

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ НАУКОВОГО ТА ПРАКТИЧНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

УДК 691.32

Шишкіна О. О.,

5691180@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3716-9347,

Researcher ID 57170222300,

*к.т.н., доц., доцент кафедри технології будівельних виробів, матеріалів та конструкцій,
Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг*

Шишкін О. О.,

5691180@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3331-1422,

Researcher ID 12785722100,

*д.т.н., проф., завідувач кафедри технології будівельних виробів, матеріалів та конструкцій,
Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг*

КЕРУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ

***Анотація.** У статті розглянуто теоретичні аспекти процесів формування міцності дрібнозернистих бетонів. Метою статті є вивчення теоретичних аспектів проблеми формування міцності бетону та розгляд проблеми підвищення швидкості формування структури дрібнозернистих бетонів підвищеної міцності, дослідження впливу комплексів поверхнево-активних речовин, одна з яких є колоїдною. Представлено класифікацію основних видів впливу на структуру бетону. Проведено аналіз факторів, що впливають на міцність бетону. Показано, що структура композиційних матеріалів може бути визначена як певне розміщення в просторі окремих структурних елементів (кристалів-новотворів, пор, наповнювачів і заповнювачів) з урахуванням їхнього кількісного співвідношення й характеру взаємодії між ними. Керування властивостями будівельних композитних матеріалів здійснюється насамперед зміною внутрішніх факторів, кожен з яких здійснює свій вплив і вносить певні зміни у властивості матеріалів. Визначено, що зміну властивостей бетонів рекомендовано здійснювати: забезпеченням необхідних хіміко-мінералогічного складу та структурних особливостей портландцементного клінкеру, дисперсності портландцементу, механо-хімічної активації цементів із введенням у процесі помелу суперпластифікаторів, спеціальних добавок. В'яжучі, отримані сумісним помелом портландцементного клінкеру, мінеральних компонентів та добавок пластифікуючої групи з утворенням органо-мінеральних комплексів між портландцементними мінералами й молекулами поверхнево-активних речовин зберігають переваги тонкомелених цементів при значному зниженні їх водопотреби. Представлено модельне зображення зміни міцності бетону в часі під впливом гідрофобної поверхнево-активної речовини, гідрофільної поверхнево-активної речовини, поліспирту та їх сумішей у водяному розчині. Показано особливості зміни міцності бетону залежно від виду поверхнево-активної речовини та її кількості у водяному розчині. Установлено, що поєднання різного виду поверхнево-активних речовин призводить до зміни характеру формування міцності бетону.*

Ключові слова: вода, бетон, міцність, поверхнево-активна речовина, структура.

Shyshkina A. A.,

5691180@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3716-9347,

Researcher ID 57170222300,

Ph.D., Associate Professor,

*Associate Professor at the Department of Technology of Construction Products,
Materials and Structures,*

Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih

Shyshkin A. A.,

5691180@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3331-1422,

Researcher ID 12785722100,

Doctor of Engineering, Professor;

Head of the Department of Technology of Construction Products, Materials and Structures,

Kyryvy Rih National University, Kyryvy Rih

MANAGEMENT OF COMPOSITIONAL PROPERTIES PORTLAND CEMENT MATERIALS

Abstract. *The article considers the theoretical aspects of the processes of forming the strength of fine-grained concrete. The aim of the article is to study the theoretical aspects of the problem of forming the strength of concrete and to consider the problem of increasing the rate of formation of the structure of fine-grained concrete of high strength and to investigate the effect of surfactant complexes, one of which is colloidal. The classification of the main types of influence on the structure of concrete is presented. The analysis of the factors influencing durability of concrete is carried out. It is shown that the structure of composite materials can be defined as a certain placement in space of individual structural elements (crystals, neoplasms, pores, fillers and fillers) taking into account their quantitative ratio and the nature of the interaction between them. The properties of building composite materials are controlled primarily by changing internal factors, each of which exerts its influence and makes certain changes in the properties of materials. It is determined that it is recommended to change the properties of concrete: by providing the necessary chemical and mineralogical composition and structural features of Portland cement clinker, dispersion of Portland cement, mechanochemical activation of cements with the introduction of superplasticizers in the grinding process, introduction of special additives. Binders obtained by combined grinding of Portland cement clinker, mineral components and additives of the plasticizing group with the formation of organo-mineral complexes between Portland cement minerals and surfactant molecules retain the advantages of finely ground cements with a significant reduction in their water consumption. A model image of changes in concrete strength over time under the influence of hydrophobic surfactant, hydrophilic surfactant, polyalcohol and their mixtures in aqueous solution is presented. The peculiarities of changing the strength of concrete depending on the type of surfactant and its amount in aqueous solution are shown. It is established that the combination of different types of surfactants leads to a change in the nature of the formation of concrete strength.*

