

Міністерство освіти та науки України  
Український державний університет залізничного транспорту

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Єфіменко Артем Сергійович

УДК 666.91:691.311 (043.3)

## ДИСЕРТАЦІЯ

### ПІДВИЩЕННЯ ВОДОСТІЙКОСТІ ГПСОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПОЛІФРАКЦІЙНИМИ МІНЕРАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ

05.23.05 Будівельні матеріали та вироби  
19 Архітектура та будівництво

Подається на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



А.С. Єфіменко

Науковий керівник: Пługін Андрій Аркадійович,  
доктор технічних наук, професор

Харків 2021

## АНОТАЦІЯ

*Єфіменко Артем Сергійович* Підвищення водостійкості гіпсу поліфракційними мінеральними добавками. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 Будівельні матеріали та вироби (19 Архітектура та будівництво). – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2021.

Дисертація присвячена розробці теоретичних та експериментальних основ підвищення водостійкості гіпсу поліфракційними мінеральними добавками.

У першому розділі дисертації виконано критичний огляд літературних джерел з гіпсової тематики, у яких доведено, що властивості гіпсових матеріалів визначаються їх складом, технологією отримання, процесами твердіння, структурою. Продуктом гідратації гіпсу є двогідрат сульфату кальцію, а основним недоліком – недостатня водостійкість, що обмежує його застосування конструкціями, експлуатованими в сухих умовах. Показник водостійкості – коефіцієнт розм'якшення  $K_p$  немодифікованого гіпсу не перевищує 0,4. Низьку водостійкість гіпсу традиційно пояснюють високою розчинністю двогідрату сульфату кальцію, а також розклинювальними силами, створюваними в контактах між його окремими кристалами водою, що всочується в пори. Проаналізовано роботи, присвячені підвищенню водостійкості гіпсу, яке досягається способами: зниження водогіпсового відношення, сполучення з гідравлічними в'язучими, уведення активних мінеральних добавок, що надають гідравлічні властивості та утворюють нерозчинні сполуки, просочення та гідрофобізація поверхонь виробів, уведення полімерних добавок, фібри, добавок-мікронаповнювачів, що ущільнюють структуру гіпсового каменю. Більшість цих способів забезпечує підвищення  $K_p$  до 0,6–0,8.

Зазначено, що властивості тверднучих мінеральних в'язучих як

водно-дисперсних систем визначаються електроповерхневими властивостями дисперсної фази та електроповерхневими взаємодіями між її частинками. Згідно з такими уявленнями недостатня водостійкість гіпсу пояснюється тим, що у його структурі між кристалами утворюються тільки електрогетерогенні контакти. Підвищення водостійкості може бути досягнуто уведенням мінеральних добавок-наповнювачів, що утворюють з кристалами гіпсу-двогідрату електрогетерогенні контакти. Висунуто припущення, що грані кристалів гіпсу можуть мати різнойменні електричні поверхневі заряди. З'ясовано також, що водостійкість гіпсу з мінеральними добавками-наповнювачами залежить від товщини та щільності прошарків гіпсу-двогідрату між їх частинками, та показано, що фактична товщина прошарків пов'язана зі структурною характеристикою гіпсового композиту – коефіцієнтом розсушення частинок наповнювача гіпсом-двогідратом  $\eta$ .

У другому розділі наведені характеристики основних матеріалів і методів досліджень. Для експериментальних досліджень застосовували гіпс будівельний, шлак доменний гранульований мелений, мікрокремнезем з вмістом частинок розміром менше 5000 нм 21 %, нанодисперсний глинозем з розміром частинок 50–80 нм, пластифікуючі добавки на основі лігносульфонату натрію і сульфонафталінформальдегіду.

Знак електричного поверхневого заряду кристалів гіпсу та частинок мінеральних добавок визначали розрахунком абсолютних і рівноважних електроповерхневих потенціалів. Можливість хімічної взаємодії гіпсу з мінеральними добавками оцінювали термодинамічним аналізом. Гідратацію гіпсу досліджували у водному препараті, мінеральні добавки – в імерсійному препараті за допомогою світлового мікроскопа та безпосередньо за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Структуру штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками досліджено на відколах також за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Фізико-механічні та гідрофізичні властивості штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками визначали випробуванням зразків-призм. Водостійкість оцінювали коефіцієнтом

розм'якшення  $K_p$ , вологісну деформацію (набухання) – відносною лінійною деформацією зразків під час водо насичення  $\varepsilon_w$ .

У третьому розділі здійснено експериментально-теоретичне обґрунтування структури водостійкого гіпсового каменю з поліфракційними мінеральними добавками. Визначені за стехіометричним складом сполук і за  $pH=7$  рівноважні електроповерхневі потенціали склали: шлаку –  $(-0,3 \text{ В})$ , мікрокремнезему –  $(-0,96 \text{ В})$ , нанодисперсного глинозему –  $0,36 \text{ В}$ . Для гіпсу-двогідрату електроповерхневі потенціали визначено окремо для подовжніх і торцевих граней. Із схеми кристалічної будови гіпсу-двогідрату видно, що атоми сірки містяться всередині тетраєдрів  $SO_4$  та екрануються атомами кисню. На поверхню подовжніх граней виходять складові ґратки, що містять тільки атоми кальцію та кисню, найпростішим елементом яких можна вважати  $O-Ca_2-O$ . Аналогічно на поверхню торцевих граней виходять складові ґратки, що містять тільки атоми кальцію та кисню, найпростішим елементом яких можна вважати  $O_2-Ca-O_2$ . Рівноважний електроповерхневий потенціал бічних граней дорівнює  $0,98 \text{ В}$ , а торцевих граней –  $(-0,72) \text{ В}$ , відповідно. Отже, у поровій волозі з  $pH = 7$  знак поверхневого заряду подовжніх граней кристалів гіпсу-двогідрату формується потенціал визначальними іонами ПВІ  $Ca^{2+}$  і є позитивним, торцевих граней – ПВІ  $SO_4^{2-}$  та  $OH^-$  і є негативним. Знак поверхневого заряду шлаку та мікрокремнезему формується ПВІ  $SiO_4^{4-}$  та  $OH^-$  і є негативним, а  $Al_2O_3$  – ПВІ  $Al^{3+}$  і є позитивним.

Виходячи з цього у структурі штучного каменю контакти між окремими кристалами гіпсу, що орієнтовані паралельно, є електророгомогенними. В ці контакти через водні прошарки вбудовуються протиіони подвійного електричного шару  $SO_4^{2-}$ , які через іон-дипольні взаємодії забезпечують високу міцність цих контактів і гіпсового каменю в сухому стані. Проте внаслідок водонасичення за рахунок розбавлення протиіонів осмотичним тиском води відбувається розуцільнення електрогомогенних контактів, що і визначає низьку водостійкість гіпсу. Контакти між торцевою і подовжньою

гранями кристалів гіпсу-двогідрату є електрогетерогенними. Вони є водостійкими навіть за наявності водних прошарків між кристалами. Довільне утворення таких контактів підтверджується відомою схильністю гіпсу під час гідратації до утворення дендритів, в яких і реалізується електрогетерогенний контакт між подовжніми і поперечними гранями кристалів двогідрату. Проте у звичайному гіпсовому камені таких контактів небагато і вони не впливають на водостійкість гіпсового каменю в цілому. Електрогетерогенні контакти між частинками доменного гранульованого шлаку (мікрокремнезему) та гіпсом-двогідратом утворюються через подовжні грані кристалів гіпсу, а між частинками нанодисперсного глинозему та гіпсом-двогідратом – через торцеві грані кристалів гіпсу. Останні характерні для сферолітів, підкладкою для утворення яких є частинки з позитивним поверхневим зарядом. Такі контакти є водостійкими навіть за наявності водних прошарків у них. Частинки нанодисперсного глинозему є підкладкою для зростання від них кристалів гіпсу-двогідрату та утворенню щільних сферолітів.

