

УДК 691. 620.3

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.45.668

МОДИФІКАЦІЯ В'ЯЖУЧИХ ТА БЕТОНІВ ШЛЯХОМ НАНОТЕХНОЛОГІЙ. ОГЛЯД ДОСЯГНЕНЬ

МОРОЗ Л. В., канд. техн. наук, доц.

Кафедра цивільної інженерії, технології будівництва та захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: linysek83@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3150-7472

Анотація. Стаття містить огляд досліджень, щодо застосування наночастинок та нанотехнологій у виробництві різноманітних будівельних матеріалів, зокрема, бетонів та в'язучих. Наведено історичні приклади застосування нанотехнологій та позитивний вплив наночастинок на властивості різноманітних матеріалів, що застосовувалися задовго до того, як учені змогли пояснити походження незвичних властивостей цих матеріалів; сформульовано необхідність появи нормативної бази та будівельних матеріалів із поліпшеними властивостями для зведення унікальних будівель та споруд; проведено аналіз існуючих способів модифікації в'язучих речовин та матеріалів на їх основі та наведено пропозиції щодо подальших досліджень у сфері використання наночастинок у бетонах.

Ключові слова: нанотехнології; наночастинки; дослідження; бетони; властивості; вплив

МОДИФИКАЦИЯ ВЯЖУЩИХ И БЕТОНОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОР ДОСТИЖЕНИЙ

МОРОЗ Л. В., канд. техн. наук, доц.

Кафедра гражданской инженерии, технологии строительства и защиты окружающей среды, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, ул. Сергея Ефремова, 25, 49600, Днепро, Украина, e-mail: linysek83@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3150-7472

Аннотация. Выполнен обзор исследований по применению наночастиц и нанотехнологий при производстве различных строительных материалов, а именно, бетонов и вяжущих. Приведены исторические примеры применения нанотехнологий и положительного влияния наночастиц на свойства разнообразных материалов, которые применялись задолго до того, как ученые смогли объяснить происхождение необычных свойств этих материалов; сформулирована необходимость появления нормативной базы и строительных материалов с улучшенными свойствами для возведения уникальных зданий и сооружений; проведен анализ существующих способов модификации вяжущих веществ и материалов на их основе и представлены предложения относительно дальнейших исследований в сфере использования наночастиц в бетоне. Целью статьи является систематизация результатов существующих исследований, которые касаются применения наночастиц и нанотехнологий при производстве разнообразных строительных материалов, а именно вяжущих и бетонов на их основе, для формулирования состояния вопроса и выделения малоизученных участков, которые сдерживают внедрение нанотехнологий в сферу бетонного производства. **Выводы:** основная масса выполненных исследований направлена на разработку составов наномодифицированных бетонов, которые имеют улучшенные свойства по сравнению с обычными (нормативными) бетонами. Эти исследования выполняются для определения потенциальных возможностей нанобетона разнообразного назначения. Однако остаются малоизученными вопросы, которые связаны с поиском оптимального способа изготовления и области применения (массовое или индивидуальное использование) нанобетона, а также экологических рисков применения такого бетона. С научной точки зрения, дальнейшего детального изучения требуют процессы структурообразования бетона, содержащего наночастицы, и поиск взаимосвязи между свойствами, количеством или другими характеристиками наночастиц, которые вводятся в состав бетона, и свойствами непосредственно готового искусственного камня.

