



Саницький М. А.



Кропивницька Т. П.



Іващишин Г. С.



Русин Б. Г.

## КОНЦЕПЦІЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОГО РОЗВИТКУ В ЦЕМЕНТНІЙ ПРОМИСЛОВІСТІ

### КОНЦЕПЦИЯ НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ В ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

#### CONCEPTION OF LOW CARBONE DEVELOPMENT IN THE CEMENT INDUSTRY

**Саницький М. А.**, д.т.н., професор,  
завідувач кафедри будівельного виробництва,  
✉ msanytsky@ukr.net, ☎ +38 032 258-25-41,

**Кропивницька Т. П.**, к.т.н.,  
доцент кафедри будівельного виробництва  
✉ tkropyvnytska@ukr.net, ☎ +38 096-57-47-212,

**Іващишин Г. С.**, аспірант,  
кафедра будівельного виробництва  
✉ aiwaszczyszyn@gmail.com, ☎ +38 068-39-91-440,

**Русин Б. Г.**, к.т.н.,  
асистент кафедри будівельного виробництва  
✉ brusyn@ukr.net, ☎ +38 068-50-62-244,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна

**M. Sanytsky**, D.Sc, professor,  
head of department of Building production  
✉ msanytsky@ukr.net, ☎ +38 032 258-25-41,

**T. Kropyvnytska**, assistant professor of department  
of Building production  
✉ tkropyvnytska@ukr.net, ☎ +38 096-57-47-212,

**H. Ivashchyn**, PhD student  
of department of Building production  
✉ aiwaszczyszyn@gmail.com, ☎ +38 068-39-91-440,

**B. Rusyn**, PhD,  
assistant of department of Building production  
✉ brusyn@ukr.net, ☎ +38 068-50-62-244,  
Lviv Polytechnic National University,  
Lviv, 12 S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

**Анотація.** Проаналізовано шляхи зниження емісії CO<sub>2</sub> в цементній промисловості для реалізації стратегії низьковуглецевого розвитку в Україні. Показано, що створення низькоемісійних (низьковуглецевих) цементів та модифікованих бетонів на їх основі забезпечить ресурсо- та енергозбереження, екологічний та економічні ефекти в будівництві.

**Ключові слова:** низькоемісійні цементи, емісія CO<sub>2</sub>, цементозаміщуючі матеріали, дорожня карта, цементна промисловість.

**Аннотация.** Проанализированы пути снижения эмиссии CO<sub>2</sub> в цементной промышленности для реализации стратегии низкоуглеродного развития в Украине. Показано, что создание низкоэмиссионных (низкоуглеродных) цементов и модифицированных бетонов на их основе обеспечит ресурсо- и энергосбережение, экологический и экономические эффекты в строительстве.

**Ключевые слова:** низкоэмиссионные цементы, эмиссия CO<sub>2</sub>, цементозамещающие материалы, дорожная карта, цементная промышленность.

**Annotation.** The ways of reducing CO<sub>2</sub> emissions in the cement industry for the implementation of the low carbon development strategy in Ukraine were analyzed. It was shown that the creation of low-emission (low carbon) cements and modified concrete on their basis will provide resource and energy saving as well as ecological and economic effects in construction.

**Keywords:** low-carbone cements, CO<sub>2</sub> emissions, supplementary cementitious materials, roadmap, cement industry.

Відповідно до вимог Паризької угоди згідно Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (UNFCCC) щодо регулювання заходів зі зменшення викидів діоксиду вуглецю з 2020 року необхідно реалізувати до 2050 р. світову стратегію низьковуглецевого розвитку щодо стримування підвищення температури на планеті до рівня, суттєво меншого ніж на 2 °C. На шляху до імплементації Паризької угоди щодо заходів пом'якшення клімату в світі Україна повинна реалізувати ряд концептуальних основ та стратегій, зокрема пришвидшити реалізацію засад низьковуглецевого розвитку. Для впровадження Паризької Угоди необхідно розробити систему моніторингу, звітності та верифікації парникових викидів. Такий механізм є ключовим інструментом для реалізації концепції низьковуглецевого розвитку в Україні [1].