З урахуванням поверхневих зарядів кристалів гіпсу-двогідрату та частинок мінеральних добавок розроблено схеми структури штучного каменю, які мають забезпечити найкращі показники його водостійкості. Побудову цих схем здійснювали в процесі аналізу результатів оптико-мікроскопічних та електронно-мікроскопічних досліджень. Згідно з цими схемами кристали гіпсу-двогідрату прилягають до поверхні частинок наповнювача з негативним поверхневим зарядом позитивно зарядженими подовжніми гранями, утворюючи з ними електрогетерогенні контакти, а вже від них зростають кристали, орієнтовані нормально до поверхні. У випадку застосування тільки однієї фракції наповнювача в центрі міжзернових пустот між частинками шлаку залишаються пори, доступні для розчинення торців кристалів, а також пори у шарах між кристалами гіпсу-двогідрату, найбільш доступні для розклинювальної дії води. Згідно з розробленими схемами введення мінерального наповнювача тільки однієї фракції з негативним поверхневим зарядом забезпечить помірне підвищення

водостійкості. Додаткове уведення ще однієї більш дрібної фракції мінеральної добавки призведе до заповнення цих пор та до зниження пористості, підвищення водостійкості. Отже, для підвищення водостійкості будівельного гіпсу доцільно уведення в нього мінеральних добавок-наповнювачів двох фракцій –наповнювача, що має негативний поверхневий заряд, у сполученні з мікро(нано)наповнювачем, що має негативний або позитивний поверхневий заряд. Наповнювач як структуроутворюючі частинки забезпечує формування структури гіпсового каменю як композиційного матеріалу, а мікронаповнювач забезпечує заповнення міжзернових пустот між структуроутворюючими частинками, у т.ч. щільними агрегатами-сферолітами із кристалів гіпсу-двогідрату. Така структура характеризується максимально можливою кількістю електрогетерогенних контактів, а наповнювач та мікро(нано)наповнювач разом забезпечують максимальний захист кристалів гіпсу-двогідрату від розчинення та розклинювальної дії води.

Виконано термодинамічний аналіз системи гіпс-півгідрат – кремнезем та гіпс-півгідрат – глинозем. У разі наявності в системі гіпсу-півгідрату та мікрокремнезему можливим може здаватися внаслідок вивільнення із гіпсу вапна утворення гідросилікатів кальцію, наприклад, тобермориту. У цьому випадку мають вивільнюватись і сульфат-іони. Проте вільна енергія Гіббса  $\Delta G$  цієї реакції має позитивне значення 161,14 ккал/моль, яке свідчить про її малоймовірність. Малоймовірними є також реакції утворення із гіпсу-півгідрату та нанодисперсного глинозему гідроалюмінатів кальцію  $CAH_{10}$  (40,14 ккал/моль),  $C_3AH_6$  (116,22 ккал/моль), гідросульфоалюмінатів кальцію  $C_3ASH_{10}$  (110,67 ккал/моль),  $C_3AS_3H_{32}$  (90,42 ккал/моль). Можливим є у разі наявності у доменному гранульованому шлаку вільного вапна утворення гідросульфоалюмінату моносульфатної форми  $C_3ASH_{10}$  (-52,43 ккал/моль). Проте, оскільки його кількість не очікується значною, а морфологія подібна гіпсу, істотного впливу на процеси структуроутворення та формування властивостей гіпсового каменю у порівнянні з впливом частинок самого глинозему очікувати не варто.

У четвертому розділі були виконані експериментальні дослідження залежностей фізико-механічних та гідрофізичних властивостей штучного гіпсового каменю від вмісту мінеральних добавок. Згідно з отриманими залежностями міцність гіпсошлакового каменю у сухому стані  $f$  залежить від відносного вмісту шлаку  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш})$  майже зворотно пропорційно. Залежності міцності у водонасиченому стані  $f_w$  та коефіцієнту розм'якшення (водостійкості)  $K_p$  від  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш})$  є хвилеподібними з максимумами, положення яких залежать від водотвердого відношення  $\text{В}/(\text{Г}+\text{Ш})$ . Для досліджених матеріалів максимальні  $K_p$  до 0,6 були забезпечені за  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш})$  0,4 і 0,6. Вологісна деформація  $\varepsilon_w$  гіпсошлакового каменю у разі водонасичення залежить від  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш})$ . Максимальна  $\varepsilon_w$  понад  $1,2 \times 10^{-3}$  м/м відзначена у гіпсового каменю без шлаку. Зі збільшенням  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш})$   $\varepsilon_w$  знижується хвилеподібно аналогічно залежності водостійкості. Мінімальні  $\varepsilon_w$   $0,5 \times 10^{-3}$  м/м та менше відзначені за  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш}) = 0,05-0,1$  та понад 0,27. Це узгоджується з уявленнями про те, що найкращі гідрофізичні властивості гіпсу з мінеральними добавками забезпечуються у разі утворення найбільш щільних упаковок кристалів гіпсу-двогідрату у прошарках між їх частинками та відповідності коефіцієнту розсунення частинок мінеральної добавки гіпсом  $\eta$  його оптимальній величині  $\eta_{\text{опт}}$ .

У гіпсошлакового каменю з нанодисперсною мінеральною добавкою підвищення її відносного вмісту  $\text{МН}/(\text{Г}+\text{Ш})$  від 0 до 0,03–0,06 не призвело до підвищення  $f$  та навіть обумовило її певне зниження, проте забезпечило підвищення  $K_p$  до 0,81 (нанодисперсний глинозем) і до 1 (мікрокремнезем). Це підтвердило теоретичні уявлення про те, що уведення нанодисперсних наповнювачів призводить до збільшення кількості електрогетерогенних контактів у структурі штучного каменю за рахунок заповнення міжкристалічних порожнин їх частинками.

Залежність співвідношення між міцністю на розтяг та міцністю на стиск  $f_t/f_c$  гіпсошлакового каменю від відносного вмісту шлаку  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш})$  і нанодисперсного глинозему  $\text{МН}/\text{Г}$  має хвилеподібний характер з

максимумами, положення яких залежить від вмісту шлаку та водотвердого відношення. Це підтверджує уявлення про те, що фізико-механічні властивості гіпсошлакового каменю залежать від характеру упаковки кристалів гіпсу-двогідрату між частинкам шлаку та нанодисперсних частинок – між кристалами гіпсу-двогідрату.

У п'ятому розділі наведено результати розробки і впровадження складу гіпсового в'язучого підвищеної водостійкості, коефіцієнт розм'якшення якого перевищує 0,8. В'язуче містить гіпс-півгідрат, шлак доменний гранульований мелений, нанодисперсну мінеральну добавку нанодисперсного глинозему або мікрокремнезему з вмістом частинок розміром менше ніж 5 мкм не менше ніж 20 %, пластифікуючу добавку. На склад подано заяву на видачу патенту на винахід і заяву на видачу патенту на корисну модель. Розроблено технологічний регламент виробництва гіпсового в'язучого підвищеної водостійкості, який включає технологічну схему, послідовність і опис технологічних операцій, вимоги до контролю якості.

