

УДК 69:504

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261021.7.796

НАНОТЕХНОЛОГІЇ В БУДІВНИЦТВІ

БАЛАН О. С., студ.

Факультет промислового та цивільного будівництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 449-83-04, e-mail: 16001.balan@365.pgasa.dp.ua

Анотація. Постановка проблеми. Косметика, одяг і навіть харчова упаковка: наноматеріали вторглися у повсякденне життя. Будівельний сектор не виняток, і, безперечно, постає одним із найбільших користувачів цієї технології. Важко зрозуміти, чи містить будівельний виріб наноматеріали. Справді, на відміну від певних продуктів, таких як косметика, їжа чи біоциди (інсектициди, миючі засоби), жодні нормативні акти не встановлюють спеціального маркування. Однак наноматеріали дуже поширені і використовуються для поліпшення властивостей штукатурки, скла, плитки, ізоляційних металів, фарб тощо. Переваги застосування наночастинок у будівництві величезні, вони надають надзвичайні фізичні та хімічні властивості для модифікованих будівельних матеріалів. Серед безлічі різних типів наночастинок діоксид титану, вуглецеві нанотрубки, діоксид кремнію, мідь, глина та оксид алюмінію найширше використовувані наночастинок в будівельному секторі [1]. **Мета статті** – проаналізувати використання наночастинок у будівельній галузі для ілюстрування переваг їх застосування та з'ясування короткострокових та довгострокових впливів наночастинок на навколишнє середовище та здоров'я людини в мікросвіті промисловості. Висновки можуть бути узагальненими. Результати. Проаналізовано використання нанотехнологій в будівництві та їх властивості. Виконано аналіз проблеми використання нанотехнологій в будівництві.

Ключові слова: нанотехнології; атом; молекула; будівельні матеріали

NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

BALAN O.S., Stud.

Faculty of Industrial and Civil Construction, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (099) 449-83-04, e-mail: 16001.Balan@365.pgasa.dp.ua

Abstract. Problem statement. Cosmetics, clothing, and even food packaging: nanomaterials have invaded our daily lives. The construction and construction sector is no exception, and is undoubtedly one of the largest users of this technology. It is difficult to know if a building product contains nanomaterials. Indeed, unlike certain products, such as cosmetics, food or biocides (insecticides, detergents), no regulations establish special labeling. However, they are very widespread and are used to improve the properties of most materials: cement, plaster, glass, tiles, insulation metals, paints, etc. The benefits of using nanoparticles in construction are huge, promising extraordinary physical and chemical properties for modified building materials. Among the many different types of nanoparticles, titanium dioxide, carbon nanotubes, silicon dioxide, copper, clay, and aluminum oxide are the most widely used nanoparticles in the construction sector [1]. **The purpose of this article** is to analyze the use of nanoparticles in the construction industry to illustrate the benefits of using nanoparticles and address the short – and long-term effects of nanoparticles on the environment and human health in the microcosm of industry, so that the results can be generalized. **Results.** The use of nanotechnologies in construction and their properties are analyzed. **Scientific novelty and practical significance.** The problem of using nanotechnologies in construction is analyzed.

Keywords: nanotechnology; atom; molecule; building materials

Постановка проблеми. Результати експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку токсичності наночастинок для людини і навколишнього середовища, суперечливі. Крім того, існує складність у відмінності між виготовленими наночастинками та наночастинками (у

великій кількості), які природно присутні в навколишньому середовищі (надтонкі частинки).

Таким чином, в даний час важко зрозуміти наслідки з точки зору небезпеки переходу речовини в нанорозмірне вимірювання.

Результати експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку токсичності наночастинок для людини і навколишнього середовища, суперечливі. Крім того, існує складність у відмінності між виготовленими наночастинками та наночастинками (у великій кількості), які природно присутні в навколишньому середовищі (надтонкі частинки). На засіданнях обговорювалося кілька типів невизначеностей. Таким чином, в даний час важко зрозуміти наслідки з точки зору небезпеки переходу речовини в нанорозмірне вимірювання. Можливість проникнення наночастинок через шкіру (особливо у випадку пошкодженої шкіри, через венули або нервові закінчення або через волоссяний фолікул) не достатньо досліджено. Точно так само чи можуть вуглецеві нанотрубки викликати пошкодження, подібні до азбестових волокон? Деякі дослідження [22] припускають це, але не можна з упевненістю сказати, що результати цих досліджень можна екстраполювати на тисячі різних форм вуглецевих нанотрубок, які виходять з дослідницьких лабораторій.