Key words: water, concrete, strength, surfactant, structure.

JEL Classification: L74, L79

DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-25-01>

Постановка проблеми. Завдяки розвитку теоретичних основ будівельного матеріалознавства виявляється зацікавленість не тільки до розв'язання традиційних питань, пов'язаних із вивченням технічних характеристик будівельних матеріалів і оцінкою їхнього поведіння в різних умовах експлуатації, але й до питань, що пов'язані з установленням фізико-хімічних закономірностей одержання матеріалів із заданими властивостями. Більшість сучасних будівельних матеріалів, таких як будівельні розчини, бетони, склокристалічні та керамічні матеріали можна класифікувати як композити. Структура композиційних матеріалів може бути визначена як певне розміщення в просторі окремих структурних елементів (кристалів-новотворів, пор, наповнювачів і заповнювачів) з урахуванням їхнього кількісного співвідношення й характеру взаємодії між ними. Цілісність композиту і його влас-

тивостей забезпечуються взаємодією складових його структурних елементів різного масштабного рівня. Принципово новим підходом до керування процесами раннього структуроутворення композиційних матеріалів на основі портландцементу є впровадження нанотехнологій, які ґрунтуються на застосуванні спеціально синтезованих наноконпонентів або їх в об'ємі матеріалу.

Зміни в будівельних композиційних матеріалах зазвичай розглядають як наслідок дії внутрішніх та зовнішніх факторів, що призводять до хімічних та фізичних перетворень під час утворення, зберігання та експлуатації означених матеріалів. До внутрішніх факторів зараховують склад і структуру портландцементу, наявність і кількість модифікуючих добавок, заповнювачів тощо. Керування властивостями будівельних композитних матеріалів здійснюється насамперед зміною внутрішніх факторів,

кожен з яких здійснює свій вплив і вносить певні зміни у властивості матеріалів. Будь-який внутрішній вплив як здійснює позитивні зміни властивостей, так і може призвести до негативних наслідків, тобто погіршення властивостей або відразу, або із плином часу. Тому визначення виду та величини внутрішніх впливів на властивості будівельних композиційних матеріалах, які здійснюють переважно позитивну дію на формування властивостей означених матеріалів, під час їх виготовлення є нагальною проблемою, яка потребує вирішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В останні роки розвиток досліджень у галузі керування властивостями будівельних композитних матеріалів зосередився на отриманні бетонів нового покоління (High Performance Concrete – НРС), які задовольняють критерії надійності протягом регламентованого життєвого циклу [1]. Важливим критерієм для зведення будівель і споруд будь-якого типу, ремонт, реставрація та реконструкція існуючих будівельних об'єктів вимагає застосування будівельних композитів зі швидкими темпами набору ранньої міцності [2–4].

Разом із тим фундаментальною проблемою розроблення та впровадження бетонів зі швидкими темпами набору ранньої міцності є забезпечення покращених технологічних властивостей бетонних сумішей, що передбачає максимальне уникнення трудомістких та енерговитратних операцій їх вкладання та ущільнення [3; 5; 6].

На думку ж професорів П.В. Кривенко та К.К. Пушкарьової [7] поліпшення властивостей традиційних в'язучих має проводитися за трьома основними напрямками: каталіз реакцій, що протікають у системі «цемент-вода»; модифікування структури цементного каменю; спрямоване регулювання мінералогічного складу цементу.

На цей час зміну властивостей бетонів рекомендують [8–10] здійснювати: забезпеченням необхідних хіміко-мінералогічного складу та структурних особливостей портландцементного клінкеру, дисперсності портландцементу, механо-хімічної активації цементів із введенням у процесі помелу суперпластифікаторів, спеціальних добавок.