Гіпсове в'язуче підвищеної водостійкості рекомендовано застосовувати для виготовлення сухих сумішей для застосування у приміщеннях з підвищеною вологістю, призначених для: штукатурки механізованого нанесення; шпаклівки; монтажного клею для гіпсокартонних листів; вирівнювання підлоги шаром товщиною до 50 мм. Виконано дослідно-промислове впровадження результатів досліджень шляхом включення у проектно-кошторисну документацію, зокрема, у специфікації матеріалів, кошторисну документацію, трьох об'єктів реконструкції, сухих сумішей для штукатурки, шпаклівки, монтажного клею, вирівнювання підлог. Проектно-кошторисна документація розроблена ТОВ НВП «Академія». Розрахунковий економічний ефект від впровадження склав 1796 грн. за 1 т сухої будівельної суміші. Результати дисертаційного дослідження використовуються у навчальному процесі.

**Ключові слова:** гіпс, водостійкість, мінеральна добавка, доменний гранульований шлак, нанодисперсний глинозем



## ABSTRACT

Yefimenko, Artem S. Increasing the water resistance of gypsum with polyfractional mineral additives. – Manuscript copyright.

Dissertation for the Candidate Degree in Engineering Science (PhD in Sci. Eng.) in specialty 05.23.05 Building Materials and Products (19 Architecture and Building). – Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2021. The dissertation defense will take place at the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2021.:

The dissertation is devoted to development of theoretical and experimental bases of increase of water resistance of plaster by polyfractional mineral additives.

The first section of the dissertation provides a critical review of literature sources on gypsum, which proves that the properties of gypsum materials are determined by their composition, production technology, curing processes, structure. The product of gypsum hydration is calcium sulfate dehydrate, and the main disadvantage is insufficient water resistance, which limits its use by structures operated in dry conditions. Water resistance index - the softening coefficient  $Kp$  of unmodified gypsum does not exceed 0.4. The low water resistance of gypsum is traditionally explained by the high solubility of calcium sulfate dehydrate, as well as the proppant forces created in the contacts between its individual crystals by water absorbed into the pores. The works devoted to the increase of water resistance of gypsum, which is achieved by the following methods: reduction of water-gypsum ratio, combination with hydraulic binders, introduction of active mineral additives that provide hydraulic properties and form insoluble compounds, impregnation and hydrophobization of product surfaces, addition of polymers -micron fillers that seal the structure of gypsum stone. These methods provide an increase in  $Kp$  to 0.6-0.8.

It is noted that the properties of hardening mineral binders as water-dispersed systems are determined by the electro-surface properties of the dispersed phase and electro-surface interactions between its particles. According to such ideas, the insufficient water resistance of gypsum is explained by the fact that in its structure only electrohomogeneous contacts are formed between the crystals.

Increasing water resistance can be achieved by introducing mineral filler additives that form electroheterogeneous contacts with gypsum dihydrate crystals. It has been suggested that the faces of gypsum crystals may have different electric surface charges.

It was also found that the water resistance of gypsum with mineral filler additives depends on the thickness and density of gypsum dihydrate layers between their particles, and it is shown that the actual thickness of the layers is related to the structural characteristic of gypsum composite  $\eta$ .

The second section presents the characteristics of the main materials and research methods. For experimental studies, gypsum, ground granulated slag, microsilica with a particle size of less than 5000 nm 21%, nanodisperse alumina with a particle size of 50–80 nm, plasticizing additives based on sodium lignosulfonate and sulfonaphthalene formaldehyde were used.

The sign of the electric surface charge of gypsum crystals and particles of mineral additives was determined by calculating the absolute and equilibrium electro-surface potentials. The possibility of chemical interaction of gypsum with mineral additives was evaluated by thermodynamic analysis. Hydration of gypsum was studied in an aqueous preparation, mineral supplements - in an immersion preparation using a light microscope and directly using a scanning electron microscope. The structure of artificial gypsum stone with mineral additives was studied on the chips also using a scanning electron microscope. Physico-mechanical and hydrophysical properties of artificial gypsum stone with mineral additives were determined by testing prism samples. Water resistance was evaluated by the softening coefficient  $Kp$ , moisture deformation (swelling) - the relative linear deformation of the samples during water saturation  $\varepsilon_w$ .

In the third section, it was experimentally-theoretical that the structure of the water-resistant gypsum stone with polyfractional mineral additives was rimmed. The values for the stoichiometric warehouse with a half of and for  $pH = 7$  were equally important for the electrical top potentials: slag - (-0.3 B), microsilica - (-0.96) B, for nanodispersed alumina - 0.36 B. okremo for sub-and-end faces. It can be seen

from the diagram of crystalline budov and gypsum-two-sided, that the atoms of the water are located in the middle of the tetrahedrons of  $SO_4$  and are shielded by the atoms of acid. On the surface of the sub-edges, there are warehouses of beads, so that only atoms of calcium and sour oil can be covered, the simplest element of which can be  $O - Ca^{2+} - O$ . Similarly, on the surface of the end faces, there are warehouses of beads, where only atoms of calcium and acid can be covered, with the simplest element of which it is possible to use  $O_2 - Ca - O_2$ . Equally important electrical surface potential of the side edges of the road is 0.98 V, and of the end faces - (-0.72) B, for example. At the same time, in porous hairs with  $pH = 7$ , the sign of the surface charge of the sub-faces of the crystals in hypsu-two-hydrate is formed by the potential initial ions PII  $Ca^{2+}$  i positive, end faces - PII  $SO_4^{2-}$  and  $OH^-$  and negative. The sign of the surface charge of the slag and microsilica forms PVI  $SiO_4^{4-}$  and  $OH^-$  i negative, and  $Al_2O_3$  - PVI  $Al^{3+}$  i positive.

Based on this, in the structure of artificial stone contacts between individual gypsum crystals, oriented in parallel, are electrohomogeneous. Counterions of the  $SO_4^{2-}$  double electric layer are embedded in these contacts through the water layers, which, through ion-dipole interactions, provide high strength of these contacts and gypsum stone in the dry state. However, due to water saturation due to dilution of counterions by osmotic pressure of water there is a dissolution of electrohomogeneous contacts, which determines the low water resistance of gypsum. Contacts between the end and longitudinal faces of gypsum dihydrate crystals are electroheterogeneous. They are water-resistant even in the presence of water layers between the crystals. Arbitrary formation of such contacts is confirmed by the known tendency of gypsum during hydration to the formation of dendrites, in which the electroheterogeneous contact between the longitudinal and transverse faces of the dihydrate crystals is realized. However, in ordinary gypsum stone such contacts are few and they do not affect the water resistance of gypsum in general. Electroheterogeneous contacts between the particles of blast furnace granulated slag (microsilica) and gypsum dihydrate are formed through the longitudinal faces of gypsum crystals, and between the particles of nanodisperse alumina and gypsum

dihydrate - through the end faces of gypsum crystals. The latter are characteristic of spherulites, the substrate for the formation of which are particles with a positive surface charge. Such contacts are waterproof even in the presence of water layers in them. Nanodisperse alumina particles are the substrate for the growth of gypsum dihydrate crystals from them and the formation of dense spherulites.