Переваги використання наночастинок демонструються завдяки специфічному застосуванню у звичайних матеріалах, особливо у звичайному бетоні, асфальтобетоні, цеглі, деревині та сталі.

Наноматеріали належать до світу нескінченно малого. Для ілюстрації, фулерен C60 у 50 000 разів менше діаметра волосся (рис. 1).

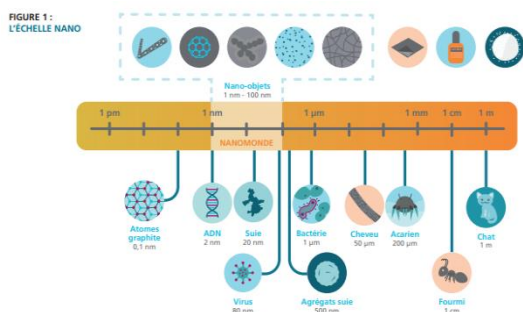


Рис. 1. Фулерен C60 [1]

Нанонаука – це дослідження явищ і об'єктів на атомарному, молекулярному і

макромолекулярному рівнях, характеристики яких істотно відрізняються від властивостей їх макроаналогів., а нанотехнології – це застосування нанонаук для отримання продуктів [2].

Нанотехнології (НТ) (грецьке слово «nannos» означає «карлик») – це сукупність методів маніпулювання речовиною на атомному або молекулярному рівні з метою отримання наперед заданих властивостей. До нанотехнологій відносять технології, що забезпечують можливість контрольованим чином створювати і модифікувати наноматеріали, а також здійснювати їх інтеграцію в повноцінно функціонуючі системи більшого масштабу. Нанотехнології вміщують: атомне сполучення молекул, локальну стимуляцію хімічних реакцій на молекулярному рівні та ін. Процеси нанотехнології підлягають законам квантової механіки.

Наноматеріали (НМ) – це дисперсні або масивні матеріали (структурні елементи – зерна, кристаліти, блоки, кластери), геометричні розміри яких хоча б в одному вимірі не перевищують 100 нм і такі, що мають якісно нові властивості, функціональні й експлуатаційні характеристики, які проявляються завдяки наномасштабним розмірам [3].

Ось наноматеріали, які застосовуються в будівельній галузі:

- вуглецеві нанотрубки або випарені аморфні кулі з діоксиду кремнію для поліпшення стійкості цементів, бетону або пластмас;

- нанотитану діоксид (TiO_2) – завдяки його самоочисним властивостям у фарбах, цементах або склі;

- наносрібло – за його бактеріцидні та фунгіцидні властивості в покриттях підлоги та стін;

- наночастинки міді для поліпшення тріщиностійкості сталей.

Бетон. Бетон використовується як будівельний матеріал протягом багатьох років. До основних компонентів бетону, що застосовуються в сучасному будівництві, належать в'язучі речовини на основі портландцементу, води, а також грубих та

дрібних заповнювачей. Для модифікації властивостей бетону для певного застосування додають хімічні домішки, такі як суперпластифікатори, у невеликих кількостях. Важливо розробити ці зміни, оскільки довговічність та справність бетонних конструкцій та поверхонь постійно перевіряються за впливу різних погодних умов. Довговічність бетону залежить від стику з'єднання між порожнечами, заповнювачами та цементною пастою. Тому наноматеріали з такими властивостями як міцність становлять особливий інтерес для виробництва бетону [10–13].

У звичайному бетоні кремній (SiO_2) присутній як частина стандартизованої суміші. Проте останніми дослідженнями

встановлено, що використання нанокремнезему (NS) у бетонних та цементних пастах поліпшило набивання частинок в обох матеріалах. NS діє як нанонаповнювач для частинок гідрату силікату кальцію ($\text{Ca} - \text{Si} - \text{H}$) у цементі та як сильний зв'язуючий агент, збільшуючи тим самим зчеплення між цементом та заповнювачем.

Швидкість гідратації цементу також зросла, що ефективно скорочує час схоплювання, період спокою та збільшує ранню міцність. Нанокремнезем також зменшує пористість бетону, послаблюючи здатність води та інших елементів проникати в бетон, що дозволяє уникнути деградації бетону.