Ключевые слова: нанотехнологии; наночастицы; исследования; бетоны; свойства; влияние

MODIFICATION OF BINDERS AND CONCRETES BY APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES. REVIEW OF ACHIEVEMENTS

MOROZ L.V., *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

Department of Civil Engineering, Construction Technology and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian and Economic University, 25, S. Efremova Str., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: linysek83@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3150-7472

Abstract. The article provides a review of research on the use of nanoparticles and nanotechnology in the production of various building materials, namely concrete and binders. The article provides historical examples of the use of nanotechnology and the positive effect of nanoparticles on the properties of various materials, which were used long before scientists could explain the origin of the unusual properties of these materials; formulated the need for the emergence of a regulatory framework and construction with improved properties for the construction of unique buildings and structures; the analysis of existing methods for modifying binders and materials based on them is made and proposals for further research in the use of nanoparticles in concrete are presented. The aim of the article is to systematize the results of existing studies that relate to the use of nanoparticles and nanotechnology in the production of a variety of building materials, namely binders and concrete based on them, to formulate the state of the issue and highlight poorly studied areas that hamper the introduction of nanotechnology in the field of concrete production. The studies and results described in the article allow us to draw the following conclusions: the bulk of research is aimed at developing compositions of nanomodified concrete, which have improved properties compared to conventional (normative) concrete. These studies are carried out to determine the potential capabilities of nano-concrete for various purposes. However, there are poorly studied issues related to the search for the optimal manufacturing method and field of application (mass or individual use) of nanoconcrete, as well as environmental risks of using such concrete. From a scientific point of view, further detailed study requires the processes of structure formation of concrete containing nanoparticles and the search for the relationship between the properties, quantity or other characteristics of nanoparticles that are introduced into the concrete and the properties of the directly prepared artificial material.

Keywords: *nanotechnology; nanoparticles; research; concrete; properties; influence*

Вступ. Перші 15 років XXI століття ознаменувалися появою дев'яти найвищих у світі будівель:

– Фінансовий центр Наньцзин Грінленд, Нанкін, Китай, висота – 450 м, 2010 р.;

– Міжнародний комерційний центр, Гонконг, висота – 484 м, 2010 р.;

– Шанхайський всесвітній фінансовий центр, Шанхай, Китай, висота – 492 м, 2008 р.;

– хмарочос Гайбей, Гайбее, Тайвань, висота – 508 м, 2004 р.;

– Міжнародний фінансовий центр, Гуанчжоу, Китай, висота – 437,5 м, 2010–2016 рр.;

– Вежа Свободи, Нью-Йорк, США, висота – 541,3 м, 2013 р.;

– Годинникова королівська вежа, Мекка, Саудівська Аравія, висота – 601 м, 2012 р.;

– Шанхайська вежа, Шанхай, Китай, висота 632 м;

– Бурдж Халіфа, Дубай, ОАЕ, висота 828 м, 2010 р.

Людство намагається зводити як можна вищі будівлі через велику вартість землі

(оренда чи купівля) та скорочення територій, що можуть бути забудовані. При цьому особливий, не схожий на будь-які інші, вигляд таких споруд робить їх візитівкою місць, де вони збудовані. Однак зведення таких будівель стикається з обмеженнями в нормативній галузі (відсутність вимог до будівель вище 100 м) та певними обмеженнями властивостей матеріалів, що застосовуються для їх спорудження.

Індивідуальне будівництво давно вже стало пріоритетом будівельної галузі та вимагає використання новітніх матеріалів і технологій, що задовольняють його потреби. Поліпшення властивостей будівельних матеріалів, удосконалення технологій їх отримання та використання постає метою більшості наукових досліджень.

Аналіз публікацій. Модифікація в'язучих речовин, розширення сфери застосування окремих їх видів, використання відходів промисловості як сировини – основні напрями досліджень, що дозволяють скоротити витрати речовин,

поліпшити їх властивості, зберегти енергетичні, сировинні та інші ресурси.

Серед способів модифікації в'язучих речовин та матеріалів на їх основі можна виділити такі:

1. Використання багатокомпонентних сумішей – гіпсоцементнопуцоланових, гіпсоцементношлакових тощо. Ці суміші досліджували О. В. Волженський, Г. Г. Буличов, Р. В. Іванников, П. І. Боженів та ін.

2. Механічна активація в'язучих речовин. Дослідження таких процесів виконували Л. Й. Дворкін, В. М. Вировий, І. В. Барабаш, М. А. Саницький, А. В. Ферронська та ін.