Taking into account the surface charges of gypsum-dihydrate crystals and particles of mineral additives, schemes of artificial stone structure have been developed, which should provide the best indicators of its water resistance. The construction of these schemes was carried out in the process of analyzing the results of optical-microscopic and electron-microscopic studies. According to these schemes, gypsum dihydrate crystals adhere to the surface of the filler particles with a negative surface charge with positively charged longitudinal faces, forming electroheterogeneous contacts with them, and crystals oriented normally to the surface grow from them. In the case of using only one fraction of filler in the center of the intergranular cavities between the slag particles remain pores available for dissolving the ends of the crystals, as well as pores in the layers between gypsum-dihydrate crystals, most accessible to the wedging action of water. According to the developed schemes of introduction of a mineral filler of only one fraction with a negative surface charge will provide moderate increase in water resistance. Additional introduction of another smaller fraction of mineral additive will lead to the filling of these pores and to a decrease in porosity, increase water resistance. Therefore, to increase the water resistance of gypsum, it is advisable to introduce mineral filler additives of two fractions - filler with a negative surface charge, in combination with a micro (nano) filler with a negative or positive surface charge. The filler as a structure-forming particles provides the formation of the structure of gypsum stone as a composite material, and the microfiller provides the filling of intergranular voids between the structure-forming particles, including dense aggregates-spherulites from gypsum-dihydrate crystals. This structure is characterized by the maximum possible number of electroheterogeneous contacts,

and the filler and micro (nano) filler together provide maximum protection of gypsum-dihydrate crystals from dissolution and wedging action of water.

Thermodynamic analysis of the gypsum hemihydrate - silica and gypsum hemihydrate - alumina system was performed. If gypsum hemihydrate and microsilica are present in the system, the formation of calcium hydrosilicates, such as tobermorite, may appear due to the release of lime from the gypsum. In this case, sulfite ions must also be released. However, the free Gibbs energy  $G$  of this reaction has a positive value of 161.14 kcal / mol, which indicates its improbability. Reactions from the formation of calcium hydroaluminates  $CAN_{10}$  (40.14 kcal / mol),  $C_3AH_6$  (116.22 kcal / mol), and calcium hydrosulfoaluminates  $C_3A\hat{S}H_{10}$  (110.67 kcal / mol) are also unlikely?  $C_3A\hat{S}_3H_{32}$  (90,42 kcal / mol). It is possible in the presence of free lime slag in the blast furnace granulated slag to form hydrosulfoaluminate of the monosulfate form  $C_3A\hat{S}H_{10}$  (-52.43 kcal / mol). However, since its quantity is not expected to be significant, and the morphology is similar to gypsum, a significant impact on the processes of structure formation and formation of properties of gypsum stone in comparison with the influence of alumina particles should not be expected.

In the fourth section, experimental studies of the dependences of the physical-mechanical and hydrophysical properties of artificial gypsum stone on the content of mineral additives were performed. According to the obtained dependences, the strength of gypsum slag stone in the dry state  $f$  depends on the relative slag content  $S / (G + S)$  almost inversely proportional. The dependences of the strength in the water-saturated state  $f_w$  and the softening coefficient (water resistance)  $Kp$  on  $S / (G + S)$  are wavy with maxima, the positions of which depend on the water-solid ratio  $S / (G + S)$ . For the studied materials, the maximum  $Kp$  up to 0.6 were provided for  $S / (G + S)$  0.4 and 0.6. Wet deformation  $\varepsilon_w$  of gypsum slag stone in case of water saturation depends on  $S / (G + S)$ . The maximum  $\varepsilon_w$  over  $1,2 \times 10^{-3}$  m / m was observed in gypsum stone without slag. With increasing  $W / (G + W)$   $\varepsilon_w$  decreases wavy similarly to the dependence of water resistance. Minimum  $\varepsilon_w$   $0,5 \times 10^{-3}$  m / m and less are marked for  $S / (G + S) = 0.05-0.1$  and over 0.27. This is consistent with

the notion that the best hydrophysical properties of gypsum with mineral additives are provided in the case of the formation of the densest packages of gypsum dihydrate crystals in the layers between their particles and compliance with the coefficient of spread of gypsum mineral additive particles  $\eta$  its optimal value  $\eta_{opt}$ .

In gypsum slag stone with nanodisperse mineral additive, increasing its relative  $MN / (G + S)$  content from 0 to 0.03–0.06 did not lead to an increase in  $f$  and even caused a certain decrease, but provided an increase in  $Kp$  to 0.81 (nanodisperse alumina) and up to 1 (microsilica). This confirmed the theoretical notion that the introduction of nanodisperse fillers leads to an increase in the number of electroheterogeneous contacts in the structure of artificial stone due to the filling of intercrystalline cavities with their particles.

The dependence of the ratio between tensile strength and compressive strength  $f_t/f_c$  of gypsum slag stone on the relative slag content  $S / (G + S)$  and nanodisperse alumina  $MN / G$  has a wavy character with maxima, the position of which depends on the slag content and water-solid ratio. This confirms the idea that the physical and mechanical properties of gypsum slag stone depend on the nature of the packaging of gypsum dihydrate crystals between the slag particles and nanodisperse particles - between gypsum dihydrate crystals.

The fifth section presents the results of the development and implementation of a gypsum binder of high water resistance, the softening coefficient of which exceeds 1. The binder contains gypsum hemihydrate, granulated blast furnace slag, nanodisperse mineral additive of nanodisperse alumina or microsilica with a particle content of less than 5  $\mu\text{m}$  and not less than 20%, a plasticizing additive. An application for a patent for an invention and an application for a patent for a utility model have been filed with the warehouse. Technological regulations for the production of gypsum binder of high water resistance have been developed, which includes the technological scheme, sequence and description of technological operations, quality control requirements.

It is recommended to use gypsum binder of the increased water resistance for production of dry mixes for application in rooms with the increased humidity

intended for: plasters of the mechanized drawing; putties; mounting glue for drywall; leveling the floor with a layer up to 50 mm thick. Research and industrial implementation of research results by including in the design and estimate documentation, in particular, in the specification of materials, estimate documentation, three objects of reconstruction, dry mixes for plaster, putty, mounting glue, floor leveling. Design and estimate documentation was developed by LLC SPE "Academy". The estimated economic effect of the implementation amounted to UAH 1,796. for 1 ton of dry construction mix. The results of the dissertation research are used in the educational process.

**Keywords:** gypsum, waterresistance, mineraladditive, blast furnace granulated slag, nanodispersed alumina

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у фахових виданнях та у виданнях, що включені до наукометричних баз:*

1. Єфіменко А.С. Дослідження об'ємних змін гіпсу з мінеральними добавками // Зб. наук. праць УкрДУЗТ. – 2020. – Вип. 193. – С.–. 6-16:

2. Tetyana Kostyuk, Varvara Vinnichenko, Andrii Plugin, Olga Borziak, and Artem Iefimenko. Physico-chemical studies of the structure of energy-saving compositions based on slags. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1021 (2021) 012016. doi:10.1088/1757-899X/1021/1/012016.

*Особистий внесок:* збір інформації про хімічний склад шлаків, визначення модуля їх основності, аналіз придатності для композицій.

3. Плугін, А.А. Підвищення міцності та водостійкості гіпсових в'язучих нанодисперсними мінеральними добавками / А.А.Плугін, Х.-Б.Фішер, О.С.Борзяк, А.С.Єфіменко, А.А.Жигло // Зб. наук. праць УкрДУЗТ. – 2017. – Вип. 171. – С.37–43. DOI: 10.18664/1994-7852.171.2017.111439.

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження та аналіз їх результатів.

