

УДК 624.012.3:620.179.16

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300819.17.506

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ І МЕТОДУ ВИКОРИСТАННЯ НАНОСИСТЕМ У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ, СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНА СХЕМА ДОСЛІДЖЕНЬ

ДЕРЕВ'ЯНКО В. М.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,

МОСЬПАН В. І.<sup>2\*</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: [dereviankoviktor@i.ua](mailto:dereviankoviktor@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3601-2594

<sup>2\*</sup> Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: [vovamospan@i.ua](mailto:vovamospan@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-5359-9067

**Анотація.** Використання модифікуючих добавок – ефективний засіб цілеспрямованого впливу на властивості в'язучих речовин. Велика кількість публікацій присвячена вивченню цих проблем, проте багато аспектів впливу добавок ще не відомі, отримані результати не систематизовані і їх поки що неможливо висловити в аналітичній формі комплексного характеру їх дії. **Постановка проблеми.** Структура штучного каменю утворюється під час твердіння в'язучої речовини. Цей процес взаємопов'язаний із процесом гідратації, для нього характерна зміна структурних станів, за яких переважають міжчастинкові контакти певного типу. Чинити керуючий вплив на процеси гідратації і тверднення можливо лише за умови правильного розуміння їх механізму. Шляхом спрямованої зміни структури, зокрема, адсорбційного модифікування, можна домогтися істотного поліпшення фізико-механічних і експлуатаційних характеристик. Один з ефективних засобів цілеспрямованого впливу на ці процеси – використання модифікуючих добавок. **Мета роботи** – встановлення відмінностей у формуванні модифікованої структури гіпсової матриці за спільної дії мікро- та нанодисперсних добавок за присутності пластифікатора, а також їх впливу на функціональні і технологічні характеристики. Швидкість процесу розчинення і росту твердої системи залежить від початкової концентрації речовини, питомої поверхні, константи швидкості процесу і градієнта концентрації розчину на поверхні частинок в об'ємі речовини. **Методи.** Розв'язання задачі оптимальної модифікації вимагає виявлення залежності між видом, концентрацією, складом, способом уведення модифікуючих добавок і одержуваними функціональними характеристиками в'язучого матеріалу. Результати свідчать, що швидкість і форма утворюваних кристалів істотно змінюються за наявності в розчині пластифікатора й ультрадисперсних частинок. **Результати.** У разі додавання в гіпсову систему ультра- і нанорозмірних частинок через підвищену питому поверхню останніх збільшується концентрація точкових контактів і змінюється кінетика утворення. Виникають контактно-конденсаційні зв'язки, утворення яких стимулюється наявністю в системі нанорозмірних частинок, при цьому фіксація частинок переходить із дальньої коагуляції у ближню. Топологія структури, швидкість і форма зародження кристалів істотно змінюються у разі зміни умов твердіння (температура, водо-тверде відношення, рН, тиск). Взаємозв'язок між будовою кристалічної решітки сульфату кальцію і механізмом росту за присутності модифікуючих добавок впливає з кристалохімічного аналізу структури гіпсових в'язучих. Тобто залежно від виду добавки можна інтенсифікувати або, навпаки, уповільнити швидкість росту відповідних граней кристала, що викликає до зміну форми кристала, і відповідно, фізико-хімічних характеристик утвореного твердого тіла. **Висновок.** Дослідження впливу добавок на формування кристалів тривають, але вже ці отримані результати свідчать, що швидкість і форма утворюваних кристалів істотно змінюються за наявності в розчині пластифікатора й ультрадисперсних частинок.