3. Дисперсне армування в'язучих речовин та матеріалів. Використання в якості армуючого компоненту металевих, полімерних, базальтових та інших типів волокон дозволяє покращити різноманітні властивості матеріалів (підвищити міцність, зменшити деформації тощо). Серед дослідників цього питання можна виділити А. А. Пашенко, В. П. Сербіна, Ф. Н. Рабіновича, В. М. Дерев'яно, К. Л. Бірюковича та інших.

4. Використання добавок різноманітного походження в матеріалах на основі неорганічних в'язучих речовин. Розвитком цього напрямку займалися П. В. Кривенко, А. В. Ушерів-Маршак, Р. Ф. Рунова, К. О. Пушкарьова та багато інших.

Разом із тим поява наночастинок зумовила отримання наносистем, що мають модифікацію структури та властивостей речовини чи матеріалу на нанорівні.

Упровадження нанотехнологій у сферу будівництва дозволило збудувати такі об'єкти як церква зі збірного залізобетону та скла у Римі. Вигнуті конструкції цієї споруди нагадують пелюстки квітки. Особливість конструкції полягає в тому, що стіни будівлі білосніжні й самоочищаються. Такий ефект був досягнутий завдяки додаванню до складу цементу наночастинок діоксиду титану.

Аналогічний цемент був використаний у будівництві пам'ятника жертвам Голокосту

в Берліні в 2005 році. Великий Національний театр у Пекіні, скляна поверхня купола якого завжди прозора, тому що покрита тонкою плівкою з каталізатора діоксиду титану – це ще один експериментальний проект. Аналогічні рішення використані у стінах Шанхайського музею науки та технологій. Вони дозволяють зберігати тепло взимку і прохолоду влітку завдяки нанопористому покриттю [1].

Використання сучасних нанотехнологічних рішень має більш глибоке коріння з історичного боку. Так, існування деяких артефактів та їх особливих властивостей не мало пояснення до систематизації та відкриття наночастинок. Зокрема, кубок Лікурга – витвір складувів Стародавнього Риму датований приблизно IV століттям до н. е. Кубок змінює свій колір залежно від освітлення.

Спочатку вчені мали припущення, що причина такого оптичного ефекту – колоїдне золото. Пізніше, з удосконаленням науково-дослідницького обладнання, вчені за допомогою електронного мікроскопа та рентгенограм відкрили частинки золота та срібла розмірами приблизно 50...100 нм. Саме ці частинки і відповідають за незвичайне забарвлення стародавнього артефакту.

У 800 році до н. е. індіанці майя відкрили антикорозійний пігмент синього кольору, відомого як Maya Blue. Для створення першого стабільного органічного пігменту стародавні майя застосували навички в галузі органічної хімії і мінералогії. Унікальний колір і стабільність Maya Blue можна пояснити на основі сучасних уявлень про нанотехнології, згідно з якими барвник кольору індиго заповнює заглиблення на поверхні палигорськітової глини, утворюючи органічні чи неорганічні комплекси з водневими зв'язками.

Дамаські сталеві мечі з Близького Сходу, виготовлені у період від 1700 р. до н. е. до 300 р. до н. е., відомі своєю вражаючою силою, вигадливою структурою поверхні та надзвичайно гострим лезом. Сучасні вчені, використовуючи методи сучасного матеріалознавства та методи

нанотехнологій, розгадали секрети дамаської сталі. Пітер Пауфлер та його колеги з Дрезденського технічного університету дослідили під електронним мікроскопом структуру дамаського меча і виявили у лезі вуглецеві нанотрубки і нановолокна з цементиту (карбиду заліза). Саме наявність нанотрубок у м'яких шарах сталі пояснює особливості дамаської сталі – міцність, гнучкість, гостроту леза. Усі ці факти та багато інших прикладів історичного застосування нанотехнологій описує у своїй книзі Ю. А. Ткаченко [2].