4. Плугін, А.А. Вплив мінеральних наповнювачів на процеси структуроутворення гіпсового каменю / А.А.Плугін, О.С.Борзяк, А.С.Єфіменко, Х.-Б.Фішер // Науковий вісник будівництва, Т.90, №4, 2017. – С.116-119. [Електронне джерело] Режим доступу: [https://vestnik-construction.com.ua/images/pdf/4\\_90\\_2017/22.pdf](https://vestnik-construction.com.ua/images/pdf/4_90_2017/22.pdf)

*Особистий внесок:* підготовка зразків для електронної мікроскопії, участь у її виконанні та аналізі результатів, побудова схем структури

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

5. Єфіменко А.С. Шляхи підвищення міцності гіпсових композицій / А.С.Єфіменко, Х.-Б.Фішер, К.Матхес, О.С.Борзяк, А.А.Плугін, Е.С.Геворкян // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: VI Міжнар. наук.-технічна конфер., 19-21 квітня 2017, Харків: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, 2017. – С.50–51.

*Особистий внесок:* пошук і аналіз літератури.



6. Plugin, A. Сухая строительная смесь для теплоизоляционной штукатурки пониженной паропроницаемости (Trockenmörtel zur Herstellung von wärmedämmendem Putz mit verringerter Dampfdurchlässigkeit) / A.Plugin, H.-B.Fisher, D.Bondarenko, O.Pluhin, A.Yefimenko, O.Starkova // 3WeimarerGipstagung, 14–15 März 2017, Weimar. –Bauhaus–UniversitätWeimar, 2017.–P44. –S.293–302.

*Особистий внесок:* підбір складу суміші, розрахунки термічного опору конструкцій.

7. Plugin A.A., Fisher H.-B., Borziak O.S., Iefimenko A.S.Increasing the Water-Resistance of Gypsum Materials Using Polydisperse Mineral Additives / A.A.Plugin, H.-B.Fisher, O.S.Borziak, A.S.Iefimenko//20InternationaleBaustofftagung, 12-14 September 2018, Weimar, BundesrepublikDeutschland: Tagungsbericht. –Weimar: Bauhaus-UniversitätWeimar, 2018. – P 1.30. – Band 2.– P.549–558.

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження та аналіз їх результатів, підготовка зразків для електронної мікроскопії та участь у її виконанні.

8. Костюк Т.О. Створення ресурсо- та енергозберігаючих композицій важких бетонів на основі шлаків / Т.О. Костюк , В.І. Вінниченко, А.А. Пługін, О.С. Борзяк, А.С. Єфіменко // Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті», Харків, 18-20 листопада 2020 р.: Тези доповідей. - Харків: УкрДУЗТ, 2020. – С.76–77.

*Особистий внесок:* збір інформації про хімічний склад шлаків, визначення модуля їх основності, аналіз придатності для композицій.

***Публікації, що додатково відображають матеріали дисертації:***

9. Пługін, А.А. Підвищення водостійкості гіпсу добавками мікронаповнювачів / А.А.Пługін, С.В.Воронін, О.С.Борзяк, А.С.Єфіменко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА; ХОТВ АБУ, 2016. – №2(84). – С.239–242.

*Особистий внесок:* розрахунок електроповерхневих потенціалів кристалів і частинок, участь у аналізі їх впливу на контакти між кристалами і частинками та структуру штучного каменю.

10. Єфіменко, А.С. Аналіз способів підвищення водостійкості гіпсу / А.С.Єфіменко, Р.О.Ізюмський, Ю.В.Савенко // Збірник наукових праць студентів та магістрантів УкрДУЗТ, 2016, Вип.14, С.363–367. [Електронне джерело] Режим доступу: <http://old.kart.edu.ua/studenska-nauk-diyalnist-ua/zbirnik-nayk-prac-ua>.

*Особистий внесок:* пошук і аналіз літератури.

11. A. Plugin, A. Iefimenko, O. Borziak, E. Gevorkyan, O. Pluhin, Establishing patterns in the influence of micro- and nano-dispersed mineral additives on the water resistance of gypsum. EEJET 1/6 (109) 2021. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224221.

*Особистий внесок:* експериментальні дослідження та аналіз їх результатів, побудова схем структури штучного каменю.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1 КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ УЯВЛЕНЬ ПРО ТВЕРДІННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ГІПСУ.....	27
1.1 Традиційні уявлення про твердіння та властивості гіпсу .....	27
1.2 Способи підвищення водостійкості гіпсу .....	30
1.3 Вплив електроповерхневих властивостей і взаємодій на структурутворення і властивості гіпсу .....	36
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1 .....	45
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	46
2.1. Матеріали.....	46
2.2. Методи досліджень .....	50
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2 .....	58
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ВОДОСТІЙКОГО ГІПСОВОГО КАМЕНЮ З ПОЛІФРАКЦІЙНИМИ МІНЕРАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ .....	60
3.1 Електроповерхневі властивості гіпсу та мінеральних добавок . .	60
3.2 Електрогетерогенні та електрогетерогенні контакти в структурі гіпсового каменю .....	66
3.3 Структура штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками, що забезпечує водостійкість . . . . .	70
3.4 Перевірка можливості хімічної взаємодії гіпсу з мінеральними добавками .....	79
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3 .....	81
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ПІДВИЩЕННЯ ВОДОСТІЙКОСТІ ГІПСУ ПОЛІФРАКЦІЙНИМИ МІНЕРАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ . . . . .	84
4.1 Залежність міцності та водостійкості штучного гіпсового каменю від вмісту мінеральної добавки-наповнювача – шлаку доменного гранульованого меленого .....	84
4.2 Вологісні деформації штучного гіпсового каменю з мінеральною добавкою шлаку доменного гранульованого меленого .....	90
4.3 Залежність міцності та водостійкості штучного гіпсового каменю з мінеральною добавкою шлаку від вмісту нанодисперсної мінеральної добавки . . . . .	95
4.4 Співвідношення міцності на стиск і розтяг штучного гіпсового каменю з мінеральною добавкою шлаку доменного гранульованого	

меленого та нанодисперсної мінеральної добавки.....	100
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4.....	107
РОЗДІЛ 5 ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ . . . . .	110
5.1 Розробка та патентування складу гіпсового в'язучого з мінеральними добавками підвищеної водостійкості .....	110
5.2 Технологічний регламент виробництва гіпсового в'язучого підвищеної водостійкості .....	117
5.3 Рекомендації із застосування гіпсового в'язучого підвищеної водостійкості .....	121
5.4 Впровадження гіпсового в'язучого підвищеної водостійкості . .	123
5.5 Техніко-економічна ефективність впровадження результатів досліджень .....	123
5.6 Використання результатів досліджень у навчальному процесі	125
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 5.....	125
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	130
ДОДАТОК А. Електронно-мікроскопічні знімки поверхні відколу гіпсо- шлакового каменю. .	144
ДОДАТОК Б. Розписка про одержання електронної заявки на винахід.....	151
ДОДАТОК В. Технологічний регламент виробництва гіпсового в'язучого підвищеної водостійкості .....	155
ДОДАТОК Г. Рекомендації із застосування гіпсового в'язучого підвищеної водостійкості	.157
ДОДАТОК Д Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи. Розрахунок економічного ефекту. Довідка про впровадження результатів дисертації на здобуття наукового ступеня	159
ДОДАТОК Е Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	163

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Основою сучасного будівництва є в'язучі речовини, одними з яких є гіпсові в'язучі. На їх основі виготовляють високоефективні екологічні матеріали, які характеризуються достатньою міцністю, невеликими густиною, тепло- та звукопровідністю, високою довговічністю. Їм легко надавати будь-які архітектурну форму та колір. Гіпсові матеріали неспалимі, сприяють підтриманню комфортного мікроклімату в приміщеннях через хороші показники паро- та повітропроникності, здатності вбирати надлишок вологи з повітря та віддавати її у разі зниження вологості. Завдяки цим перевагам гіпсові матеріали широко використовуються в будівництві, проте певні недоліки стримують їх більш широке застосування. Основним недоліком гіпсових матеріалів є недостатня водостійкість, яка полягає у суттєвій втраті міцності у разі зволоження. Тому галузь застосування гіпсу обмежена вузькими границями умов експлуатації – приміщеннями з сухим і нормальним режимом. Підвищення водостійкості гіпсових матеріалів дозволяє значно розширювати галузь їх застосування.