Фундаментальними дослідженнями Г.С. Ходакова [11; 12] встановлено, що механічне подрібнення будівельних матеріалів, зокрема портландцементу, зумовлює протікання фізико-хімічних процесів, які призводять до збільшення потенціальної та поверхневої енергії речовини і зростання її хімічної активності. В'язучі, отримані сумісним помелом портланд-

цементного клінкеру, мінеральних компонентів та добавок пластифікуючої групи з утворенням орґано-мінеральних комплексів між портландцементними мінералами і молекулами поверхнево-активних речовин зберігають переваги тонкомелених цементів при значному зниженні їх водопотреби. Однак виробництво означених в'язучих пов'язане з певними ускладненнями технологічного процесу, зумовленими необхідністю введення при помелі в'язучого суперпластифікатора, а також забезпечення умов помелу, що запобігають його термічній деструкції.

Одним з ефективних методів прискорення тверднення портландцементів є використання добавок-прискорювачів (електролітів). Разом із тим прискорювачі тверднення можуть викликати корозію арматури чи зниження довговічності бетону.

Як відомо, міцність цементної матриці значною мірою залежить від розміру та кількості пор, що визначається водоцементним відношенням. У цьому плані розроблені в'язучі з ущільненою системою ультрадисперсних частинок, які одержують змішуванням портландцементу, мікрокремнезему (або інших високодисперсних матеріалів) та суперпластифікатора. Проте така технологія потребує застосування високошвидкісних змішувачів, при цьому суміш характеризується низькою рухливістю, а цементний камінь – підвищеною здатністю до тріщиноутворення.

Сучасний розвиток бетонних технологій базується на використанні високорухливих сумішей, що вимагає їх модифікування високоефективними водоредукуючими добавками для зменшення водоцементного відношення. Основою таких добавок є поверхнево-активні речовини (ПАР). Введення ж мінеральних добавок, наприклад, метакаоліну, мікрокремнезему, меленого вапняку, оксидів багатовалентних металів, вуглецевих нанотрубок і т.п. спільно з суперпластифікатором призводить до збільшення ефекту модифікації, як бетонної суміші, так і цементного каменю в бетоні.

Твердофазна активація, тобто активація твердих мінеральних частинок певних речовин – складників системи «цемент – мінеральна добавка – вода», вивчена й розроблена досить широко. У той же час рідкофазна активація, тобто активація рідини, зокрема води, є порівняно новим і маловивченим напрямом і має низку особливостей, пов'язаних із надмолекулярною структурою води. Способи активації води в технології бетону поділяють на кілька груп: фізичну (безреагентна активація) та хімічну (реагентна активація). До фізичної активації води належать

такі види впливу на воду: магнітна й електромагнітна обробка, механічна, термічна, акустична, плазмова, розрядно-імпульсна, електрохімічна обробка та ін. Основними виявленими недоліками фізичного впливу на воду замішування при її активації є: невелика тривалість активованого стану рідкого середовища; складність визначення кількісних параметрів, що характеризують ступінь активації водного середовища у виробничих умовах; необхідність дооснащення сучасних технологічних ліній спеціальним обладнанням для активації води; зміна умов і режимів проведення технологічних процесів; складність суміщення активованої води замішування з добавками, що застосовуються як модифікатори властивостей цементних сумішей і композитів. Хімічна активація води здійснюється введенням мінеральних речовин, які мають частинки нанорозмірів, зокрема вуглецевих нанотрубок, або органічних речовин у надмалих дозах.

На цей час існують теорії, якими дослідники дають пояснення механізму реакцій гідратації в системі «портландцемент – нанонаповнювач – ПАР – вода» [13; 14]. На нашу думку, найбільш достовірною є схема гідратації такої системи, яка запропонована в роботі [14]. Водночас необхідно зауважити, що в системі «портландцемент – нанонаповнювач – ПАР – вода», яка розглядається, молекули ПАР покривають частинки нанонаповнювача, що, за даними [13; 14], призводить до позитивного ефекту пришвидшення процесів формування структури цементного каменю. Однак означений комплекс «нанонаповнювач – ПАР» має визначення – «наповнена міцела» [15],

а хімічні процеси, які відбуваються за участю цього комплексу підпадають під визначення: «міцелярний каталіз» [15; 16]. Окрім цього, введення нанонаповнювача, за даними [13], призводить до зменшення об'єму, який необхідно заповнити продуктами гідратації портландцементу, і тому скорочується час формування структури цементного каменю, тобто час набуття бетоном певної міцності. Якщо процес відбувається таким чином, то, вочевидь, збільшується кількість цементу, який не прогідратував, тобто зменшується ефективність використання цементу.