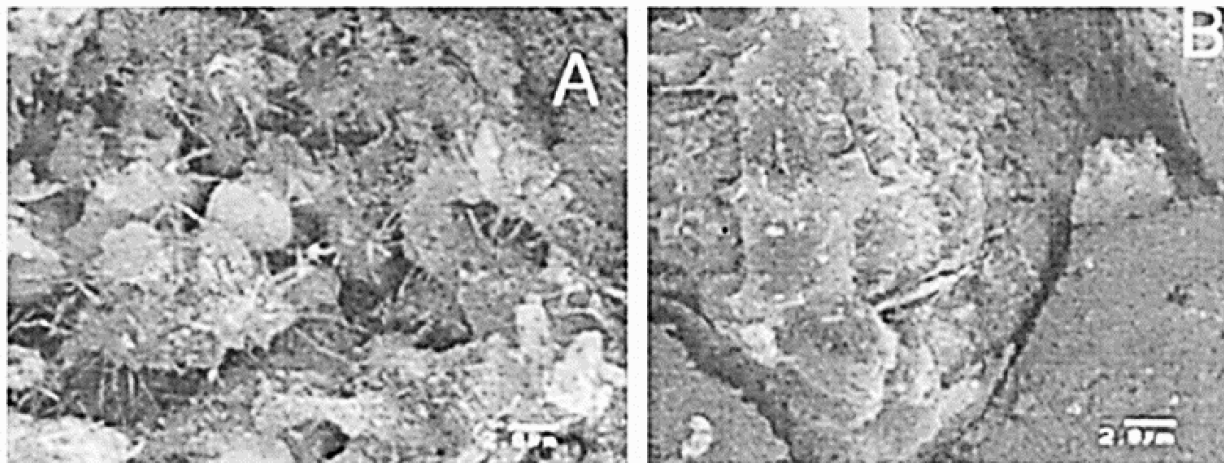


Рис. 2. SEM мікрофотографії звичайної (А) та модифікованої нанокремнієвої цементної пасту (В)

На рисунку 2 наведено мікрофотографії виконані сканувальним електронним мікроскопом (SEM), простої цементної пасту та модифікованої нанокремнієвої цементної пасту.

Цегла. Цегла використовується як будівельний матеріал протягом століть. Вона складається з 50 % (але не більше 80 %) глини, а решта – пісок та інші гранульовані матеріали. Зв'язані між собою за дії високих температур, вони набувають міцності, що робить цеглу винятковим будівельним матеріалом.

Однак сучасна не демонструє хорошої міцності на стиск. Вчені дослідили вплив наноглини на якість цегли [4]. Наноглини –

шаруваті мінеральні силікати наночастинок. Результати показують, що 5 % включення наноглини може розвивати міцність на стиск, яка в 4,8 раза перевищує міцність звичайної глини. Модифікатор наноглини переважає як більш стійкий матеріал порівняно зі звичайною глиняною цеглою.

Стефаніду і Каразоу випробували ефективність різних захисних покриттів на цеглі та порівняли фізичні властивості кожного розчину. Випробовували лляну олію, силан/силоксан та алкосилоксан, модифіковані 1...1,5 % наночастинками діоксиду кремнію. Результати показують, що наночастинки алкосилоксану та діоксиду кремнію виявляються найбільш ефективні. Оброблена ними цегла демонструє високу

стійкість до поглинання води та значно довговічніша [14–15].

Сталь. Вироби із сталі одні з найширше використовуваних будівельних матеріалів завдяки довговічності. Вони мають найвище відношення міцності до ваги порівняно з іншими будівельними матеріалами. Крім того, сталь вогнестійка; отже, під час пожежі вона не згорить. Це відмінний будівельний матеріал, оскільки його можна постійно переробляти, і цей процес не шкодить його властивості [20–21].

Однак виробляються більш міцні типи сталі шляхом додавання наночастинок у фарбу для її покриття арматурних прутків для бетонної конструкції. Ці прутки виконують із мікрокомпонентної багатоструктурної плавильної сталі (MMFX), кращої порівняно зі звичайними сталями завдяки корозійній стійкості та довговічним властивостям. Зі звичайною сталлю нерівність поверхні спричинює підвищення напруги, а отже, втомне розтріскування. Застосовуючи наночастинок як модифікатор, можна зменшити розтріскування. Крім того, дослідження показали, що ефекти водневої крихкості та міжгранулярної фази цементиту зменшуються завдяки вдосконаленню мікроструктури сталі [5].