Зрозуміло, що подальше поліпшення якості продукції підприємств будівельних матеріалів можливе за використання нанодобавок та наномодифікаторів, які більш глибоко регулюють механізми структуроутворення [3].

Мета статі – систематизація результатів досліджень щодо застосування наночастинок та нанотехнологій у виробництві різноманітних будівельних матеріалів, зокрема, бетонів та в'язучих, для опису стану питання та виявлення маловивчених ділянок, що стримують упровадження нанотехнологій у сфері бетонного виробництва.

Виклад матеріалу. Ринок розвитку нанотехнологій має такі дані щодо світових інвестицій у цю галузь: близько третини всіх світових інвестицій припадає на США. Інші провідні гравці – Європейський союз (приблизно 15 %) та Японія (20 %). Дослідження у сфері нанотехнологій активно ведуться також у Росії, Україні, Австралії, Канаді, Китаї, Південній Кореї, Ізраїлі, Сінгапурі і Тайвані. Прогнози експертів щодо створення нової галузі економіки через 10...15 років з обігом у 15 млрд доларів і близько 2 млн робочих місць досить оптимістичні. Виходячи з підрахунків, прогнозована вартість нанопродукції в світовому промисловому виробництві має становити понад 1 трлн доларів [4].

Разом із тим, лідером у Європі за кількістю патентів у сфері нанотехнологій стала Німеччина (3 730 патентів за період з 2000 по 2010 р.), друге та третє місця

належать Франції та Великій Британії (998 та 942 патенти відповідно) [5].

Розлогий аналіз програм щодо розвитку наоіндустрії наведено у праці [6]. Автор зазначає, що в Україні у 2009 р. затверджено Концепцію Державної цільової науково-технічної програми «Нанотехно-логії та наноматеріали» на 2010–2014 роки, яка мала на меті створення сучасної наоіндустрії як необхідної умови становлення інноваційного суспільства. Програма передбачала підтримку держави у формуванні інфраструктури для проведення ефективних фундаментальних досліджень у нанотехнологіях, координацію робіт із створення і застосування нанотехнологій та наноматеріалів, а також розроблення нових підходів до підготовки кваліфікованих спеціалістів із питань вирішення наукових, технологічних і виробничих проблем нанотехнологій.

Метою програми було створення наоіндустрії шляхом забезпечення розвитку її промислово-технологічної інфраструктури, використання результатів фундаментальних та прикладних досліджень, а також підготовки висококваліфікованих наукових та інженерних кадрів.

Сучасні науково-дослідницькі роботи [7] зі створення будівельних наноматеріалів спрямовані на отримання високо-технологічних конструкційних матеріалів; функціональних тонких плівок та покриттів; нових багатофункціональних матеріалів та компонентів; нових датчиків та приладів. Усі ці роботи нерозривно пов'язані з вивченням здатності та вмінням керувати процесами структуроутворення для отримання різноманітних матеріалів на рівні елементарних частинок, з яких цей матеріал складається [8].

Нанотехнології в бетонознавстві реалізуються шляхом керування структуроутворенням за двома напрямками: введення первинних нанорозмірних спеціально синтезованих компонентів (первинних наноматеріалів) або безпосередній синтез наномасштабних

об'єктів як в об'ємі матеріалу, так і на межі розподілу фаз [9].

Дослідження, що мають на меті створення та розвиток нанотехнологій, які сприятимуть розвитку технології бетону, можна поділити за такими напрямками [8]:

- виробництво речовин вуглецевих наноматеріалів із заданими структурними та фізичними характеристиками;

- виробництво речовин вуглецевих наноматеріалів із характеристиками, що можуть бути стабільно прогнозовані за мінімальної вартості кінцевого продукту;

- виробництво наноматеріалів, що містять кремнезем, а також високоміцних вуглецевих матеріалів у вигляді волокон;

- дослідження морфологічних та структурних змін у продуктах гідратації цементу, модифікованого вуглецевими наноматеріалами, для цілеспрямованого впливу на формування структури та властивостей цементного каменю і бетону;

- розроблення технології та створення бетонів різної структури з підвищеними показниками міцності та експлуатаційними властивостями;

- створення будівельних матеріалів зі спеціальними властивостями;

- розвиток наукових баз із формування технологічних принципів виробництва бетонів, що мають у своєму складі вуглецеві наноматеріали.