З огляду на наведене, значний інтерес становлять результати досліджень П.О. Ребіндера [17], який із співробітниками довів, що застосування гідрофільних ПАР у малих дозах призводить до збільшення міцності бетону без введення додаткових компонентів, а також його думка, що з позиції фізико-хімії найбільший інтерес викликають колоїдні гідрофобні ПАР, які здатні утворювати міцели. Означене погоджується з висновком [18] про те, що застосування певних речовин у надмалих дозах призводить до доволі відчутних ефектів.

Постановка завдання. Мета статті – розглянути аспекти проблеми підвищення швидкості формування структури дрібнозернистих бетонів підвищеної міцності та дослідити вплив комплексів поверхнево-активних речовин, одна з яких є колоїдною.

Виклад основного матеріалу дослідження. У досліді застосовували як колоїдну поверхнево-активну речовину (ПАР) олеат натрію та додаткові поверхнево-активні речовини: слабку ПАР – поліспирт та суперпластифікатор – Master Silk.

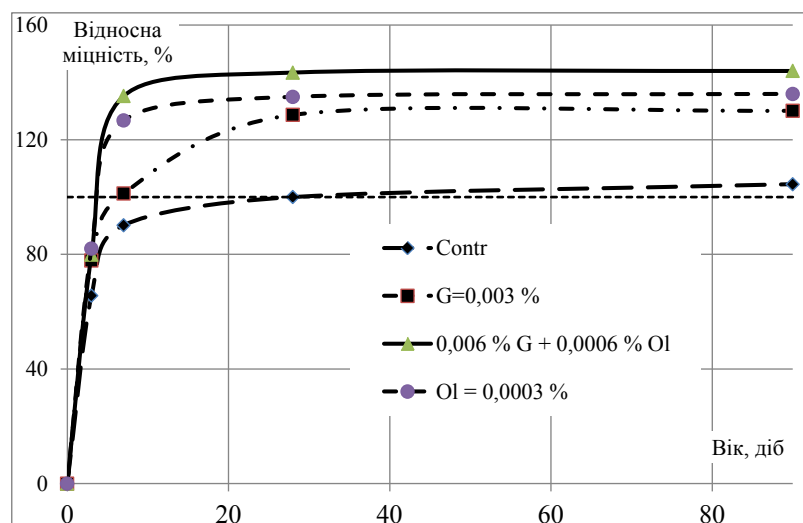


Рис. 1. Зміна міцності бетону в часі:

G – поліспирт, Ol – олеат натрію

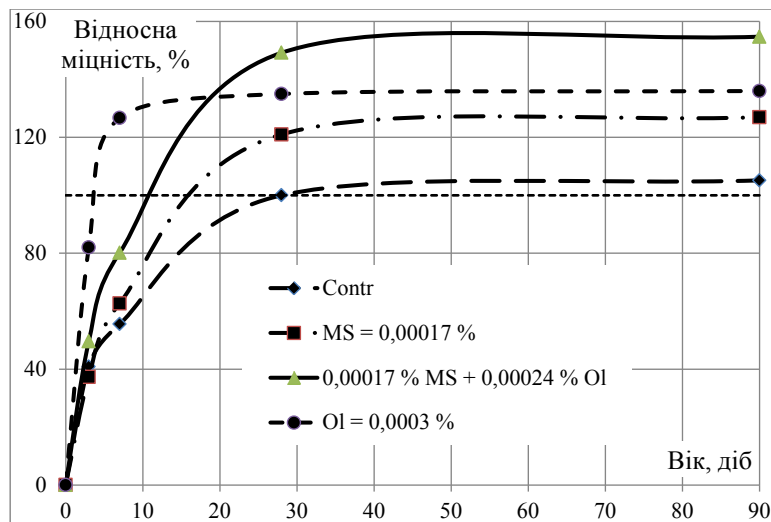


Рис. 2. Зміна міцності бетону в часі:
MS – Master Silk, OI – олеат натрію

Результати дослідів, які наведено на рис. 1 та рис. 2, показали, що виготовлення бетону із застосуванням водяного розчину олеату натрію в надмалій кількості призводить до значного підвищення швидкості формування структури бетону, що проявляється в збільшенні швидкості набуття ним певної міцності. Міцність при стиску такого бетону досягає міцності бетону без добавок у нормативному віці (28 діб) протягом 4 діб.

Введення додаткових ПАР у систему «портландцемент – олеат натрію – вода» трохи зменшує швидкість формування структури бетону, але в більш пізні терміни (20 діб) міцність такого бетону перевищує як міцність бетону без добавок, так і міцність бетону, отриманого на водяному розчині олеату натрію. Таким чином, якщо потрібно отримати бетон із високою швидкістю формування міцності, необхідно застосовувати для його виготовлення водяний розчин олеату натрію, а якщо треба отримати бетон підвищеної міцності,

необхідно застосовувати для його виготовлення розчин суміші олеату натрію та додаткової ПАР.

Отримані результати можна пояснити таким. Як випливає з літературних даних, спирти або гідрофільні ПАР впорядковують водну структуру, що полегшує переміщення протонів і іонів гідроксилу по сітці водневих зв'язків (естафетний механізм електропровідності). При додаванні спирту або гідрофільної ПАР до води вони заповнюють порожнечі між кластерами води, що приводить до їх стабілізації (рис. 3).

При цьому гідрофільні групи спиртів або гідрофільної ПАР можуть заміщати молекули води в локальних утвореннях. Тобто у присутності спирту або гідрофільної ПАР, через гідрофобні взаємодії, вода вже частково структурована. При введенні у воду або розчин спирту (або гідрофільної ПАР) олеату натрію (МПАР) відбувається остаточна структуризація води. У міру збільшення концентрації молекул МПАР настає їх