**Ключові слова:** модифікуючі добавки; структура; нанодисперсні добавки; кристали; вугільні нанотрубки; таврит; пластифікатор

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОСИСТЕМ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЙ

ДЕРЕВ'ЯНКО В. М.<sup>1</sup>, д. т. н., доц.,

МОСЬПАН В. І.<sup>2\*</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: [dereviankoviktor@i.ua](mailto:dereviankoviktor@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3601-2594

<sup>2\*</sup> Кафедра технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: [yovamospan@i.ua](mailto:yovamospan@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-5359-9067

**Аннотация.** Использование модифицирующих добавок является эффективным средством целенаправленного воздействия на свойства вяжущих веществ. Большое количество публикаций посвящено изучению этих проблем, однако многие аспекты влияния добавок еще не известны, полученные результаты не систематизированы, и их пока что невозможно выразить в аналитической форме комплексного характера их действия. **Постановка проблемы.** Структура искусственного камня, образующегося при твердении вяжущего вещества. Этот процесс взаимосвязан с процессом гидратации, для него характерна смена структурных состояний, при которых преобладают межчастичные контакты определенного типа. Оказывать управляющее воздействие на процессы гидратации и твердения возможно только при правильном понимании их механизма. Путем направленного изменения структуры, в частности, адсорбционного модифицирования, можно добиться существенного улучшения физико-механических и эксплуатационных характеристик. **Цель работы** – было установление различий в формировании модифицированной структуры гипсовой матрицы при совместном действии микро- и нанодисперсных добавок в присутствии пластификатора, а также их влияния на функциональные и технологические характеристики. Скорость процесса растворения и роста твердой системы зависит от начальной концентрации вещества, удельной поверхности, константы скорости процесса и градиента концентрации раствора на поверхности частиц в объеме вещества. **Методы.** Решение задачи оптимальной модификации требует выявления зависимости между видом, концентрацией, составом, способом введения модифицирующих добавок и получаемыми функциональными характеристиками вяжущего материала. Результаты свидетельствуют о том, что скорость и форма образующихся кристаллов существенно меняются при наличии в растворе пластификатора и ультрадисперсных частиц. **Результаты.** При добавлении в гипсовую систему ультра- и наноразмерных частиц из-за повышенной удельной поверхности последних увеличивается концентрация точечных контактов и изменяется кинетика образования. Возникают контактно-конденсационные связи, образование которых стимулируется наличием в системе наноразмерных частиц, при этом фиксация частиц переходит с дальней коагуляции в ближнюю. Топология структуры, скорость и форма зарождения кристаллов существенно меняются при изменении условий твердения (температура, водотвердое отношение, pH, давление). Взаимосвязь между строением кристаллической решетки сульфата кальция и механизмом роста в присутствии модифицирующих добавок следует из кристаллохимического анализа структуры гипсовых вяжущих. То есть, в зависимости от вида добавки можно интенсифицировать или, наоборот, замедлить скорость роста соответствующих граней кристалла, что приведет к изменению формы кристалла, и соответственно, физико-химических характеристик образованного твердого тела. **Вывод.** Исследования влияния добавок на формирование кристаллов продолжаются, но уже полученные результаты свидетельствуют о том, что скорость и форма образующихся кристаллов существенно меняются при наличии в растворе пластификатора и ультрадисперсных частиц.

**Ключевые слова:** модифицирующие добавки; структура; нанодисперсные добавки; кристаллы; угольные нанотрубки; таврит; пластификатор

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND THE METHOD OF USE OF NANOSYSTEMS IN THE PRODUCTION OF CONSTRUCTION MATERIALS, STRUCTURALLY-LOGIC SCHEME OF RESEARCH

DEREVIANKO V.M.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
MOSPAN V.I.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-76, e-mail: [dereviankoviktor@i.ua](mailto:dereviankoviktor@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-3601-2594

<sup>2\*</sup> Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-76, e-mail [yovamospan@i.ua](mailto:yovamospan@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-5359-9067

**Abstract.** The use of modifying additives is an effective means of purposeful influence on the properties of binders. **Introduction (Problem statement).** It is only possible to have a control effect on the hydration and hardening processes with the correct understanding of their mechanism. Due to directional changes in the structure, in particular adsorption modification, it is possible to achieve a significant improvement in physical, mechanical and operational characteristics. **The purpose of the article** is to establish differences in the formation of the modified structure of the gypsum matrix in the joint action of micro- and nano dispersive additives in the presence of a plasticizer, as well as