Низьку водостійкість гіпсових матеріалів в основному пояснюють розчинністю дводіграту сульфату кальцію, а також розклинювальними силами, створюваними водою, що всочується в пори. На сьогодні відомо багато способів підвищення водостійкості гіпсу, наприклад, додаванням гідравлічних в'язучих та/або більш дешевих мінеральних добавок, проте вони, як правило, не забезпечують підвищення водостійкості більше, ніж до 0,8. Крім того, відомі пояснення механізму підвищення водостійкості не враховують електроповерхневих взаємодій в тверднучому гіпсі як водно-дисперсній системі а, отже, за думкою автора, не є вичерпними.

Виходячи з викладеного, підвищення водостійкості гіпсу мінеральними добавками є актуальним практичним, а розвиток уявлень про механізм цього підвищення з урахуванням електроповерхневих властивостей і взаємодій – актуальним науковим завданням..

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження виконані на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту у складі держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України ДР№0115U000279 «Теоретичні основи отримання нових корозійностійких композиційних силікатних матеріалів з високими гідрофізичними характеристиками. Фізико-хімічні та колоїдно-хімічні основи водостійкості та корозійної стійкості композиційних силікатних матеріалів» і ДР№ 0119U100295 «Теоретичні та експериментальні основи визначення, прогнозування та забезпечення несучої здатності та довговічності транспортних споруд в умовах агресивних впливів».

**Мета роботи** – підвищення водостійкості гіпсу поліфракційними мінеральними добавками до величин понад 0,8.

**Завдання досліджень:**

- виконати аналіз електроповерхневих властивостей гіпсу та мінеральних добавок, проаналізувати можливість утворення електрогетерогенних контактів між кристалами гіпсу і частинками мінеральних добавок, здійснити моделювання структури штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками, яка забезпечить його максимальну водостійкість, розкрити механізм їх впливу на структуроутворення і водостійкість;
- виконати електронно-мікроскопічні дослідження штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками і порівняти їх результати з моделями структури;
- експериментально дослідити залежність водостійкості та вологісних деформацій штучного гіпсового каменю від мінеральної добавки однієї фракції (шлаку);
- експериментально дослідити залежність водостійкості та співвідношення між міцністю на розтяг та міцністю на стиск штучного гіпсового каменю від мінеральної добавки двох різних фракцій (шлаку і нанодисперсної мінеральної

добавки);

- розробити склад гіпсового в'язучого підвищеної водостійкості та матеріалів на його основі та технологію їх виготовлення, виконати їх дослідно-промислове впровадження і впровадження у навчальний процес.

**Об'єкт дослідження** – водостійкість і фізико-механічні властивості штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками та їх залежності від складу

**Предмет досліджень** – гіпс з мінеральними добавками: наповнювача – шлаку доменного гранульованого меленого та нанодисперсних наповнювачів – нанодисперсного глинозему та мікрокремнезему.

**Наукова гіпотеза:** Водостійкість гіпсу може бути підвищена шляхом уведення двох фракцій мінеральних добавок-наповнювачів різних за дисперсністю і знаком поверхневого заряду. В структурі штучного каменю частинки наповнювачів мають утворювати з кристалами гіпсу-двогідрату електрогетерогенні контакти: частинки з негативним зарядом – з подовжніми гранями кристалів, а частинки з позитивним зарядом – з торцевими гранями.

**Методи досліджень.** Знак електричного поверхневого заряду кристалів гіпсу та частинок мінеральних добавок визначали розрахунком абсолютних і рівноважних електроповерхневих потенціалів. Можливість хімічної взаємодії гіпсу з мінеральними добавками оцінювали шляхом термодинамічного аналізу. Фізико-механічні та гідрофізичні властивості штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками визначали випробуванням зразків-призм. Водостійкість оцінювали коефіцієнтом розм'якшення, вологісну деформацію – відносною лінійною деформацією зразків під час водонасичення. Структуру штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками визначали за допомогою просвічувальної світлової та скануючої електронної мікроскопії.

#### **Наукова новизна отриманих результатів**

- - вперше встановлено, що у штучному гіпсовому каменю водостійкі електрогетерогенні контакти утворюються: між позитивно зарядженими

подовжніми та негативно зарядженими торцевими гранями кристалів гіпсу-двогідрату; між подовжніми гранями кристалів і частинками мінеральних добавок-наповнювачів з негативним поверхневим зарядом (шлаку, мікрокремнезему); між торцевими гранями кристалів та частинками нанодисперсних мінеральних добавок з позитивним поверхневим зарядом (нанодисперсного глинозему);

- набули подальшого розвитку уявлення про електроповерхневі властивості гіпсу та мінеральних добавок, зокрема, встановлені потенціалвизначальні іони, які обумовлюють поверхневі заряди граней кристалів гіпсу-двогідрату;

- набули подальшого розвитку уявлення про структуру і властивості штучного гіпсового каменю з поліфракційними мінеральними добавками: гіпс з мінеральною добавкою-наповнювачем набуває структуру композиційного матеріалу, в якому матрицею є гіпс-двогідрат, структурований мікро- або наночастинками, з максимальною кількістю електрогетерогенних контактів, які забезпечують водостійкість штучного каменю.

**Достовірність отриманих результатів** забезпечена обранням апробованих незалежних теоретичних та експериментальних методів досліджень: розрахунку абсолютних і рівноважних електроповерхневих потенціалів, термодинамічного аналізу, фізико-механічних випробувань, у т.ч. з визначенням водостійкості, вимірювання вологісних деформацій, світлової просвічувальної та скануючої електронної мікроскопії, їх достатньою статистичною забезпеченістю, а також узгодженістю результатів між собою та з результатами теоретичних досліджень.

**Обґрунтованість результатів досліджень** забезпечена застосуванням в теоретичних дослідженнях фундаментальних положень і закономірностей фізичної та колоїдної хімії, фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів, електрохімії.

**Практична значущість отриманих результатів** полягає у створенні теоретичних та експериментальних основ підвищення водостійкості гіпсових матеріалів та підтверджується: розробкою складів гіпсового в'язучого



підвищеної водостійкості для виготовлення сухих сумішей штукатурки, шпаклівки, монтажного клею, вирівнювання підлоги для приміщень з підвищеною вологістю; подачею заявок на видачу патентів на винахід та корисні моделі; розрахунковим економічним ефектом від впровадження 1796 грн. за 1 т сухої будівельної суміші; використанням результатів досліджень у навчальному процесі УкрДУЗТ під час підготовки бакалаврів і докторів філософії за спеціальностями 192 Будівництво та цивільна інженерія і 273 Залізничний транспорт.

### **Особистий внесок здобувача:**

Основні теоретичні та експериментальні результати отримані автором особисто, зокрема, самостійно виконано аналітичний огляд літератури з тематики досліджень, більшість фізико-механічних випробувань та фізико-хімічних досліджень, обробка та отримання експериментальних залежностей, розрахунки. Постановлення завдань досліджень, формулювання наукової гіпотези та нових наукових положень виконані спільно з науковим керівником, впровадження результатів досліджень – спільно із співавторами публікацій.