Практичні дослідження щодо використання наночастинок у бетонах свідчать про зростання міцності бетону більше ніж удвічі, морозостійкості – більше ніж на 50 %, зменшення ваги конструкцій, виготовлених із таких бетонів. Розроблено матеріали для відновлення залізобетонних конструкцій, що заповнюють мікропори та мікротріщини, а також полімеризуються, відновлюючи міцність конструкції; можуть вступати в реакцію з корозійними шарами, що утворилися в конструкції, та відновлювати зчеплення бетону з арматурою [10].

Зменшення в'язкості цементного тіста на 48 % та поліпшення фізико-механічних характеристик бетону за рахунок ущільнення структури цементного бетону з

додаванням вуглецевих нанотрубок у складі комплексної добавки описане у праці [11].

Ефективність приготування високо-рухливих високоміцних бетонних сумішей на дрібних пісках без великих витрат цементу шляхом модифікації вітчизняних суперпластифікаторів нанокластерами вуглецю фулероїдного типу підтверджено дослідженнями [12]. Ці дослідження особливо актуальні, зважаючи на те, що основна маса піску, який використовується в нашій країні у виробництві бетонних сумішей, це пісок із модулем крупності 1,2...1,5.

Отримання дрібнозернистого бетону з класом за міцністю В45 можливе у разі додавання до складу нанокремнезему, метакаоліну та білої сажі. Такі складові бетонної суміші забезпечують утворення щільної структури та підвищення гідратаційної активності компонентів, а також довговічності, та поліпшення показників міцності при стиску [13].

Позитивний досвід використання багатошарових нанотрубок отримано під час виготовлення газобетону автоклавного твердіння, пінобетону, а також дослідження структуроутворення та властивостей легких бетонів [14–19]. Результати досліджень мікроструктури пінобетону показують, що додавання вуглецевих нанотрубок стабілізує його структуру та усуває перфорацію стінок пор. При цьому міцність зростає в 1,7 раза, а теплопровідність знижується на 20 % [19].

Доцільність використання нанобетону доведено в Нідерландах під час виготовлення паль для огороження узбережжя каналу. Проект показав, що вартість 1 м³ нанобетону перевищила вартість звичайного бетону класу В65 в 4 рази. Однак у зв'язку зі зменшенням поперечного перерізу конструкції, нанобетону було витрачено лише 35 % від об'єму звичайного бетону.

Таким чином, вартість проекту залишилась незмінною а кількість витраченого матеріалу суттєво знижена, що дозволяє економити ресурси (сировину). Аналогічні показники були зареєстровані в Японії, де на будівництві пішохідного мосту

кількість витраченого нанобетону склала 20 % порівняно з витратами звичайного важкого бетону, а загальна вартість мосту виявилася на 5 % нижчого, ніж вартість мосту зі звичайного бетону [20].

Узагальнюючи вищенаведене, можна зробити такі **висновки**: основна маса досліджень, що проводяться зараз, направлена на розроблення складів наномодифікованих бетонів, що мають поліпшені властивості порівняно зі звичайними бетонами. Мета таких досліджень – виявлення потенційних можливостей нанобетону різного призначення.