their impact on the functional and technological characteristics. **Methods.** The solution of the problem of optimal modification requires the identification of the relationship between the type, concentration, composition, method of introduction of modifying additives and the resulting functional characteristics of the binder. **Results.** The results indicate that when ultra - and nano scale particles are added to the gypsum system due to the increased specific surface area of the latter, the concentration of point contacts increases and the kinetics of formation changes. Contact-condensation contacts arise, the formation of which is stimulated by the presence of nano scale particles in the system, while the fixation of the particles passes from the distant coagulation to the near one. That is, depending on the type of additive, it is possible to intensify or, conversely, slow the growth rate of the corresponding crystal faces, which will lead to a change in the shape of the crystal, and accordingly, the physical and chemical characteristics of the solid formed. **Conclusion.** The study of the effect of additives on the formation of crystals continues, but these results indicate that the speed and shape of the crystals formed varies significantly in the presence of a plasticizer in the solution and ultradispersed particles.

**Keywords:** *modifying additives; structure; nano dispersive additives; crystals; carbon nanotubes; plasticizer*

**Постановка проблеми.** Властивості в'язучих речовин та їх розчинів визначаються хімічним, мінералогічним, гранулометричним складом, водо-твердим відношенням, кількістю активних модифікуючих добавок та іншими факторами. Не менш важливу роль відіграють процеси гідратації і тверднення, формування структури на мікро- і макрорівнях у гіпсовій матриці, швидкість зародження, росту і розташування кристалів, характер порового простору [1-3].

Один з ефективних засобів цілеспрямованого впливу на ці процеси – використання модифікуючих добавок. Розв'язання задачі оптимальної модифікації вимагає виявлення залежності між видом, концентрацією, складом, способом уведення модифікуючих добавок і одержуваними функціональними характеристиками в'язучого матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Велика кількість публікацій присвячена вивченню цих проблем, проте багато аспектів впливу добавок ще не відомі, отримані результати не систематизовані і їх поки що неможливо висловити в аналітичній формі комплексного характеру їх дії.

Структура штучного каменю утворюється під час твердіння в'язучої речовини. Цей процес взаємопов'язаний з процесом гідратації, для нього властива зміна структурних станів, за яких переважають міжчастинні контакти певного типу. Чинити керуючий вплив на процеси гідратації і тверднення можливо лише за умови правильного розуміння їх механізму.

За допомогою спрямованої зміни структури, зокрема, адсорбційного модифікування, можна домогтися істотного поліпшення фізико-механічних і експлуатаційних характеристик [4; 5].

**Мета та завдання.** Численними дослідженнями встановлено, що вплив модифікаторів починається вже на стадії гідратації в'язучого, який, як відомо, включає не тільки їх хімічну взаємодію з водою з утворенням гідратних фаз, а і супутні цьому фізичні, фізико-хімічні, колоїдно-хімічні процеси, що включають розчинення, гідроліз і забезпечують, за дотримання певних умов, схоплювання, твердіння і утворення структури певної міцності і пористості. Для в'язучих систем у процесі гідратації відбувається постійна зміна стану системи, за якого формуються гідратні фази різної будови (призми, пластинки, волокна, голки тощо), які вносять певну невпорядкованість у новосформовану структуру [6-11].

Мета роботи – становлення відмінностей у формуванні модифікованої структури гіпсової матриці за спільної дії мікро- та нанодисперсних добавок за присутності пластифікатора, а також їх впливу на функціональні і технологічні характеристики.

Швидкість процесу розчинення і росту твердої системи залежить від початкової концентрації речовини, питомої поверхні, константи швидкості процесу і градієнта концентрації розчину на поверхні частинок в об'ємі речовини [12].

**Результати досліджень.** Під час додавання в гіпсову систему ультра-нанорозмірних частинок через підвищену

питому поверхню останніх збільшується концентрація точкових контактів і змінюється кінетика утворення. Виникають контактнo-конденсаційні зв'язки, утворення яких стимулюється наявністю в системі нанорозмірних частинок, при цьому фіксація частинок переходить із дальньої коагуляції у ближню. Топологія структури, швидкість і форма зародження кристалів істотно змінюються за зміни умов твердіння (температура, водо-тверде відношення, рН, тиск).