Хегазі та інші науковці [6] вивчали вплив колоїдних наночастинок міді як модифікатора сталевих антикорозійних фарб. Готували колоїдний дисперсійний розчин наночастинок міді із застосуванням методу хімічного відновлення хлориду міді (II) (CuCl_2). Було проведено кілька випробувань для дослідження властивостей модифікованого покриття на вуглецевій сталі. Сталеve антикорозійне покриття демонструє максимальну ефективність гальмування за впливу 0,5 wt % розчину наночастинок міді. Результати показують, що модифіковане покриття забезпечує міцне покриття вуглецевої сталі і захист від корозії [6].

Існують основні потенційні ризики, які необхідно враховувати на всіх етапах нанотехнологій. Аспекти оцінювання ризику включають токсикологічний аналіз,

короткостроковий та довгостроковий вплив наноматеріалів на довкілля та здоров'я людини протягом життєвого циклу матеріалів, а також ризики, пов'язані з утилізацією наноматеріалів.

Незважаючи на безперечну корисність наноматеріалів, вони викликають занепокоєння щодо ризиків для здоров'я та довкілля. Мікроскопічні розміри дозволяють їм перетинати природні захисні бар'єри, проходити через тканини та через кров, досягати печінки, серця та селезінки [16].

Загалом наукові знання в цій галузі все ще надто неповні.

Усі наноматеріали не можуть становити однаково безпеку. Характер використовуваного матеріалу, його здатність зберігатися в організмі, а також його форма (у кульках, трубках тощо), ймовірно, можуть змінити ризики для здоров'я.

Також токсикологи попереджають про різний ступінь впливу наноматеріалів. Було б менше ризику піддавати себе «інертним» наносполукам, інтегрованим, наприклад, у метал або пластмасу, ніж легким сполукам, що виділяються, наприклад, під час висихання фарби або нагрівання покриття. Бетон або деревина, що містять наночастинок, також становлять небезпеку під час різання або знесення [7].

Знесення конструкції створює високі ризики впливу на навколишнє середовище через викид наноматеріалів. Дуже важливо видалити та утилізувати будь-який небезпечний матеріал перед тим, як розпочати процес знесення за допомогою вибухових речовин або важких машин. Хоча покриття відносно легко видалити, композиційні структури, такі як бетон, модифікований наночастинками, майже неможливо розділити. Отже, на етапі руйнування викид наноматеріалів у навколишнє середовище може бути неконтрольованим, тому потрібно застосовувати суворі стандартні процедури знесення. Подрібнені тверді наноматеріальні відходи від знесення слід транспортувати до місць захоронення.

За відсутності встановлених даних щодо токсичності наноматеріалів вчені та будівельні фахівці рекомендують вживати профілактичних заходів. У світлі попередніх скандалів, зокрема, щодо азбесту, принцип обережності видається суттєвим.

З наноматеріалами, як і з ризиками, спричинені токсичністю, найкраща стратегія профілактики – це максимально уникати чи зменшувати вплив [8].

Ось декілька методів запобігання шкідливого впливу [19]:

- Використовуйте в майстернях пристрої для збирання відходів і вентиляції та всмоктувальні пристрої з фільтром на переносному обладнанні (пилка, шліфувальна машина тощо).

- Уникайте утворення пилу, працюючи «мокрим» способом або віддаючи перевагу «м'яким» методам різання (ручна, а не електрична пилка тощо).

- Використовуйте відповідні засоби індивідуального захисту: маску з фільтром, рукавички та захисний одяг від хімічного ризику.

- Регулярно та ретельно прибирайте приміщення та установки.

- Навчайте працівників хімічним ризикам, включаючи ризики які можуть виникнути через контакт з наночастинками.

Висновки. Спонукований зростанням урбанізації та нагальною потребою мінімального впливу на наші ресурси та наше довкілля, світ будівництва – це місце для інновацій таких, наприклад, як нанотехнології. Це стосується як багатоквартирних будинків, так і приватного сектора міського середовища та наших основних інфраструктур, незалежно від того, чи це енергія, екологія чи мобільність.

Вплив нанотехнологій на основний матеріал цивільного будівництва – бетон – та на основні інженерні споруди та дорожню мережу беззаперечний. Використання наноматеріалів у кабелях мостів зробить їх активними компонентами, так само як використання нанотехнологій наділить дорогу функціональними можливостями, які зроблять її більш пристосованою, еластичною та автоматизованою [9].