Маловивченими залишаються питання, пов'язані з пошуком найбільш оптимального способу виготовлення та галузі застосування (масове чи індивідуальне) нанобетону, а також екологічних ризиків застосування нанобетону. З наукової точки зору подальшого детального вивчення потребують питання структурування бетону, що містить наночастинки, та пошук взаємозв'язку між властивостями, кількістю або іншими характеристиками наночастинок, що вводяться до складу бетону, та властивостями безпосередньо готового штучного матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дерев'яно В. Н., Кушнерова Л. О., Мороз Л. В., Мороз В. Ю. Технології та використання наносистем у виробництві будівельних матеріалів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. пр. 2020. Вип. 38. С. 140–147.
2. Ткаченко Ю. А. Дивовижний світ нанотехнологій. Ефективний курс із фізики для учнів 9 класу : навч. посіб. Суми : Вид-во СумДПУ ім. А. С. Макаренка, 2016. 111 с.
3. Попов А. И., Толчков Ю. Н., Михалева З. А. Перспективы инновационного развития отрасли строительных материалов на основе использования наномодифицирующих добавок. *Вестник Волгоградского государственного университета. Инновационная деятельность*. 2013. Серия 10. № 1 (8). С. 107–111.
4. Аналіз сучасних тенденцій використання нанотехнологій в екологічній та інших сферах діяльності [Електронний ресурс]. URL: <http://eco.com.ua/content/analiz-suchasnikh-tendentsii-vikoristannya-nanotekhnologii-u-ekologichnii-ta-inshikh-sferakh>
5. Саліхова О. Б. Державна політика у сфері нанонауки та нанотехнологій в Україні з урахуванням орієнтирів ЄС [Електронний ресурс]. URL: http://eip.org.ua/docs/EP_14_3_121_uk.pdf
6. Наноіндустрія як найважливіша умова становлення інноваційного суспільства в Україні [Електронний ресурс]. URL: http://ndipzir.org.ua/wp-content/uploads/2017/07/Klimova/3_2.pdf
7. Фаликман В. Р. Нанотехнологии бетон: реальность и перспективы. *Евробетон*. 2010. № 3 (3). С. 6–11.
8. Жданок С. А., Хрусталева Б. М., Батяновский Э. И., Леонович С. И. Нанотехнологии в строительном материаловедении : реальность и перспективы. *Вестник БНТУ*. 2009. № 3. С. 5–23.
9. Марущак У. Д. Концепція наномодифікування цементуючих систем для швидкотверднучих високофункціональних бетонів. [Електронний ресурс]. URL: <http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4131/23199.pdf>
10. Карпович О. Н. Разработка и внедрение достижений нанотехнологий – главное и перспективное направление в развитии строительной индустрии и создании инновационных материалов XXI века. *Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури*. 2013. № 3 (101). С. 22–24.
11. Яковлев Г. И. Модификация цементного бетона комплексными добавками на основе эфиров поликарбонилата, углеродных нанотрубок и микрокремнезема. *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 40–47.
12. Ваучский М. Н. Нанотехнологии в пластификации бетонных смесей. *Вестник строительного комплекса*. № 56. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.vestnik.info/archive/22/article329.html>
13. Прудков Е. Н., Закуражнов М. С. Многокомпонентный наномодифицированный мелкозернистый бетон. *Репозитарий БНТУ* [Електронний ресурс]. URL: <https://docviewer.yandex.ua>
14. Гришина А. Н., Королев Е. В. Эффективность модифицирования цементных композитов наноразмерными гидросиликатами бария. *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 72–76.
15. Мирошников Е. В., Строкова В. В., Череватова А. В., Павленко Н. В. Наноструктурированное перлитовое вяжущее и пенобетон на его основе. *Строительные материалы*. 2010. № 9. С. 105–106.
16. Яковлев Г. И. Применение дисперсий многослойных углеродных нанотрубок при производстве силикатного газобетона автоклавного твердения. *Строительные материалы*. 2013. № 2. С. 25–29.