Рис. 1. Топологія структури, швидкість і форма зародження кристалів / Fig. 1. Topology of structure, velocity and form of crystal formation

Взаємозв'язок між будовою кристалічної решітки сульфату кальцію і механізмом росту за присутності модифікуючих добавок впливає з кристалохімічного аналізу структури гіпсових в'язучих [13–17].

- Кристали двоводного гіпсу мають добре розвинені грані (110), (010), (111), але інтенсивність адсорбції з розчину структурних елементів  $\text{Ca}^{2+}$  і  $[\text{SO}_4]^{2-}$  різна для різних граней, тому морфологія кристалів змінюється залежно від кристалоутвірного середовища (рис. 2).

- Адсорбція модифікаторів можлива:
  - на гранях кристалів, що мають найбільшу поверхневу енергію. Так, наприклад, полімери адсорбуються переважно на гранях  $\{111\}$  і  $\{011\}$ , і тим самим знижують швидкість зародкоутворення;
  - на позитивно або негативно заряджених площинах кристалів (що характерно для ПАР).

Тобто залежно від виду добавки можна інтенсифікувати або, навпаки, уповільнити швидкість росту відповідних граней кристала, що викличе до зміни форми

кристала, і відповідно, фізико-хімічні характеристики утвореного твердого тіла.

Дослідженнями встановлено, що у разі введення лігносульфонатів і гідроксиду кальцію адсорбційне модифікування обмежує ріст кристалів за їх активну межу, збільшує кількість зародків кристалів і зменшує розміри двоугідрату. В умовах лужного середовища посилюються процеси блокування активних граней, тобто розвиток отримує пластинчаста форма кристалів.

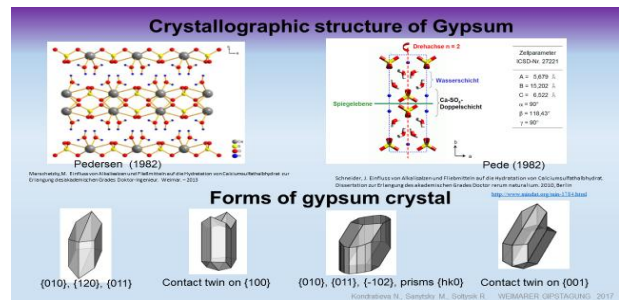


Рис. 2. Зміна морфології кристалів залежно від кристалоутвірного середовища / Fig. 2. The change in the morphology of crystals depending on the crystalline medium

За модифікації вуглецевими нанотрубками останні розташовуються по краях окремих кристалів гідросилікатів кальцію, сприяючи заповненню мікропустот і з'єднанню їх між собою. При цьому ВНТ меншої довжини пов'язують структурні утворення, розташовані одне від одного на відстані не більше одного мікрона, в той час як довгі нанотрубки скріплюють більш віддалені кристали.

Таким чином, дослідження дії адсорбційного модифікування за комплексного впливу мікро- і наномодифікаторів і пластифікатора дозволить установити залежність між спрямованим на ріст кристалів і змін характеристик матриці, тобто спрямовано регулювати властивості гіпсових в'язучих.

Як основне в'язуче використовувався гіпс будівельний Г-4 Ш-II ДСТУ Б В.2.7-82:2010 (м. Кам'янець-Подільськ)

За ультрадисперсну добавку в роботі використовували таурит сланцевий тонкодисперсний ТС-Д (Республіка Казахстан). Насипна щільність 493 г/дм<sup>3</sup>.

Як нанодисперсні добавки застосовували багат шарові вуглецеві нанотрубки (ВНТ), вуглецеві колоїдні частинки (ВКЧ), отримані ультразвуковим диспергуванням коксового пилу у вигляді гідрозолі з концентрацією частинок 0,075 г/л.

Для отримання стійкої водної дисперсії наночастинок і подальшого рівномірного розподілу нанодобавок у гіпсовій матриці використовували суперпластифікатор Sika на основі карбоксилатів.