Проте, використання наноматеріалів вимагають обережності і демонструють, що вкрай важливо, щоб кожна нанорозмірна форма хімічної сполуки, що надходить на ринок, піддавалася конкретним токсикологічним дослідженням.

Таким чином, у міру розвитку цих технологій виникає багато питань. Так було в більшості важливих технологічних розробок. Проте, у випадку нанотехнологій невизначеність носить тимчасовий характер і є невід'ємною і системною через складність способів індустріалізації в контексті глобалізації виробничої діяльності. Таким чином, забезпечення безпеки нанотехнологічних процесів і продуктів має бути частиною програм, що враховують темпи досягнення наукових результатів.

На жаль, в Україні впровадження нанотехнологій в будівельне виробництво не знайшло поки такого поширення, як у Європі, США, Японії та Китаї, де активне використання нанотехнологій практикують близько 20 % будівельних компаній.

Нанотехнології дають можливість контролювати властивості матеріалів на субмікронному рівні. Поліпшення механічних та інших властивостей НМ збільшує строк служби виробів та економить ресурси [17–18].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нові технології в сфері будівництва: BIM, приладобудування, наноматеріали [Текст з екрану]. URL:https://www.scor.com/sites/default/files/focus_nouvelles_technologies_hd.pdf (дата звернення: 01.10.2021).
2. Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні. [Текст з екрану]. URL:<https://core.ac.uk/download/pdf/141443183.pdf> (дата звернення: 01.10.2021).
3. Наночастинки в будівельних матеріалах та інших додатках та наслідки використання наночастинок. [Текст з екрану]. URL:<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6804222/#:~:text=Among%20the%20many%20different%20types,nanoparticles%20in%20the%20construction%20sector> (дата звернення: 01.10.2021).

4. Niroumand H., Zain M., Alhosseini S. N. *The influence of nano-clays on compressive strength of earth bricks as sustainable materials procedia-soc.* 2013. Vol. 89. Pp. 862–865. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.945.

5. Мохамед А. С. Й. Наноінновації в будівництві, нова ера стійкості : матер. міжнар. конф. з навколишнього середовища та цивільного будівництва. Паттайя, Таїланд. 24–25 квітня 2015 р. ICEACE. [Google Scholar].

6. Hegazy M., Badawi A., El Rehim S. A., Kamel W. Influence of copper nanoparticles coated with cationic surfactants as a modifier of steel anticorrosive paints. *Egypt. J. Pet.* 2013. № 22. Pp. 549–556. doi: 10.1016/j.ejpe.2013.11.009.

7. Mohajerani Abbas, Burnett Lucas, Smith J. V., Kurmus Halenur, Milas John, Arulrajah Arul, Horpibulsuk Suksun, Abdul Kadir Aeslina. Nanoparticles in construction materials and other applications, and implications of nanoparticle use. [Електронний ресурс]. doi: 10.3390/ma12193052 (опубліковано 20.11.2019). URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6804222>.

8. Les nanomatériaux dans la construction: progrès ou danger? [Текст з екрану]. URL: <https://www.designmat.com/ressources/nanomateriaux-dans-le-batiment-un-progres-ou-un-danger/> (дата звернення: 01.10.2021).

9. Nanotechnologies et nanomatériaux pour la construction-génie civil. [Текст з екрану]. URL: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/nanotechnologies-pour-l-energie-l-environnement-et-la-sante-42514210/nanotechnologies-et-nanomateriaux-pour-la-construction-nm3301/> (дата звернення: 01.10.2021).

10. Van Broekhuizen, Fleur Van Broekhuizen, Pieter. Nanoprodukte im europäischen Baugewerbe – Aktueller Sachstand 2009. Zusammenfassung, im Auftrag von: FIEC EFBH, November, 2009.

11. Papadaki Dimitra, Kiriakidis George, Tsoutsos Theocharis. Chapter 11 - Applications of nanotechnology in construction industry. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323512558000112> (дата звернення: 01.10.2021).

12. Hideyuki Kanematsu, Katsuhiko Sano, Hajime Ikegai, Dana M. Barry, Michiko Yoshitake, Yoshimitsu Mizunoe, Toshihiro Tanaka. Chapter 5: Nanocomposite polymer film for antibiofouling materials surfaces. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323512558000057> (дата звернення: 01.10.2021).