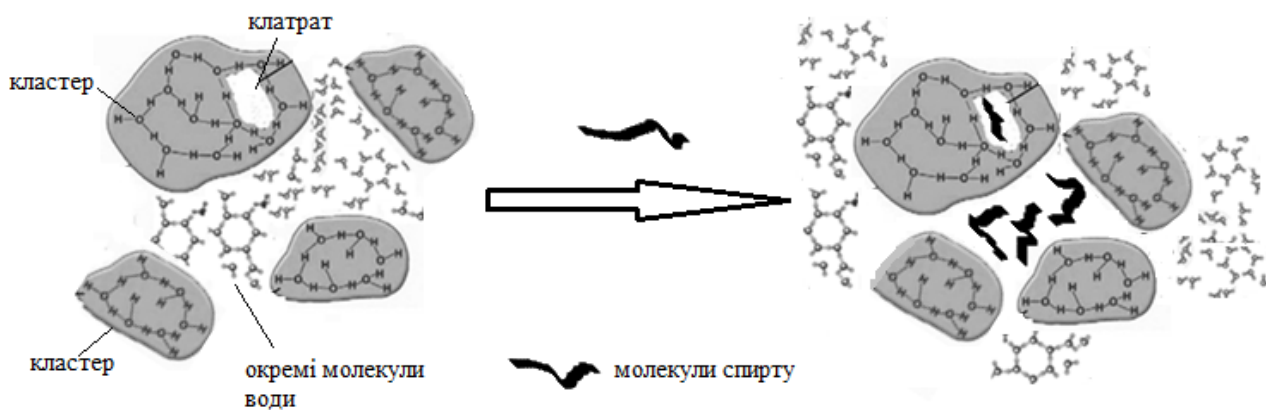


Рис. 3. Структурування води поліспиртом

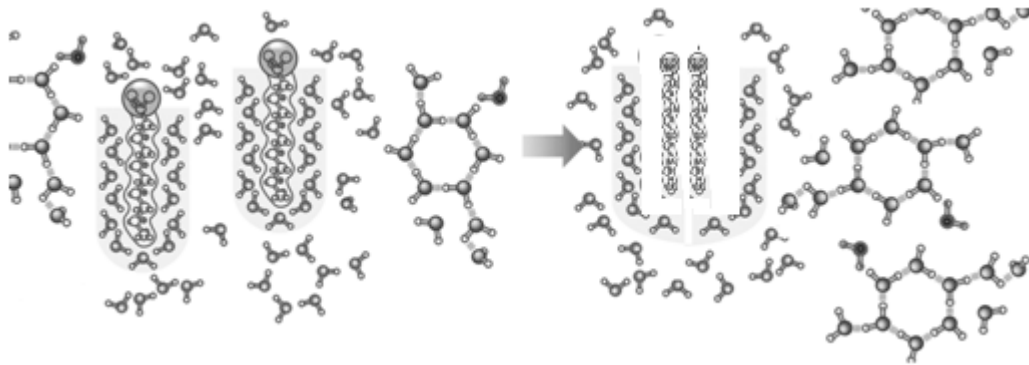


Рис. 4. Утворення димерів за рахунок гідрофобної взаємодії

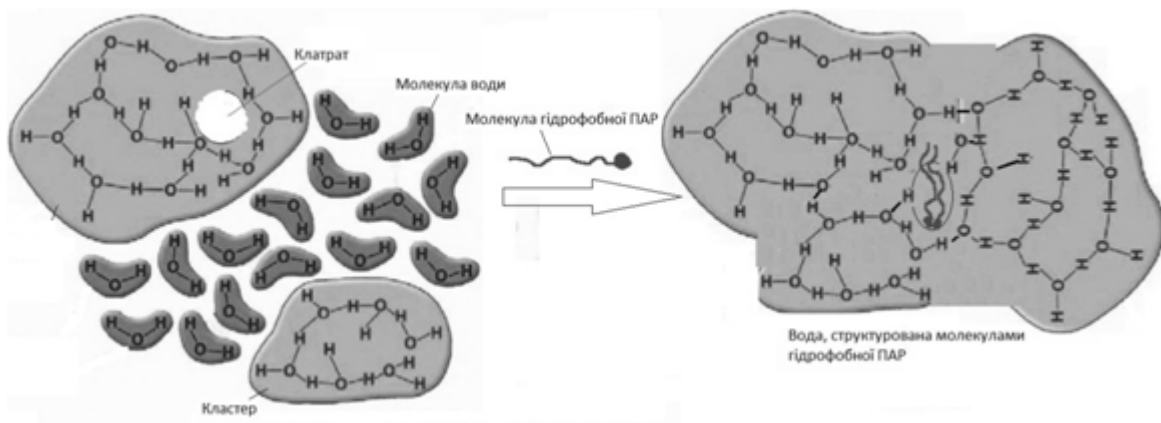


Рис. 5. Схема стабілізації структури води

колективна асоціація. В цьому випадку спочатку утворюються групи з двох молекул МПАА – так звані «димери», які й зумовлюють максимальну стабілізацію води (рис. 4).

Введенням у воду молекул олеату натрію – гідрофобної поверхнево-активної речовини (МПАА) у вигляді димерів за рахунок гідрофобної гідратації відбувається структурування води (рис. 5), тобто утворення безперервної фрактальної сітки з молекул води.

Гідрофобна гідратація як різновид гідрофобних взаємодій виявляється в разі складних органічних іонів і молекул ряду неелектролітів. Вона зумовлюється гальмуючою дією розчинених частинок на трансляційний рух молекул води розчину. На відміну від гідрофільної, гідрофобна гідратація не є наслідком посиленої взаємодії молекул води і розчиненої речовини, а скоріше виникає в результаті посилення взаємодії між молекулами H_2O , сприяючи тим самим структуруванню вільної води. Гідрофобна гідратація, на відміну від гідрофільної, істотно залежить від структурного стану води: чим більше стабілізована власна структура води (попереднім введенням поліспирту або

гідрофільної ПАА), тим сильніше виражений ефект гідрофобної гідратації. Локальна зміна концентрації гідроксильних груп поблизу наночастинок (димерів МПАА) призводить до об'ємного ефекту зміни (зменшенню) рН, тобто підкисленню суспензії. Останнє й впливає на процеси гідратації мінералів цементу, викликаючи їх прискорене розчинення.