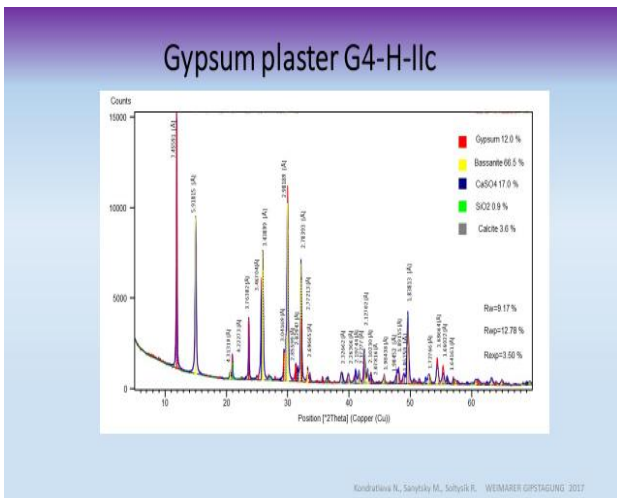


Рис. 3. Рентгенограма формування модифікованої структури гіпсової матриці за спільної дії мікро- та нанодисперсних добавок у присутності пластифікатора, а також їх впливу на функціональні і технологічні характеристики / Fig. 3. Radiography of the formation of a modified structure of gypsum matrix under the joint action of micro- and nanodispersed additives in the presence of plasticizer, as well as their influence on the functional and technological characteristics

Підготовку зразків модифікованого і немодифікованого гіпсу проводили у відповідності з вимогами стандарту ДСТУ Б В.2.7-82:2010. Модифікуючу добавку таурит додавали до гіпсового в'язучого Г4 і ретельно перемішували до однорідного розподілу. Нанодобавки ВНТ і ВКЧ в необхідній кількості разом із суперпластифікаторами додавали у воду замісу і піддавали ультразвуковому диспергуванню протягом 20 хв із частотою 22 кГц.

Для дослідження впливу кристалотвірного середовища на форму

кристалів застосували метод зустрічної дифузії.

У випадку вирощуванні кристалів гіпсу з насичених розчинів  $\text{CaCl}_2$   $\text{Na}_2\text{SO}_4$  без нанодобавок і пластифікатора кристали виростили однорідними, тонкими, голчастими, довжиною до 5 мм.



Рис. 4. Вирощені кристали гіпсу з насичених розчинів  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  без нанодобавок і пластифікатора / Fig. 4. Gypsum crystals grown from saturated solutions of  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  without nanowires and plasticizer

У разі додавання в розчин пластифікатора Sika форма і розміри утворених кристалів були абсолютно іншими, відсутні поодинокі кристали, спостерігався розкид у розмірах: довжина варіювалася від 5 до 15 мм, товщина 1 мм, практично всі кристали були зрощені в дузі, що свідчить про адсорбційному взаємодію пластифікатора з поверхнею кристала під час його росту. У процесі росту було помітно, що кристали мають загальну точку росту.

Додавання 5 %  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  блокувало ріст кристалів, вони мали товсту аморфоподібну (3...5 мм) основу, на якій розташовувалися тонкі голчасті кристали довжиною 3...4 мм. За зменшення концентрації лугу до 2,5 % товщина основи зменшилася на 2...3 мм, довжина кристалів збільшилася на 5 мм (додати 1 %  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

За додавання пластифікатора Sika і мікродисперсної добавки таурит (2,5 %) спостерігалось формування трьох типів кристалів: перший тип – тонкі прозорі пластинчасті кристали у вигляді ластівчиного хвоста, характерні для природного гіпсу, другий – довгі деревоподібні кристали з довжиною

основного стовбура 15...17 мм, на якому розміщуються більш короткі кристали (до 5 мм) у вигляді гіллястих відгалужень, третій тип – паличкоподібні кристали довжиною до 5 мм, товщина 1 мм, з невеликими потовщеннями на краях.

