуванням впливу навколишнього середовища призводить до певного результату діяльності. Вибір дій ґрунтується на визначенні етапів формування наноструктур і визначається безпосереднім їх виготовленням.

Для оцінки результату отриманні наноструктури порівнюють з еталонними за заздалегідь визначеними критеріями якості. При цьому вибір критеріїв зазвичай диктується цілями оцінки. Оцінка відбувається на основі аналізу дослідження поверхні кристалу.

Висновки. Таким чином, у статті представлено елементи системи управління якістю наноструктур

як підсистеми управління екологічною безпекою. Управління якістю наноструктур розглянуто на прикладі одного з методів синтезу наноструктурованих поверхонь – електрохімічному травленні кристалів. Показано, що при побудові системи управління процесом пороутворення на поверхні кристалу необхідно враховувати умови синтезу наноматеріалів, вимоги, що висуваються до якості одержаних структур та механізми, що лежать в основі процесу формування наноструктурованих поверхонь. Для оцінки якості продуктів нанотехнологій було встановлено основні етапи життєвого циклу продуктів нанотехнологій. На кожному з етапів життєвого циклу проаналізовано основні фактори, що впливають на якість наноструктур. Показано, що оцінка контролю якості виробництва та застосування наноматеріалів повинна включати багаторівневу ієрархічну систему контролю якості нанотехнологічної продукції, яка на кожному з рівнів відображатиме систему контролю та надасть можливість простежити процес застосування наноматеріалів на всіх стадіях життєвого циклу.

Подяка

Робота була виконана в рамках наукових держбюджетних досліджень:

– «Наноструктуровані напівпровідники для енергоефективних екологічно безпечних технологій, що підвищують рівень енергозбереження та екологічної безпеки урбосистеми» (державний реєстраційний номер 0116U006961);

– «Розробка технологи оцінювання показників якості та безпеки продуктів нанотехнологій протягом життєвого циклу» (державний реєстраційний номер 0116U006961).

ЛІТЕРАТУРА

1. Golinko, V. I. Reserch of air and dust balance in inclined shaft of the mine No. 9–10 at Marganetskiy Dressing Plant / V. I. Golinko, I. O. Luts, Ye. A. Yavorskaya // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2012. – № 3. – P. 98–101.
2. Voitiuk, Y. Y. Ecological and geochemical assessment of the soil contamination levels in the areas of metallurgical enterprises operation / Y. Y. Voitiuk, I. V. Kuraieva, A. A. Kroik, A. V. Pavlychenko // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2014. – №. 4. – P. 45–51.
3. Рашкевич, Н. В. Исследование состава продуктов горения синтетического волокна [Текст] / Н. В. Рашкевич // East journal of security studies. – Vol. 1/2017. – P. 194–201.
4. Yamaguchi, S. Incineration of waste containing nanomaterial [Text] / S. Yamaguchi // Environment Policy Committee. – ENV/EPOC/WPRPW(2013)3/final – 2015. – 14 p.
5. Алексеева, О. Финансирование и рынок [Текст] / О. Алексеева // ПерсТТМ. – 2011. – Т. 18. – Вып. 11/12. – 4 с. – Режим доступа: http://perst.ispp.ras.ru/Control/Inform/perst/2011/11_11_12/index.htm.
6. Watson-Wright, C. et al. Toxicological implications of released particulate matter during thermal decomposition of nano-enabled thermoplastics [Text] / C. Watson-Wright et al. // NanoImpact. – Vol. 5(2017). – P. 29–40.
7. Suchikova, Y. A. Sulfide passivation of indium phosphide porous surfaces [Text] / Y. A. Suchikova // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2017. – Vol. 5. – Issue 4. – P. 04001-1–04001-4.
8. Waste containing nanomaterials / The Organisation for Economic Cooperation and Development. – Available: <http://www.oecd.org/environment/waste/nanowaste.htm>.
9. Suchikova, Y. A. Synthesis of indium nitride epitaxial layers on a substrate of porous indium phosphide / Y. A. Suchikova // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2015. – Vol. 7. – Issue 3. – P. 03017-1–03017-3.
10. Al-Saleh, M. H. Carbon nanofiber/polyethylene nanocomposite: Processing behavior, microstructure and electrical properties [Text] / M. H. Al-Saleh, G. A. Gelves, U. Sundararaj // Materials & Design (1980-2015). – December, 2013. – Vol. 52. – P. 128–133.
11. Sahoo, N. G. Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes [Text] / N. G. Sahoo, S. Rana, J. W. Cho et al. // Progress in Polymer Science. – Vol. 35. – Issue 7. – July, 2010. – P. 837–867. – Available: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.03.002>.
12. Dušica, B. S. Transparent PMMA/silica nanocomposites containing silica nanoparticles coating under supercritical conditions [Text] / B. S. Dušica, L. Brajović, A. Orlović et al. // Progress in Organic Coatings. – April, 2013. – Vol. 76(4). – P. 626–631.
13. Perkgoz, N. K. Photocatalytic hybrid nanocomposites of metal oxide nanoparticles enhanced towards the visible spectral range [Text] / R. S. Toru, E. Unal, M. A. Sefunc et al. // Applied Catalysis B: Environmental. – 9 June 2011. – Vol. 105. – Issues 1–2. – P. 77–85. – Available: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.03.037>.
14. Singh, D. End-of-life thermal decomposition of nano-enabled polymers: effect of nanofiller loading and polymer matrix on by-products [Text] / D. Singh, G. A. Sotiriou, F. Zhang et al. // Environmental Science: Nano. – 2016. – Vol. 3. – Issue 6. – P. 1293–1305. – doi: 10.1039/C6EN00252H.
15. Шаимова, А. М. Изучение факторов метангенерации в условиях полигона твердых бытовых отходов [Текст] / А. М. Шаимова, Л. А. Насырова, Р. Р. Фасхутдинов // Башкирский химический журн. – 2011. – № 2. – С. 172–176. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-faktorov-metangeneratsii-v-usloviyah-poligona-tverdyh-bytovyh-othodov>.
16. Осипова, Т. А. Прогнозирование выхода биогаза и температуры полигона твердых бытовых отходов на основе математического моделирования [Текст] / Т. А. Осипова, Н. С. Ремез // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – Вип. 3/2015(92). – С. 144–149.
17. Beaudrie, C. Фонд химического наследия. Новые нанотехнологии и регулирование жизненного цикла: исследование федерального нормативного надзора за производством наноматериалов до конца 2010 года. – Режим доступа: <http://www.chemheritage.org/Downloads/Publications/White-Papers/Studies-in-Sustainability/Beaudrie.pdf>.
18. Suchikova, Y. A. Preparation of nanoporous n-InP (100) layers by electrochemical etching in HCl solution [Text] / Y. A. Suchikova, V. V. Kidalov, G. A. Sukach // Functional Materials. – 2010. – № 17(1). – P. 131–134.
19. Lazarenko, A. S. Model of Formation of Nano-Sized Whiskers Out of Channels of the Triple Junctions of Grain Boundaries of Polycrystal [Text] / A. S. Lazarenko // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2011. – Vol. 3. – Issue 4. – С. 59.
20. Seager, T. P. Coupling Multicriteria Decision Analysis and Life Cycle Assessment for Nanomaterials [Text] / T. P. Seager, I. Linkov // Journal of Industrial Ecology. – 2008. – Vol. 12. – Issue 3. – P. 282–285.
21. Suchikova, Y. A. Blue shift of photoluminescence spectrum of porous InP [Text] / Y. A. Suchikova, V. V. Kidalov, A. A. Konovalenko, G. A. Sukach // ECS Transactions. – 2010. – Vol. 25(24). – P. 59–64.