**Апробація результатів досліджень.** Результати дисертаційного дослідження доповідались на: 3-й гіпсовій конференції «3 Weimarer Gipstagung», 2017, м. Веймар, Німеччина; 20-й Міжнародній конференції з будівельних матеріалів «20'bausil», 2017, м. Веймар, Німеччина; VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті», 2017, м. Харків; Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність на транспорті», м. Харків, 2020. У повному обсязі робота доповідалась на міжвузівському семінарі в УкрДУЗТ 04.02.2021.

**Публікації.** Основні наукові результати дисертаційної роботи опубліковано у 11 наукових працях, з яких 1 стаття у виданні, що індексується

НМБД Scopus, 3 статті у виданнях, що входять до переліку фахових видань України, 4 праці апробаційного характеру, 3 додаткові публікації.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, основних висновків, списку використаних джерел із 134 найменувань на 14 сторінках, містить 102 сторінки основного тексту, 38 рисунків, 14 таблиць, 5 додатків.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Будников П.П. Гипс и его исследование. – Ленинград, АН СССР, 1933. – 266 с.
2. Будников П.П. Гипс, его исследование и применение. – Москва: Госстройиздат, 1943. – 374 с.
3. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества. – Москва: Стройиздат, 1966. – 407 с.
4. Волженский А.В. Гипсовые вяжущие и изделия / А.В.Волженский, А.В.Ферронская. – Москва: Стройиздат, 1974. – 326 с.
5. Вихтер Я.И. Производство гипсовых вяжущих веществ. – Москва: Высш. школа. – 1974. – 272 с.
6. Воробьев Х.С. Гипсовые вяжущие изделия. – Москва: Стройиздат, 1983. – 200 с.
7. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. – Москва: Стройиздат, 1986. – 464 с.
8. Гордашевский П.Ф., Долгорев А.В. Производство гипсовых вяжущих материалов из гипсосодержащих отходов. – Москва: Стройиздат, 1987. – 105 с.
9. Шульце В., Тишер В., Эттель В.П. Растворы и бетоны на нецементных вяжущих. – Москва: Стройиздат, 1990. – 240 с.
10. Вяжущие материалы / А.А. Пащенко, В.П. Сербин, Е.А. Старчевская. – Київ: Вища школа, 1993. – 440 с.
11. Справочник по производству гипса и гипсовых изделий / Под ред. К.А. Зубарева. – Москва: ЮНИТИ, 1995. – 464 с.
12. Гипсовые материалы и изделия / Под ред. А.В. Ферронской. – Москва: АСВ, 2004. – 488 с.
13. Производство и применение гипсовых материалов и изделий / Под ред. А.В. Ферронской. – Москва, АСВ, 2006. – 263 с.
14. Ферронская А.В. Гипс в малоэтажном строительстве / А.В. Ферронская, В.Ф. Коровякин, И.М. Баранов, А.Ф. Бурьянов. – Москва: АСВ, 2008. – 240 с.

15. 1 Weimarer Gipstagung, 30–31 März 2011, Weimar: Tagungsbericht. – Weimar: FIB, Bauhaus–Universität Weimar, 2011. – 456 pp.
16. 2 Weimarer Gipstagung, 26–27 März 2014, Weimar: Tagungsbericht. – Weimar: FIB, Bauhaus–Universität Weimar, 2014. – 496 pp.
17. 3 Weimarer Gipstagung, 14–15 März 2017, Weimar: Tagungsbericht. – Weimar: FIB, Bauhaus–Universität Weimar, 2017. – 358 pp.
18. M. Müller, H.-B. Fischer Zur mechanischen Aktivierung von Calciumsulfatdihydrat 16. Ibausil, 2006. 1: p. 0817-0827
19. Плуґін А.А. Основи наукових досліджень / А.А.Плуґін, О.А.Калінін, О.А.Плуґін; за ред. А.М.Плуґіна. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – 378 с.
20. J. Stark, B. Möser, F. Bellmann and C. Rößler, Quantitative Charakterisierung der Zementhydratation. 16. Ibausil, 2006. 1: p. 0047-0066
21. Кондращенко Е.В. Математическая модель обжига гипса в турбулентном потоке газообразного теплоносителя / Кондращенко Е.В., Баранов А.Н., Бабушкин В.И. // Зб. наук. праць ВАТ «УкрНДІвогнетривів ім. А.С.Бережного». – 2002. – Вип.102. – С.110–115.
22. Кондращенко Е.В. Теоретические основы тепловой обработки гипсового вяжущего / Е.В.Кондращенко, А.А.Баранова, А.Н.Баранов // Коммунальное хозяйство городов. – 2007. – №76. – С.132–138.
23. Иващенко Т.Г. Влияние различных факторов на прочность фосфогипсовых образцов / Т.Г.Иващенко, В.Н.Филин, В.И.Винниченко, В.В.Котляренко, Д.В.Лисин, Ю.Н.Жегусь // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – №22. – С.176–180.
24. Винниченко В.И. Газогипсобетон на основе фосфогипса / В.И.Винниченко, И.Э.Казимагомедов, Т.А.Костюк, И.П.Крайнов // Екологічна безпека. – 2/2008(2). – С.113–115.
25. Булычев, Г. Г. Смешанные гипсы. Производство и применение / Г. Г. Булычев. – Москва: АСВ, 1992. – 132 с.

26. Sanytsky M., Fischer H.-B., Korolko S. Modified composite gypsum binders based on phosphogypsum // 16 Internationale Baustofftagung. - Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2006. - Band 1. - P.875-882.

27. Белов, В.В. Современные эффективные гипсовые вяжущие, материалы и изделия / В.В. Белов, А.Ф. Бурьянов, В.Б. Петропавловская // Тверь: ТГТУ, 2007. – 132 с.

28. Дворкін, Л.Й. Модифіковані гіпсові і сульфатно-шлакові в'язучі та матеріали на їх основі / Л.Й.Дворкін, О.Л.Дворкін, А.В.Мироненко, Т.О.Поліщук-Герасимчук, М.Г.Кундос. - Рівне: НУВГП, 2011. – 188 с.

29. Plugin A.A. Increase of gypsum water resistance by mineral additives / A.A.Plugin, O.A.Plugin, H.-B.Fisher, G.N.Shabanova // 1 Weimarer Gipstagung, 30–31 März 2011, Weimar: Tagungsbericht. – Weimar: FIB, Bauhaus–Universität Weimar, 2011. – N P21. – P.435–443.

30. Плугин А.А. Повышение водостойкости строительного гипса минеральными добавками / А.А.Плугин, Ал.А.Плугин, Х.-Б.Фишер, Г.Н.Шабанова // Зб.наук.праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип.122. – С.227–236.