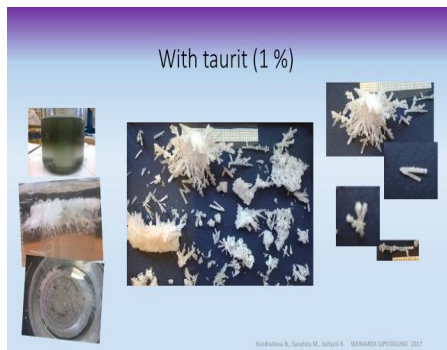


Рис. 5. Вирощені кристали гіпсу за додавання в розчин тауриту / Fig. 5. Cultured gypsum crystals when added to a solution of taurite

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Дослідження впливу добавок на формування кристалів тривають, але вже ці отримані результати свідчать, що швидкість і форма утворюваних кристалів істотно змінюється за наявності в розчині пластифікатора й ультрадисперсних частинок.

Дослідження спільного впливу частинок різної дисперсності (мікро- і нанорозмірів) на формування структури і функціональні характеристики проводили з використанням комплексних добавок 2 типів: 1) тауриту і колоїдних наночастинок (Г+Т+ВКЧ) і 2) тауриту і вуглецевих нанотрбок (Г+Т+ВНТ). Під час дослідження всіх зразків у воду замісу додавали суперпластифікатор Sika в кількості 0,25 % (рис. 5).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aranda B. Effect of multiphasic structure of binder particles on the mechanical properties of a gypsum-based material / B. Aranda, O. Guillou, C. Lanos, C. Daiguebonne, S. Freslon, C. Tessier, M. Laurans, C. Baux // Construction and Building Materials. – Vol. 102. – 2016. – Pp. 175–181.
2. Gordina A. F. Calcium sulfate-based compositions modified with superdispersed additives / A. F. Gordina, Yu. V. Tokarev, G. N. Pervushin, A. F. Buryanov // Internationale Baustofftagung. – № 18. – Weimar, 2012. – Pp. 0733–0740.
3. Badens E. Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives / E. Badens, S. Veessler, R. Boistelle // Journal of Crystal Growth. – № 198/199. – 1999. – Pp. 704–709.
4. Pundir Aakanksha. Evaluation of properties of gypsum plaster – superplasticizer blends of improved performance / Aakanksha Pundir, Mridul Garg // Randhir Singh Journal of Building Engineering. – № 4. – 2015. – Pp. 223–230.
5. Garg Mridul. Modifications in water resistance and engineering properties of b-calcium sulphate hemihydrate plaster-superplasticizerblends / Mridul Garg, Aakanksha Pundir, Randhir Singh // Materials and Structures. – 2016. – № 49. – Pp. 3253–3263.
6. Aranda B. Effect of multiphasic structure of binder particles on the mechanical properties of a gypsum-based material / B. Aranda, O. Guillou, C. Lanos, C. Daiguebonne, S. Freslon, C. Tessier, M. Laurans, C. Baux // Construction and Building Materials. – № 102. – 2016. – Pp. 175–181.
7. Lorencik S. Applications of nano-ingredients in building materials / S. Lorencik, G. Quercia, A. Lazaro, Q. Yu, H. J. Brouwers // Ibausil 19. – Band 1. – 2015. – Pp. 265–280.
8. Bekmansurov M. R. Gips verbund werk stoffe, modifiziert mit technogen ultradisperszusatzmitteln / M. R. Bekmansurov, A. F. Gordina, I. S. Poljanskich, G. I. Jakovlev, H.-B. Fischer // Internationale Baustofftagung. – Weimar Bundesrepublik Deutschland. – Weimar : F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2015. – Band 2. – Pp. 645–652.
9. Zhang Xiaofei. Phase- and morphology-controlled crystallization of gypsum by using flue-gas-desulfurization gypsum solid waste / Xiaofei Zhang, Jinshu Wang, Junshu Wu, Xin-Jian Jia, Yucheng Du, Hongyi Li, Bingxin Zhao // Journal of Alloys and Compounds. – Vol. 674. – 2016. – Pp. 200–206.
10. Song K. M. Simultaneous monitoring of hydration kinetics, microstructural evolution, and surface interactions in hydrating gypsum plaster in the presence of additives / K. M. Song, J. Mitchell, H. Jaffel, L. F. Gladden // Journal of Material Science. – 2010. – № 45. – Pp. 5282–5290.
11. Adrien J. In-situ X-ray tomographic monitoring of gypsum plaster setting / J. Adrien, S. Meille, S. Tadier, E. Maire, L. Sasaki // Cement and Concrete Research. – № 82. – 2016. – Pp. 107–116.
12. Nilles V. Study of the retarding mechanism of linear sodium polyphosphates on  $\alpha$ -calcium sulfate hemihydrate / V. Nilles, J. Plank // Cement and Concrete Research. – № 42. – 2012. – Pp. 736–744.