22. Rajendran, V. Development of Nanomaterials from Natural Resources for Various Industrial Applications [Text] / V. Rajendran // *Advanced Materials Research*. – 2009. – Vol. 67. – P. 71–76.
23. Analysis of the ways to provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle [Text] / S. Vambol, V. Vambol, Y. Suchikova, N. Deyneko // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol 1. – № 10 (85). – P. 27–36.
24. Jones, R. Are natural resources a curse? [Text] / R. Jones // *Nature Nanotechnology*. – 2007. – № 2. – P. 665–667.
25. Efros, A. L. Origin and control of blinking in quantum dots [Text] / A. L. Efros, D. J. Nesbitt // *Nature Nanotechnology*. – 2016. – № 11. – P. 661–671.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2017 р.

I. Bogdanov, Y. Suchikova, S. Vambol, V. Vambol

ENSURING OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF NANOMATERIALS BY CONTROLLING THE QUALITY OF NANOSTRUCTURES

The relevance of the study is explained by the fact, that more than 50 countries conduct research and development in the field of nanotechnology and at least 30 countries have their own national programs in this field. In this paper, the main stages of the life cycle of nanotechnology products and their impact on the environment. The elements of a quality management system for nanostructures that are responsible for the environmental safety of nanoproducts used in microelectronics and photoelectric energy converters. Ensuring the quality of nanostructures leads to the extension of the life of the products on their basis, that is, the life cycle of products. In addition, the probability of nanoparticle release into the environment is reduced through the stabilization of the surface properties of the samples. Structural components of the detailed scheme of the control system for the technological process of electrochemical dissolution of a crystal. The tasks of controlling the process of electrochemical dissolution of a crystal are the establishment of such technological regimes in which it becomes possible to obtain nanostructures with predictable and programmable properties taking into account external factors.

Keywords: environmental safety, nanomaterials, quality management, life cycle.

И. Т. Богданов, Я. А. Сычикова, С. А. Вамболь, В. В. Вамболь

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ ПОСРЕДСТВОМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НАНОСТРУКТУР

Актуальность исследования объясняется тем, что более 50 стран ведут исследования и разработки в области нанотехнологий и не менее 30 стран имеют свои национальные программы в этой области. В этой работе определены основные этапы жизненного цикла продуктов нанотехнологий и их влияние на окружающую среду. Установлены элементы системы управления качеством наноструктур, которые отвечают за экологическую безопасность нанопродуктов применяемых в изделиях микроэлектроники и фотоэлектрических преобразователях энергии. Обеспечение качества наноструктур приводит к продлению срока эксплуатации изделий на их основе, то есть увеличивается жизненный цикл продукции. Кроме того, снижается вероятность выделения наночастиц в окружающую среду через стабилизацию поверхностных свойств образцов. Представлены структурные компоненты развернутой схемы системы управления технологическим процессом электрохимического растворения кристалла. Задачами управления процессом электрохимического растворения кристалла является установление таких технологических режимов, при которых становится возможным получение наноструктур с прогнозируемыми и программируемыми свойствами с учетом внешних факторов.

Ключевые слова: экологическая безопасность, наноматериалы, управление качеством, жизненный цикл.