Емісія антропогенного CO<sub>2</sub> у світі в 2016 р. становить 36 Гт (рис. 1) і протягом трьох років практично не змінюється, що вказується зниженням емісії в США і Китаї. Значну кількість парникових газів продукує цементна промисловість, що становить 1,8 Гт викидів CO<sub>2</sub> або 5% від загальної кількості антропогенних викидів в усьому світі [2]. В Європі викиди CO<sub>2</sub> складають близько 3,5 Гт, при цьому поставлена задача скорочення викидів парникових газів до 2050 року на 80-95%.

Інтегровані рішення цементної промисловості для забезпечення стратегії низьковуглецевого розвитку спрямовані на скорочення споживання енергетичних ресурсів, удосконалення

технологій та проведення екологічної політики [3]. Цемент, як ключовий компонент бетону, матиме і надалі важливу роль при управлінні ресурсами та вирішенні проблем внаслідок зростання населення та прогресивної урбанізації. Основними джерелами викидів CO<sub>2</sub> при виробництві цементу є прямі викиди від процесу декарбонізації (50%), спалювання палива (40%) та непрямі викиди, пов'язані зі споживанням електроенергії (10%). При цьому на 1 тону портландцементного клінкеру приймаються викиди CO<sub>2</sub> на рівні 0,865 т.

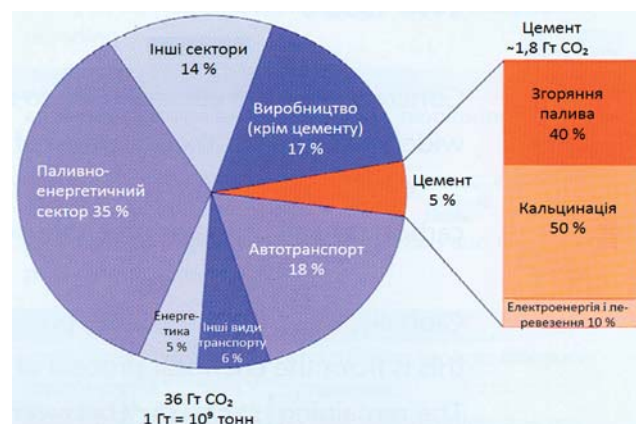


Рис. 1. Емісія CO<sub>2</sub> у світі (2016 р.) [2]