13. Wenzhong Zhup J., Bartos M., Porro A. Application of nanotechnology in construction. [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/226541329_Application_of_nanotechnology_in_construction_references#fullTextFileContent (дата звернення: 01.10.2021).

14. Makar J. M. Implications of Nanotechnology for the Construction Industry. [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/44088219_Implications_of_Nanotechnology_for_the_Construction_Industry (дата звернення: 01.10.2021).

15. Ken P. Chong. Nanotechnology in Civil Engineering. [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/245395454_Nanotechnology_in_Civil_Engineering (дата звернення: 01.10.2021).

16. Campillo I., Jorge S., Dolado A., Porro J. S. High-performance nanostructured materials for construction. [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/303155271_High-performance_nanostructured_materials_for_construction (дата звернення: 02.10.2021).

17. Kuzumaki T., Miyazawa K., Ichinose H., Ito K. Processing of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composite. [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/232014761_Processing_of_Carbon_Nanotube_Reinforced_Aluminum_Composite (дата звернення: 01.10.2021).

18. Zgalat-Lozynskyu Ostar, Zgalat-Lozynska Liubov. Активізація використання наноматеріалів та нанотехнологій як напрям інноваційної діяльності в будівництві. *Будівельне виробництво*. № 68. 2019. С. 30–38. URL: <https://www.researchgate.net/publication/344320757>

19. Krivenko O. Питання застосування інноваційних будівельних матеріалів та технологій в висотному будівництві. [Електронний ресурс]. URL: <http://mtp.knuba.edu.ua/article/view/221405> (дата звернення: 03.10.2021)

20. Куцова В. З., Котова Т. В., Аюпова Т. А. Наноматеріали та нанотехнології: навч. посіб. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. 103 с. URL: https://nmetau.edu.ua/file/nano_10.pdf (дата звернення: 03.10.2021).

21. Панов С. М., Шилович Т. Б., Шилович Я. І. Перспективи розробки то дослідження наномодифікованих композиційних будівельних матеріал. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 3. С. 7–13. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/25085/document%20%283%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

22. Toxicité et écotoxicité des nanotubes de carbone. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2007sa0417Ra.pdf> (дата звернення: 05.10.2021).

REFERENCES

1. *Novi tekhnologii v sferi budivnictva: BIM, priladobuduvannya, nanomateriali* [New technologies in the construction sector: BIM, instrument making, nanomaterials]. (Text from the screen). URL: https://www.scor.com/sites/default/files/focus_nouvelles_technologies_hd.pdf (date of application 01.10.2021) (in Ukrainian).

2. *Nanomateriali i nanotehnologii v priladobuduvanni* [Nanomaterials and nanotechnologies in instrument engineering]. (Text from the screen). URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/141443183.pdf> (date of application 01.10.2021) (in Ukrainian).

3. *Nanochastinki v budivel'nih materialah ta inshih dodatkah ta naslidki vikoristannya nanochastinok* [Nanoparticles in Construction Materials and Other Applications, and Implications of Nanoparticle Use]. (Text from the screen). URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6804222/#:~:text=Among%20the%20many%20different%20types,nanoparticles%20in%20the%20construction%20sector> (date of application 01.10.2021) (in Ukrainian).

4. Niroumand H., Zain M. and Alhosseini S.N. The influence of nano-clays on compressive strength of earth bricks as sustainable materials *procedia-soc.* 2013, vol. 89, pp. 862–865. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.945

5. Mokhamed A.S.Y. *Nanoinnovacii v budivnictvi, nova era stijkosti: materialy mizhnarodnoi konferencii z navkolishn'ogo seredovishcha ta civil'nogo budivnictva* [Nanoinnovations in construction, a new era of sustainability: Proceedings of the International Conference on the environment and civil society construction sites]. ICEACE, Pattajya, Tailand, April 24–25, 2015. [Google Scholar] (in Ukrainian).

6. Hegazy M., Badawi A., El Rehim S.A. and Kamel W. Influence of copper nanoparticles coated with cationic surfactants as a modifier of steel anticorrosive paints. *J. Pet., Egypt*, 2013, no. 22, pp. 549–556. doi: 10.1016/j.ejpe.2013.11.009.

7. Abbas Mohajerani, Lucas Burnett, John V. Smith, Halenur Kurmus, John Milas, Arul Arulrajah, Suksun Horpibulsuk and Aeslina Abdul Kadir. Nanoparticles in construction materials and other applications, and implications of nanoparticle use. [Electronic resource]. doi: 10.3390/ma12193052 (published 20.11.2019). URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6804222>.