Висновки і перспективи подальших досліджень у цьому напрямі. Проведений аналіз, який базувався на даних літературних джерел та результатах власних досліджень, виявив вплив суміші колоїдних поверхнево-активних речовин (олеату натрію) та поліспиртів (гідрофільних ПАА) на процеси формування структури бетону, що відбивається у пришвидшенні набуття ним міцності. Показано, що олеат натрію забезпечує приріст міцності бетону на початку його твердіння, а гідрофільна ПАА або поліспирт – у більш віддалені. Показано механізм активації води сумішшю колоїдної гідрофобної ПАА та гідрофільної ПАА за рахунок гідрофобної гідратації.

Подальші дослідження варто спрямувати на поглиблене вивчення механізму гідратації цементу в умовах дії активованої ПАА води, вста-

новлення кількісного зв'язку між впливом різних факторів на швидкість формування міцності бетону. Узагальнення аспектів формування міцності бетону в умовах дії активованої ПАР води варто здійснювати із використанням як теоретичних, так і практичних досліджень.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Aitcin P.C. The art and science of high performance concrete. *Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers. Bucharest (Romania)*, 2003. P. 69–88.

2. Кривенко П.В., Руденко І.І., Петропавловський О.М., Константиновський О.П. Високорухомі шлаколузні бетони з підвищеною ранньою міцністю. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 94, № 4. С. 117–124.

3. Пушкарьова К.К., Павлюк І.М. Швидкотверднучі композиційні в'язучі речовини, модифіковані комплексною добавкою сульфатнокарбонатного складу. *Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка*. 2009. Вип. 33. С. 36–40.

4. Пушкарьова К.К., Каверин К.О., Калантаєвський Д.О. Дослідження високоміцних цементних композицій, модифікованих комплексними органомінеральними добавками. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. № 5(77). С. 42–51.

5. Гоц В.І., Павлюк В.В., Шпилюк П.С. Бетони і будівельні розчини: підручник. Київ: КНУБА, 2016. 568 с.

6. Campillo I., Dolado J. S., Porro A. High performance nanostructured materials for construction. *Nanotechnology in construction RSC publications*. 2004. P. 215–225.

7. Кривенко П.В. Пушкарева Е.К. Долговечность шлакощелочного бетона. Київ, 1993. 224 с.

8. Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. В'язучі речовини. Київ: Основа, 2012. 448 с.

9. Тейлор Х. Химия цемента. Москва, 1996. 560 с.

10. Пашенко А.А., Мясникова Е.А., Саницкий М.А. и др. Теория цемента / под ред. А.А. Пашенко. Київ: Будівельник, 1991. 169 с.

11. Ходаков Г.С. Влияние тонкого измельчения на физико-химические свойства твердых тел. *Успехи химии*. 1963. XXXII. 7. С. 860–881.

12. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. Москва, 1972. 239 с.

13. Марущак У.Д. Наномодифіковані надшвидкотверднучі цементуючі системи та високофункціональні бетони на їх основі: дис. ... док. техн. наук: 05.23.05. Львів, 2019. 432 с.

14. Plugin A., Pushkarova K., Sukhanevych M. Nanomodified cement composites for thin walled architectural structures *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 907 (2020) 012030 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/907/1/012030.

15. Березин И.В., Мартинек К., Яцимирский А.К. Физико-химические основы мицеллярного катализа. *Успехи химии*. 1973. 10. XLU. 1729–1756.

16. Шишкіна О.О. Міцеллярний катализ в технології бетонів нового покоління. Кривий Ріг, 2017. 300 с.

17. Ушакова И.Н., Михайлов Н.В., Ребиндер П.А. Влияние водосодержания, микрозаполнителей и добавок поверхностно-активных веществ на дисперсную структуру каркаса песчаных бетонов *Коллоид*. 1964. Т. 26, № 6. С. 713–721.

18. Бурлакова Е.Б., Конрадов А.А., Мальцева Е.Л. Особенности действия сверхмалых доз биологически активных веществ и физических факторов низкой интенсивности. *Российский химический журнал*. 1999. Т. XLIII, № 5. С. 3–11.