17. Королев Е. В., Гришина А. Н. Синтез и исследование наноразмерной добавки для повышения устойчивости пен на синтетических пенообразователях для пенобетонов. *Строительные материалы*. 2013. № 2. С. 30–33.
18. Яковлев Г. И. Комплексная добавка на основе углеродных нанотрубок и микрокремнезема для модификации газосиликата автоклавного твердения. *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 3–7.
19. Яковлев Г. И. Нанотехнологии в строительстве [Электронный ресурс]. URL: <http://www.econf.rae.ru/pdf/2010/11/2afe4567e1.pdf>
20. Шуйский А. И., Явруян Х. С., Торлина Е. А., Филонов И. А., Фесенко Д. А. Настоящее и будущее применения нанотехнологий в производстве строительных материалов. *Вестник МГСУ*. 2012. № 12. С. 154–160.

REFERENCES

- Derevianko V.N., Kushnierova L.O., Moroz L.V. and Moroz V.Yu. *Tekhnologii ta vykorystannia nanosystem u vyrobnytstvi budivelnnykh materialiv* [Technologies and use of nanosystems in the production of building materials]. *Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli ta sporudi : zb. nauk. pr.* [Resource-saving materials, structures, buildings and structures : coll. sc. works]. 2020, vol. 38, pp. 140–147. (in Ukrainian).
- Tkachenko Yu.A. *Dyvovyzhnyi svit nanotekhnologii. Efektyvnyi kurs z fizyky dlia uchniv 9 klasu : navchalnyi posibnyk* [The wonderful world of nanotechnology. An effective course in physics for 9th grade students : textbook]. Sumy : SumDPU imeni A. S. Makarenka Publ., 2016, 111 p. (in Ukrainian).
- Popov A.I., Tolchikov Yu.N. and Mykhaleva Z.A. *Perspektyvy ynnovatsyonnoho rozvytyia otrasly stroytelnykh materialov na osnove yspolzovaniya nanomodifytsyruuiushchykh dobavok* [Prospects for the innovative development of the building materials industry based on the use of nano-modifying additives]. *Vestnyk Volhogradskoho hosudarstvennoho unyversyteta. Ynnovatsyonnaia deiatelnost* [Bulletin of the Volgograd State University. Innovative activity]. 2013, series 10, no. 1 (8), pp. 107–111. (in Russian).
- Analiz suchasnykh tendentsii vykorystannia nanotekhnolohyi u ekolohichnii ta inshykh sferakh diialnosti* [Analysis of current trends in the use of nanotechnology in environmental and other fields]. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://eco.com.ua/content/analiz-suchasnykh-tendentsii-vikorystannia-nanotekhnologii-u-ekolohichnii-ta-inshykh-sferakh>
- Salikhova O.B. *Derzhavna polityka u sferi nanonauky ta nanotekhnologii v Ukraini z urakhuvanniam oriientyryv YeS* [State policy in the field of nanoscience and nanotechnologies in Ukraine taking into account the EU guidelines]. [Elektronnyi resurs]. URL: http://eip.org.ua/docs/EP_14_3_121_uk.pdf
- Nanoindustriia yak naivazhlyvisha umova stanovlennia innovatsiynoho suspilstva v Ukraini* [Nanoindustry as the most important condition for the formation of an innovative society in Ukraine]. [Elektronnyi resurs]. URL: http://ndipzir.org.ua/wp-content/uploads/2017/07/Klimova/3_2.pdf
- Falykman V.R. *Nanotekhnolohyy beton : realnost y perspektyvy* [Nanotechnology concrete : reality and prospects]. *Evroboton* [Euro concrete]. 2010, no. 3 (3), pp. 6–11. (in Russian).
- Zhdanok S.A., Khrustalev B.M., Batiannovskiy E.I. and Leonovych S.I. *Nanotekhnolohyy v stroytelnom materialovedenyy : realnost y perspektyvy* [Nanotechnology in building materials science : reality and prospects]. *Vestnyk BNTU* [BNTU Bulletin]. 2009, no. 3, pp. 5–23. (in Russian).
- Marushchak U.D. *Kontseptsiiia nanomodifykuvannia tsementuiuchykh system dlia shvydkotverdnuchykh vysokofunktsionalnykh betoniv* [The concept of nanomodification of cementing systems for fast-setting high-performance concrete]. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4131/23199.pdf>
- Karpovich O.N. *Razrabotka i vnedrenie dostizheniy nanotekhnologii – glavnoe i perspektivnoe napravlenie v razvittii stroitelnoy industrii i sozdaniy innovatsionnykh materialov XXI veka* [Development and implementation of nanotechnology achievements is the main and promising direction in the development of the construction industry and the creation of innovative materials of the 21st century]. *VIsnik donbaskoYi natsionalnoYi akademiiYi budivnitstva ta arhitekturi* [Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2013, no. 3 (101), pp. 22–24. (in Russian).
- Yakovlev G.I. *Modifikatsiya tsementnogo betona kompleksnyimi dobavkami na osnove efirov polikarboksilata, uglerodnykh nanotrubok i mikrokremsnezema* [Modification of cement concrete with complex additives based on polycarboxylate ethers, carbon nanotubes and microsilica]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2015, no. 2, pp. 40–47. (in Russian).
- Vauchskiy M.N. *Nanotekhnologii v plastifikatsii betonnykh smesey* [Nanotechnology in the plasticization of concrete mixes]. *Vestnik stroitel'nogo kompleksa* [Building Complex Bulletin]. No. 56. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://www.vestnik.info/archive/22/article329.html>. (in Russian).
- Prudkov E.N. and Zakurazhnov M.S. *Mnogokomponentnyiy nanomodifitsirovannyiy melkozernistyiy beton* [Multicomponent nano-modified fine-grained concrete]. *Repozitariy BNTU* [Репозитарий БНТУ]. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://docviewer.yandex.ua>. (in Russian).