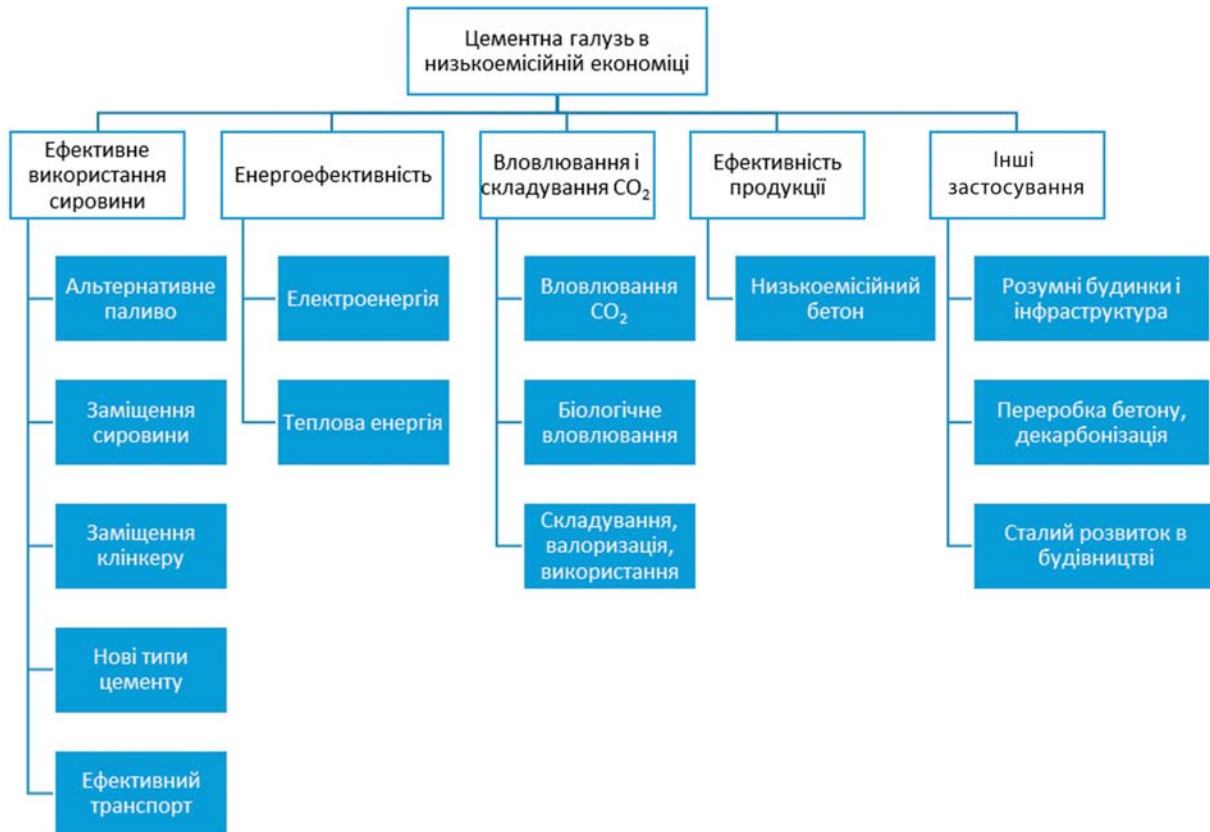


Рис. 2. Дорожня карта сектору цементу та бетону в низькоемісійній економіці ЄС до 2050 [4]

Випуск високотехнологічної продукції в будівельній галузі з урахуванням зниження ступеня забруднення навколишнього середовища в значній мірі реалізується впровадженням ефективних низькоемісійних (низьковуглецевих) цементів та бетонів на їх основі. Дорожня карта сектору цементу та бетону низькоемісійної економіки ЄС до 2050 року передбачає п'ять паралельних напрямків [4], кожний з яких сприяє зниженню емісії CO<sub>2</sub> (рис. 2).

Відповідно до дорожньої карти перший напрямок передбачає зменшення використання природних ресурсів, збільшення частки альтернативних палив, заміщення клінкеру мінеральними складниками та впровадження нових типів цементів, що дозволить замінити значну частку (до 80 мас.%) високоенергоємного портландцементного клінкеру на цементозаміщуючі матеріали (ЦЗМ), в тому числі відходи виробництв [5-7]. Використання ЦЗМ у виробництві цементів забезпечує позитивний вплив на економічний аспект виробництва та, що надзвичайно важливо, є вагомим фактором покращення стану навколишнього середовища. З іншої сторони, використання відходів промисловості дозволяє зменшити споживання природної сировини, знизити емісію CO<sub>2</sub> та звільнити корисні площі ґрунтів, що зменшить ризик техногенних катастроф та сприятиме енергонезалежності національної економіки.

Для портландцементів СЕМ II/B, СЕМ III із збільшенням вмісту основних складників від 20 до 80 мас.% забезпечується відповідне зниження емісії CO<sub>2</sub>. Зменшення викидів CO<sub>2</sub> та економія електроенергії на рівні 54% може бути досягнута при заміні 80 мас.% портландцементного клінкеру доменним гранульованим шлаком. З іншої сторони, якщо врахувати емісію CO<sub>2</sub> від сировинних матеріалів (декарбонізація), можна досягнути економії – 72% (рис. 3).