REFERENCES:

1. Aitcin P.C. (2003) "The art and science of high performance concrete". *Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers. Bucharest (Romania)*. pp. 69–88.

2. Kryvenko P.V., Rudenko I.I., Petropavlovskiy O.M., Konstantynovskiy O.P. (2018) "High-moving slag concrete with high early strength". *Naukovyi visnyk budivnytstva*. Т. 94, № 4. pp. 117–124.

3. Pushkarova K.K., Pavliuk I.M. (2009) "Shvydkotverdnuchi kompozytsiini v'язuchy rehovyny, modyfikovani kompleksnoiu dobavkoiu sulfatnokarbonatnoho skladu". *Budivelni materialy, vyrobny ta sanitarna tekhnika*. Vyp. 33. pp. 36–40.

4. Pushkarova K.K., Kaveryn K.O., Kalantaievskiy D.O. (2015) "Doslidzhennia vysokomitsnykh tsementnykh kompozytsii, modyfikovanykh kompleksnyu orhano-kremnezemystymy dobavkamy". *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. № 5(77). pp. 42–51.

5. Hots V.I., Pavliuk V.V., Shpyliuk P.S. (2016) *Betony i budivelni rozchyny: pidruchnyk* [Concretes and mortars: a textbook] Kyiv, KNUBA.

6. Campillo I., Dolado J.S., Porro A. (2004) "High performance nanostructured materials for construction". *Nanotechnology in construction RSC publications*. Pp. 215–225.

7. Kryvenko P.V., Pushkareva E.K. (1993) *Dolhovechnost shlakoshchelochnoho betona* [Durability of slag-alkaline concrete] Osнова, Kyiv.

8. Runova R.F., Dvorkin L.Y., Dvorkin O.L., Nosovskiy Yu.L. (2012) *Viazhuchirechovyny* [Binders]. Osnova, Kyiv.
9. Teilor Kh. (1996) *Khymia tsementa* [Cement chemistry] Vyshcha shkola, Moskva, Russian Federation.
10. Pashchenko A.A., Miasnykova E.A., Sanytskyi M.A. y dr. (1991) *Teoryia tsementa* [Cement theory]. Budivelnik, Kyiv.
11. Khodakov H.S. (1963) “Vliyanye tonkoho yzmelcheniya na fyzyko-khymycheskye svoistva tverdykh tel”. *Uspekhy khymyy*. XXXII. 7. pp. 860–881.
12. Khodakov H.S. (1972) *Tonkoe yzmelchenye stroytelnykh materialov*. [Fine grinding of building materials], Vyshcha shkola, Moskva.
13. Marushchak U.D. Nanomodyfikovani nadshvydkotverdnuchi tsementuiuchi systemy ta vysokofunktsionalni betony na yikh osnovi. Dys. ... dok. tekhn. nauk: 05.23.05. Lviv, 2019. 432 s.
14. Plugin A., Pushkarova K, Sukhanevych M. (2020) “Nanomodified cement composites for thin walled architectural structures” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 907 012030 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/907/1/012030.
15. Berezyn Y.V., Martynek K., Yatsymyrskiy A. K. (1973) “Physicochemical Basics of Micellar Catalysis”. *Uspekhy khymyy*. 10. XLU. pp. 1729–1756.
16. Shyshkina O.O. (2017) *Mitseliarnyi kataliz v tekhnologii betoniv novoho pokolinnia*. KNU, Kryvyi Rih,
17. Ushakova I.N. Mihajlov N.V., Rebinder P.A. (1964) “Vlijanie vodosoderzhaniya, mikrozapolnitelej i dobavok poverhnostno-aktivnyh veshhestv na dispersnuju strukturu karkasa peschanyh betonov” *Kolloid*. T. 26, № 6. pp. 713–721
18. Burlakova, E.B., Konradov A.A., Mal'ceva E.L. (1999) “Osobennosti dejstvija sverhmalyh doz biologicheskij aktivnyh veshhestv i fizicheskij faktorov nizkoj intensivnosti” *Rossiiskij himicheskij zhurnal*. T. XLIII, № 5. pp. 3–11.

Стаття надійшла до редакції 14 січня 2021 року