14. Grishina A.N. and Korolev E.V. *Effektivnost modifitsirovaniya tsementnykh kompozitov nanorazmernymi gidrosilikatami bariya* [Efficiency of modification of cement composites with nanosized barium hydrosilicates]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2015, no. 2, pp. 72-76. (in Russian).

15. Miroshnikov E.V., Strokova V.V., Cherevatova A.V. and Pavlenko N.V. *Nanostrukturirovannoe perlitovoe vyazhushee i penobeton na ego osnove* [Nanostructured perlite binder and foam concrete based on it]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2010, no. 9, pp. 105–106. (in Russian).

16. Yakovlev G.I. *Primenenie dispersiy mnogosloynnykh uglerodnykh nanotrubok pri proizvodstve silikatnogo gazobetona avtoklavnogo tverdeniya* [Application of dispersions of multilayer carbon nanotubes in the production of autoclaved silicate aerated concrete]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2013, no. 2, pp. 25–29. (in Russian).

17. Korolev E.V. and Grishina A.N. *Sintez i issledovanie nanorazmernoї dobavki dlya povyisheniya ustoychivosti pen na sinteticheskikh penoobrazovatelyah dlya penobetonov* [Synthesis and research of a nanosized additive to increase the stability of foams on synthetic foaming agents for foam concrete]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2013, no. 2, pp. 30–33. (in Russian).

18. Yakovlev G.I. *Kompleksnaya dobavka na osnove uglerodnykh nanotrubok i mikroremnezema dlya modifikatsii gazosilikata avtoklavnogo tverdeniya* [Complex additive based on carbon nanotubes and microsilica for the modification of autoclave hardened gas silicate]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2014, no. 1–2, pp. 3–7. (in Russian).

19. Yakovlev G.I. *Nanotehnologii v stroitelstve* [Nanotechnology in construction]. [Elektronniy resurs]. URL: <http://www.econf.rae.ru/pdf/2010/11/2afe4567e1.pdf> (in Russian).

20. Shuyskiy A.I., Yavruyan H.S., Torlina E.A., Filonov I.A. and Fesenko D.A. *Nastoyashee i budushee primeneniya nanotehnologiy v proizvodstve stroitelnykh materialov* [Present and future applications of nanotechnology in the production of building materials]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MSCU]. 2012, no. 12, pp. 154–160. (in Russian).

Надійшла до редакції: 12.07.20 р.