Енергоефективність цементної промисловості, що є найбільш капітаоемною та енергоємною галуззю у будівництві, визначає другий напрямок. Заміна «мокрого» способу виробництва портландцементного клінкеру на «сухий» дозволила досягнути найбільшого ефекту зни-

ження енергозатрат цементних заводів. Емісія CO<sub>2</sub> від згоряння палива становить 40%, тому збільшення частки біопалива дозволило б скоротити викиди вуглекислого газу від викопних видів палива. Ефективним прикладом країни по зниженню емісії CO<sub>2</sub> в цементній галузі є Ірландія, де перехід з технології «мокрого» способу випалу клінкеру на «сухий» був здійснений у 80-х роках; порівняно з базовим 1990 р. за рахунок застосування альтернативних видів палива, введення енергоефективних заходів і популяризації цементів II типу Ірландія у 2015 р. скоротила викиди CO<sub>2</sub> ще на 25 % (рис. 4).



Рис. 3. Емісія CO<sub>2</sub> різних типів цементу [8]

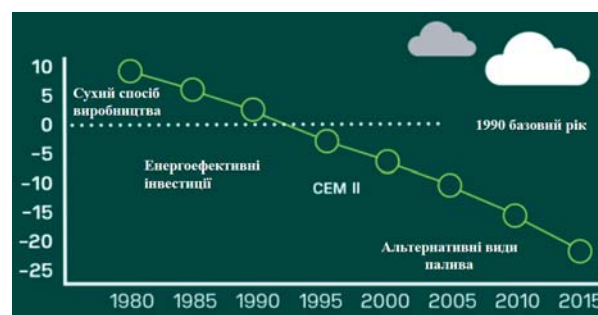


Рис. 4. Зниження емісії CO<sub>2</sub> в цементній промисловості Ірландії [9]

Додаткове зниження емісії досягається за рахунок застосування нових технологій, таких як уловлювання та зберігання CO<sub>2</sub> (англ. CCS – carbon capture and storage), що передбачені у третьому напрямку дорожньої карти. Із врахуванням зазначеної політики і технологічних передумов, може бути досягнуте потенційне зниження емісії навіть до 80%. В той же час, вловлювання CO<sub>2</sub> може призвести до збільшення собівартості продукції на 25-100% і вимагає значних інвестицій, включаючи додаткові затрати електроенергії. Екологічні проблеми також стимулювали можливість використання при виробництві бетону техногенного вуглекислого газу в якості добавки-прискорювача тверднення з метою його зв'язування [10].

Четвертим напрямком є одержання низьковуглецевих бетонів. Оцінка показника впливу на навколишнє середовище для бінарних і потрійних цементів дозволила визначити їх придатність для виготовлення низьковуглецевих конструкційних бетонів [11, 12]. У передових країнах ЄС викиди CO<sub>2</sub> у бетоні знижені до 83,4 кг CO<sub>2</sub> на 1 т бетону, що на 19,1% нижче від рівня 103,1 кг CO<sub>2</sub> на 1 т бетону. Для зниження показника ECO<sub>2</sub> передбачено також заміщення частки чистоклінкерних портландцементів типу СЕМ I в бетоні полікомпонентними ЦЗМ, що є актуальним підходом для досягнення збалансованого розвитку в будівництві.

Використання новітніх енергоефективних технологій реалізує п'ятий напрямок дорожньої карти, яка включає будівництво розумних низькоенергетичних будинків та інфраструктури із застосуванням засад сталого розвитку, а також повторного використання або перероблення бетону. Рішення щодо будівництва нових енергоефективних будинків, які використовують на 60% менше енергії порівняно з традиційними і виробляють такий же низький рівень викидів диоксиду вуглецю протягом всього життєвого циклу, забезпечить виконання вимог економічної та низьковуглецевої стратегій [13].

За даними Європейської економічної комісії ООН, показник виробництва цементу на душу населення в Україні станом на 2017 рік складає 206 кг (у Польщі – 489 кг, у Німеччині – 342 кг). Компанії, що входять до складу Асоціації «Укрцемент», виробляють понад 95% усього обсягу цементу, що випускається в Україні. Виробництво клінкеру підприємствами Асоціації у 2016 р. складало 6,48 млн. т, що на 10,6% більше, порівняно з 2016 р, з яких виробляється «сухим» способом – 5,06 млн. т (78%), а «мокрим» – 1,43 млн. т (22%). Активна участь Асоціації проводиться в обговоренні механізмів торгівлі квотами на викиди парникових газів через системи адаптації, моніторингу та звітності, а також розробленні проекту Національної стратегії поводження з відходами, що сприятиме використанню обортових печей цементних заводів для спалювання твердих побутових відходів в якості альтернативного палива [14].