13. Buryanov A. Modification of the structure and properties of gypsum materials carbon nanostructures / A. Buryanov, G. Yakovlev // *Nanotechnology for green and sustainable construction : Proceedings of the II International Conference*. – Cairo, Egypt, 2010. – Pp. 123–129.

## REFERENCES

1. Aranda B., Guillou O., Lanos C., Daigebonne C., Freslon S., Tessier C., Laurans M. and Baux C. Effect of multiphasic structure of binder particles on the mechanical properties of a gypsum-based material. *Construction and Building Materials*, no. 102, 2016, pp. 175–181.
2. Gordina A.F., Tokarev Yu.V., Pervushin G.N. and Buryanov A.F. Calcium sulfate-based compositions modified with superdispersed additives. *Internationale Baustofftagung*, no. 18, Weimar, 2012, pp. 0733–0740.
3. Badens E., Veessler S. and Boistelle R. Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives. *Journal of Crystal Growth*, no. 198/199, 1999, pp. 704–709.
4. Pundir Aakanksha and Garg Mridul. Evaluation of properties of gypsum plaster-superplasticizer blends of improved performance. *Randhir Singh Journal of Building Engineering*, no. 4, 2015, pp. 223–230.
5. Garg Mridul and Pundir Aakanksha. *Randhir Singh Modifications in water resistance and engineering properties of b-calcium sulphate hemihydrate plaster-superplasticizer blends*. *Materials and Structures*, 2016, no. 49, pp. 3253–3263.
6. Aranda B., Guillou O., Lanos C., Daigebonne C., Freslon S., Tessier C., Laurans M. and Baux C. Effect of multiphasic structure of binder particles on the mechanical properties of a gypsum-based material. *Construction and Building Materials*, no. 102, 2016, pp. 175–181.
7. Lorencik S., Quercia G., Lazaro A., Yu Q. and Brouwers H.J. Applications of nano-ingredients in building materials. *Ibausil 19*, Band 1, 2015, pp. 265–280.
8. Bekmansurov M.R., Gordina A.F., Poljanskich I.S., Jakovlev G.I. and Fischer H.-B. Gips verbund werk stoffe, modifiziert mit technogen ultradisperszusatzmitteln. *Internationale Baustofftagung*, 16-18 September, 2015 Weimar Bundesrepublik Deutschland. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar 2015, Band 2, pp. 645-652.
9. Zhang Xiaofei, Wang Jinshu, Wu Junshu, Jia Xin-Jian, Du Yucheng, Li Hongyi and Zhao Bingxin. Phase- and morphology-controlled crystallization of gypsum by using flue-gas-desulfurization gypsum solid waste. *Journal of Alloys and Compounds*, no. 674, 2016, pp. 200-206.
10. Song K.M., Mitchell J., Jaffel H. and Gladden L.F. Simultaneous monitoring of hydration kinetics, microstructural evolution, and surface interactions in hydrating gypsum plaster in the presence of additives. *Journal of Material Science*, 2010, no. 45, pp. 5282–5290.
11. Adrien J., Meille S., Tadier S., Maire E. and Sasaki L., In-situ X-ray tomographic monitoring of gypsum plaster setting. *Cement and Concrete Research*, no. 82, 2016, pp. 107–116.
12. Nilles V. and Plank J. Study of the retarding mechanism of linear sodium polyphosphates on  $\alpha$ -calcium sulfate hemihydrate. *Cement and Concrete Research*, no. 42, 2012, pp. 736–744.
13. Buryanov A. and Yakovlev G. Modification of the structure and properties of gypsum materials carbon nanostructures. *Proceedings of the II International Conference “Nanotechnology for green and sustainable construction”*, Cairo, Egypt, 2010, pp. 123–129.

Надійшла до редакції 25.07.2019 р.