8. Les nanomatériaux dans la construction: progrès ou danger? (Text from the screen). URL: <https://www.design-mat.com/ressources/nanomateriaux-dans-le-batiment-un-progres-ou-un-danger/> (date of application 01.10.2021) (in French).

9. Nanotechnologies et nanomatériaux pour la construction-génie civil. (Text from the screen). URL: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/nanotechnologies-pour-l-energie-l-environnement-et-la-sante-42514210/nanotechnologies-et-nanomateriaux-pour-la-construction-nm3301/> (date of application 01.10.2021) (in French).

10. Van Broekhuizen, Fleur Van Broekhuizen, Pieter. Nanoprodukte im europäischen Baugewerbe – Aktueller Sachstand 2009. Zusammenfassung, im Auftrag von: FIEC EFBH, November, 2009. (in French).

11. Dimitra Papadaki, George Kiriakidis, Theocharis Tsoutsos. Chapter 11 - Applications of nanotechnology in construction industry URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323512558000112> (date of application 01.10.2021).

12. Hideyuki Kanematsu, Katsuhiko Sano, Hajime Ikegai, Dana M. Barry, Michiko Yoshitake, Yoshimitsu Mizunoe, Toshihiro Tanaka. Chapter 5: Nanocomposite polymer film for antibiofouling materials surfaces. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323512558000057> (date of application 01.10.2021).

13. Wenzhong Zhu P., J. M. Bartos and A. Porro. Application of nanotechnology in construction. [Electronic resource]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/226541329> Application of nanotechnology in construction/references#fullTextFileContent (date of application 01.10.2021).

14. J. M. Makar. Implications of Nanotechnology for the Construction Industry. [Electronic resource]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/44088219> Implications of Nanotechnology for the Construction Industry (date of application 01.10.2021).

15. Ken P. Chong. Nanotechnology in Civil Engineering. [Electronic resource]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/245395454> Nanotechnology in Civil Engineering (date of application 01.10.2021).

16. Campillo I., Jorge S., Dolado A. and Porro J. S. High-performance nanostructured materials for construction. [Electronic resource]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/303155271> High-performance nanostructured materials for construction (date of application 01.10.21).

17. T. Kuzumaki, K. Miyazawa, H. Ichinose and K. Ito. Processing of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composite. [Electronic resource]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/232014761> Processing of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composite (date of application 01.10.21).

18. Ostap Zgalat-Lozynskyy and Liubov Zgalat-Lozynska. *Aktivizaciya vikoristannya nanomaterialiv ta nanotehnologij yak napryam innovacijnoi diyal'nosti v budivnictvi* [Activation of the use of nanomaterials and nanotechnologies as a direction of innovation in construction]. *Budivel'ne vyrobnytstvo* [Construction Production]. No. 68, 2019, pp. 30–38. URL: <https://www.researchgate.net/publication/344320757> (in Ukrainian).

19. Olga Krivenko. *Pitannya zastosovannya innovacijnih budivel'nih materialiv ta tehnologij v visotnomu budivnictvi* [Issues of application of innovative building materials and technologies in high-rise construction]. [Electronic resource]. URL: <http://mtp.knuba.edu.ua/article/view/221405> (date of application 03.10.2021) (in Ukrainian).

20. Kutsova V.Z., Kotova T.V. and Ayupova T.A. *Nanomaterialy ta nanotekhnolohiyi: navch. posib.* [Nanomaterials and nanotechnologies: textbook. way] Dnipropetrovsk: NmetAU Publ., 2013, 103 p. URL: https://nmetau.edu.ua/file/nano_10.pdf (in Ukrainian).

21. Panov Ye.M., Shilovich T.B. and Shilovich J.I. *Perspektivi rozrobki to doslidzhennya nanomodifikovanih kompozicijnih budivel'nih material* [Prospects for the development and research of nanomodified composite building materials]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu* [Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute]. 2018, no. 3, pp. 7–13. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/25085/document%20%283%29.pdf?Sequence=1&isAllowed=y>. (in Ukrainian).

22. Toxicité et écotoxicité des nanotubes de carbone. [Electronic resource]. URL: <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2007sa0417Ra.pdf> (date of application 05.10.2021) (in French).

Надійшла до редакції: 15.10.2021.