Пріоритетними напрямками Асоціації є стандартизація за європейськими нормами [15]. Згідно з ДСТУ EN 197-1:2015 кількість цементів складає 27 типів, об'єднаних за термінологією стандарту в «сімейство звичайних цементів», в ДСТУ Б В.2.7-46:2010 ця кількість складає 15 типів. Згідно з ДСТУ EN 197-1:2015 (ДСТУ Б В.2.7-46:2010) портландцемент СЕМ I (ПЦ I) може містити до 5 % мінеральних добавок. Вміст мінеральних добавок у цементах від СЕМ II (ПЦ II/A, Б) до СЕМ V (КЦ V/A, Б) може змінюватися у широкому діапазоні – від 6 до 80 мас.%. Крім цього, важливими групами цементів є шлаковий цемент СЕМ III (ШПЦ III/A,Б) та пуцолановий цемент СЕМ IV (ПЦЦ IV/A,Б). Для цементів загальнобудівельного призначення за міцністю на стиск характерні класи 32,5, 42,5 та 52,5 згідно з ДСТУ EN 197-1:2015 та марки М300, М400, М500 згідно з ДСТУ Б В.2.7-46:2010.

Актуальними на даний час є такі екотипи цементів загальнобудівельного призначення, які характеризуються пониженим вмістом портландцементного клінкеру, відповідно до 40-64% для СЕМ V/A та 20-39% для СЕМ V/B за рахунок введення ЦЗМ (згідно з ДСТУ Б EN 197-1:2015). Хімічна спорідненість і подібності

параметрів кристалічної ґратки мікронаповнювача та продуктів гідратації цементу дозволяє одержати композиційні цементу типу СЕМ V/A,В класів за міцністю 32,5; 42,5 [16].

Випуск високотехнологічної продукції з урахуванням зниження ступеня забруднення навколишнього середовища в значній мірі реалізується на провідних підприємствах цементної галузі України. Так, ПАТ «Івано-Франківськцемент» використовує енергозберігаючу та високопродуктивну технологію «сухий» спосіб і є першопрохідцем у впровадженні досягнень науки і техніки та передового досвіду у виробничі процеси, при цьому постійно інвестує значні кошти в модернізацію виробництва. Процеси виготовлення цементів перебувають під контролем аналітичної техніки останнього покоління. Найсучасніше обладнання лабораторії дозволяє системно контролювати якість сировинної суміші, клінкеру та безпосередньо самого цементу. Введення в дію нового цементного заводу з використанням сучасної технології помолу в замкненому циклі дозволило значно збільшити потужності виробництва. Заміщення портландцементного клінкеру на ЦЗМ також дозволяє суттєво зменшити фактор негативного екологічного впливу цементів [5].

Оцінка впливу на навколишнє середовище бінарних і потрійних цементів типів СЕМ II та СЕМ V свідчить про суттєвий потенціал використання таких цементів для зменшення викидів CO<sub>2</sub>. Зменшення вмісту клінкерної складової в ПЦ II/Б-К і КЦ V/A забезпечує зниження кількості викидів CO<sub>2</sub> відповідно в 1,46 і 2,37 рази, що дозволяє їх віднести до екоцементів (рис. 5).

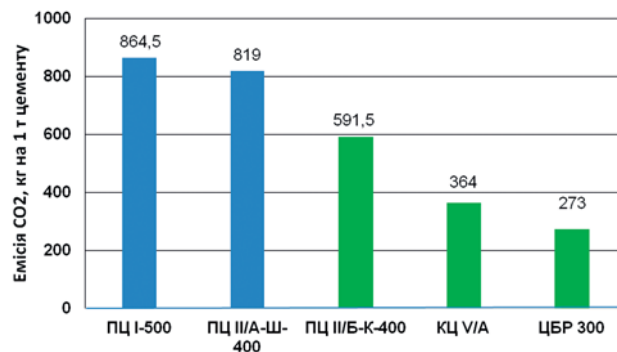


Рис. 5. Емісія CO<sub>2</sub> при виробництві цементу

Багатокомпонентні низьковуглецеві цементу є одним із пріоритетних напрямків у технології виготовлення будівельних розчинів і рядових низькомарочних бетонів. Спеціальним продуктом для споживачів являються низькоенергоємні цементу для будівельних розчинів, зокрема ЦБР 300 ДСТУ Б В.2.7-124-2004 (МС 22,5Х «Цемент для мурування» ДСТУ Б EN 413-1:2015). Багатокомпонентність складу цементу для будівельних розчинів дає змогу ефективно управляти процесами структуроутворення цементуючої матриці будівельного розчину з необхідними властивостями.

Нові низьковуглецеві екоцементи набуватимуть все більшого значення, так як високоенергоємний портландцементний клінкер частково заміщений ЦЗМ гідралічної та пуцоланічної дії, а також мікронаповнювачами, що не потребують енергозатратного процесу випалу та декарбонізації. Як результат екологічної дії цементної промисловості в напрямку сталого розвитку низьковуглецеві композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю внаслідок вибору відповідних комбінацій неклінкерних складників стають альтернативою для традиційних цементів [17, 18]. Використання широкої гама цементозаміщуючих компонентів природного та техногенного походження в низькоемісійних багатокомпонентних цементах дозволяє забезпечити направлену дію на процеси структуроутворення та формування гідратних фаз у

неклінкерній частині з утворенням дрібнокристалічної структури, що сприяє синтезу міцності цементної матриці за рахунок її ущільнення. Ефективним методом забезпечення необхідних будівельно-технічних властивостей низькоемісійних багатокомпонентних цементів та бетонів на їх основі є також лужна активація [19, 20].

В той же час, ЦЗМ у складі багатокомпонентних цементів, як правило, призводять до зниження рухливості бетонної суміші, що робить її менш працездатною. Зменшення вмісту портландцементного клінкеру призводить до значного зниження міцності у ранньому віці для всіх змішаних цементів та бетонів на їх основі. Тому одним з базових принципів створення бетонів високої функціональності є використання суперпластифікаторів нової генерації полікарбоксилатного типу. Низькоемісійні багатокомпонентні цементні, модифіковані полікарбоксилатними суперпластифікаторами, забезпечують необхідні реологічні характеристики бетонної суміші та швидкість тверднення бетону. Створення модифікованих бетонів на основі низькоемісійних багатокомпонентних цементів передбачає оптимізацію компонентного складу за рахунок тонкодисперсних мінеральних компонентів природного та техногенного походження, нанодобавок, гідравлічних і пуцоланових реакцій в системі цементозаміщуючих матеріалів, покращення перехідної зони між матрицею цементного каменю та заповнювачем. Збільшення вмісту тонкодисперсних енергетично активних фракцій у складі ЦЗМ забезпечує зростання активної площі роз-

ділу фаз, що збільшує реологічну дію полікарбоксилатного модифікатора на суміші. Максимальне розкриття синергетичної ролі тонкодисперсних мінеральних компонентів у складах низькоемісійних багатокомпонентних цементів забезпечує направлену дію на процеси регулювання властивостей модифікованих бетонів. При цьому тонкодисперсні фракції ЦЗМ покращують структуру пор, що призводить до збільшення водонепроникності та довговічності бетону, а показник викидів  $\text{E}_{\text{CO}_2}$  може бути скорочений на 70% для такого ж класу міцності бетону.

#### Висновки

Розроблення композиційних багатокомпонентних цементів нової генерації та модифікованих бетонів на їх основі вносить суттєвий вклад у розвиток стратегії низьковуглецевого розвитку України, яка передбачає довгостроковий соціально-економічний розвиток держави, в результаті чого підвищується добробут населення і досягається баланс між кількістю викидів парникових газів та їх поглинанням і/або уловлюванням. При цьому забезпечується реалізація прогресивних моделей раціонального використання природної сировини, палива, електричної енергії, утилізації промислових відходів виробництв, зменшення емісії  $\text{CO}_2$ , що дозволяє вирішити низку важливих екологічних, економічних і соціальних проблем, а також відповідає стратегії збалансованого розвитку і дає змогу втілити в життя практику чистого виробництва.

#### Література:

1. Концепція реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року; Розпорядження Каб. Мін. України від 07.12.2016 № 932-р.
2. Sroda B. Potencjal przemyslu cementowego w redukcji emisji  $\text{CO}_2$  / B. Sroda // Budownictwo, technologie, architektura. – 2017. – № 3/79. – P. 72-74.
3. Schnejder M. Technology developments in the cement industry / M. Schnejder // Cement International. – 2015. – № 1. – P. 2-12.
4. The role of cement in the 2050 low carbon economy / CEMBUREAU. – 2013. – P. 64.
5. Круць Т.М. Принципи стратегії сталого розвитку в цементній промисловості / Т.М. Круць, І.М. Гев'юк, М.А. Саницький, Т.П. Кропивницька // Будівельні матеріали та виробі. – 2015. – № 3-4. – С.16-19.
6. Néstor Isaías Quintero Mora. Low Carbon Cements / 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2015), 13-16. – October 2015. – Beijing, China. – 1.
7. Kuterasińska J. New types of low-carbon cements with reduced Portland clinker content as a result of ecological actions of cement industry towards sustainable development / J. Kuterasińska, A. Krol // Economic and Environmental Studies. – 2016. – Vol. 16. – No. 3 (39/2016) – P. 403-419.
8. Gardeik H. O. Sustainability and cement manufacture / VDZ CONGRESS 2002. Technical Field 6: Sustainability and cement production. – 2002. – P. 472-487.
9. Innovation in the cement industry / CEMBUREAU. – 2017.
10. Монкман С. Использование углекислого газа в качестве добавки-ускорителя / С. Монкман, М. Макдональд, Д. Хутон, М. Томас // Цемент и его применение. – 2017. – № 1. – С. 82-89.
11. Limbachiya M. Suitability of BS EN 197-1 CEM II and CEM V cement for production of low carbon concrete / M. Limbachiya, S. C. Bostanci, H. Kew // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 71. – P. 397-405.
12. Yang K. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of  $\text{CO}_2$  emissions from concrete / K. Yang, Y. Jung, M. Cho, S. Tae // Journal of Cleaner Production. – 2015. – Vol. 103. – P. 774-783.
13. Саницький М. А. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посіб. / М.А. Саницький, О.Р. Позняк, У.Д. Марущак; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2013. – 236 с.
14. Будівельний журнал. – 2017. – №1-2 (125-126). www.ukrcement.com.ua
15. Бабіч М. Європейські стандарти на цемент: практика впровадження / М. Бабіч, Р. Рунова, Л. Кріпка; АВЦУ «Укрцемент». – Х.: ПП «Юнісофт», 2016. – 72 с.
16. Саницький М.А. Модифіковані композиційні цементні: навч. посіб. / М.А. Саницький, Х.С. Соболев, Т.Є. Марків; Нац. ун-т «Львів. політехніка» – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2010. – 132 с.
17. Sanytsky M. Sustainable Green Engineered Composites Containing Ultrafine Supplementary Cementitious Materials / M. Sanytsky, T. Kruts, T. Kropyvnytska, B. Rusyn // 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2015), Beijing, China. – 2015. – 1. – P. 265.
18. Гев'юк І.М. Композиційні портландцементи з добавками природного цеоліту та вапняку / І.М. Гев'юк, Т.П. Кропивницька, М.А. Саницький // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2015. – Вип. 31. – С. 149-156.
19. Kryvenko P. Decorative multi-component alkali activated cements for restoration and finishing works / P. Kryvenko, M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, R. Kotiv // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 897. – P. 45-48. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.923.42
20. Кривенко П.В. Щелочные цементы. / П.В. Кривенко, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницкий, И.И. Руденко. – Київ: «Основа», 2015. – 448 с.