31. Wansom, S., Chintasongkro, P., & Srijampan, W. (2019). Water resistant blended cements containing flue-gas desulfurization gypsum, Portland cement and fly ash for structural applications. *Cement and Concrete Composites*, 103, 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.033>

32. Zavadskaya, L. V., & Berdov, G. I. (2016). Change of Structure and Strength of Gypsum at Adding Disperse Mineral Additives. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 1, 86–93. <http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.12.2306>

33. Sun, H., Qian, J., Yang, Y., Fan, C., & Yue, Y. (2020). Optimization of gypsum and slag contents in blended cement containing slag. *Cement and Concrete Composites*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103674>

34. Egorova, A. D., & Filippova, K. E. (2019). Ultra-disperse modifying zeolite-

based additive for gypsum concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 687, 022030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/2/022030>

35. Pervyshin, G. N., Yakovlev, G. I., Gordina, A. F., Keriene, J., Polyanskikh, I. S., Fischer, H.-B., Buryanov, A. F. (2017). Water-resistant Gypsum Compositions with Man-made Modifiers. *Procedia Engineering*, 172, 867–874. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.087>

36. Yakovlev, G., Polyanskikh, I., Fedorova, G., Gordina, A., & Buryanov, A. (2015). Anhydrite and gypsum compositions modified with ultrafine man-made admixtures. *Procedia Engineering*, 108, 13–21. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.195>

37. Sanytsky, M., Kropyvnytska, T., Fischer, H. B., & Kondratieva, N. (2019). Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance. *Chemistry and Chemical Technology*, 13(4), 495–502. <https://doi.org/10.23939/chcht13.04.495>

38. Kondratieva, N., Barre, M., Goutenoire, F., & Sanytsky, M. (2017). Study of modified gypsum binder. *Construction and Building Materials*, 149, 535–542. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.140>

39. Kondratieva, N., Barre, M., Goutenoire, F., Sanytsky, M., & Rousseau, A. (2020). Effect of additives SiC on the hydration and the crystallization processes of gypsum. *Construction and Building Materials*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117479>

40. Suárez, F., Felipe-Sesé, L., Díaz, F. A., Gálvez, J. C., & Alberti, M. G. (2020). On the fracture behaviour of fibre-reinforced gypsum using micro and macro polymer fibres. *Construction and Building Materials*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118347>

41. Плу́гин А.Н. Механизм структурообразования и дегидратации гипсовых вяжущих / А.Н.Плу́гин, Х.-Б.Фишер, А.А.Плу́гин, К.А.Рапина // Зб.наук.працьУкрДАЗТ.- Харків: УкрДАЗТ, 2010.- Вип.115.- С.5-22.

42. Плу́гин А.А. Повышение водостойкости гипса добавками микронаполнителей // А.А.Плу́гин, С.В.Воронин, О.С.Борзяк, А.С.Ефименко //

Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА; ХОТВ АБУ, 2016. – №2(84). – С.239–242.

43. Plugin, A.N. The gypsum's structure and strength. The development of the concept about the structure / A.N.Plugin, A.A.Plugin, Yu.G.Gasan, Yu.A.Sukhanova // 2 Weimarer Gipstagung, 26–27 März 2014, Weimar: Tagungsbericht. – Weimar: FIB, Bauhaus–Universität Weimar, 2014. – N P59. – P.417–426.

44. Plugin, A.N. Structure and strength of gypsum: Mechanism of strength and water resistance / A.N.Plugin, A.A.Plugin, Yu.G.Gasan, H.-B.Fisher, O.A.Plugin // 2 Weimarer Gipstagung, 26–27 März 2014, Weimar, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht. – Weimar: FIB, Bauhaus–Universität Weimar, 2014. – N P60. – P.427–438.

45. Структура и прочность гипсового камня: развитие представлений о структуре / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, Ю.Г.Гасан, Е.Н.Червенко // 36. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип.138. – С.125–136.

46. Untersuchungen zur hygromechanischen Stabilität von kristallinem Calciumsulfat-Halbhydrat / H. U. Hummel, B. Abdussaljamov, H. B. Fischer, J. Stark. – ZKG International, 2001. – 465 s.

47. Cherpurna, S., Borziak, O., & Zubenko, S. (2019). Concretes, modified by the addition of high-diffused chalk, for small architectural forms. *Materials Science Forum*, 968, 82–88. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.82>

48. Ivashchyshyn, H., Sanytsky, M., Kropyvnytska, T., & Rusyn, B. (2019). Study of low-emission multicomponent cements with a high content of supplementary cementitious materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(6–100), 39–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175472>

49. Krivenko, P. V., Petropavlovskiy, O., Rudenko, I., & Konstantynovskiy, O. P. (2019). The Influence of Complex Additive on Strength and Proper Deformations of Alkali-Activated Slag Cements. *Materials Science Forum*, 968, 13–19. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.13>

50. Danchenko, Y., Andronov, V., Sopov, V., Khmyrov, I., & Khrypynskyy, A.

(2018). Acid-basic surface properties of clay disperse fillers. *MATEC Web of Conferences*, 230, 03004. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823003004>

51. Plugin, A.A., Pluhin, O.A., Borziak, O.S., & Kaliuzhna, O.V. (2020). The Mechanism of a Penetrative Action for Portland Cement-Based Waterproofing Compositions. In: Blikharsky Z., Koszelnik P., Mesaros P. (eds) *Proceedings of CEE 2019. CEE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 47. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_5)

52. Sopov, V., Pershina, L., Butskaya, L., Latorets, E., & Makarenko, O. (2017). The role of chemical admixtures in the formation of the structure of cement stone. *MATEC Web of Conferences*, 116, 01018. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711601018>

53. Lushnikova, N., & Dvorkin, L. (2016) 25 Sustainability of gypsum products as a construction material. In *Sustainability of Construction Materials* (2nd edn.), 643–681. Woodhead Publ. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00025-1>

54. Petropavlovskaya, V., Buryanov, A., Novichenkova, T., & Petropavlovskii, K. (2018). Gypsum composites reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 365, 3. Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032060>

55. Buryanov, A., Petropavlovskaya, V., & Novichenkova, T. (2014). Structuring in systems on the basis of calcium sulfate dihydrate. *Applied Mechanics and Materials*, 467, 91–96. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.467.91>

56. Fischer, H.-B., & Vtorov, B. (2002). Zur charakterisierung historischer gipsmörtel. *ZKG International*, 55(5), 92–99.

57. Маева И.С., Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Бурьянов А.Ф., Пустовгар А.П. Структурирование ангидритовой матрицы нанодисперсными модифицирующими добавками // Строительные материалы. – 2009. – № 6. – С.4–5.

58. Яковлев Г.И. Модификация ангидритовых композиций многослойными углеродными нанотрубками / Г.И.Яковлев, Г.Н.Первушин, И.С.Маева,



А.Корженко, А.Ф.Бурьянов, Р.Мачюлайтис // Строительные материалы. – 2010. – №7. – С.25–27.

59. Гордина А.Ф., Токарев Ю.В., Яковлев Г.И., Керене Я., Спудулис Э. Различия в формировании структуры гипсового вяжущего, модифицированного углеродными нанотрубками и известью // Строительные материалы. – 2012. – №2. – С.34–37.

60. Строкова В.В. Особенности фазообразования в композиционном наноструктурированном гипсовом вяжущем / В.В.Строкова, А.В.Череватова, И.В.Жерновский, Е.В.Войтович // Строительные материалы. – 2012. – №7. – С.9–11.

61. Еремин А.В., Пустовгар А.П. Современные подходы к рентгенофазовому анализу гипсовых вяжущих // Строительные материалы. – 2012. – №7. – С. 62–63.

62. Деревянко В.Н. Влияние наночастиц на процессы гидратации полуводного гипса / В.Н.Деревянко, А.Г.Чумак, В.Е.Ваганов // Строительные материалы. – 2014. – №7. – С.22–24.

63. Изряднова О.В.Изменение морфологии кристаллогидратов при введении ультра- и нанодисперсных модификаторов структуры в гипсоцементно-пуццолановые вяжущие / О.В.Изряднова, Г.И.Яковлев, И.С.Полянских, Х.-Б.Фишер, С.А.Сеньков // Строительные материалы. – 2016. – №1. – С.25–27.

64. Гордина А.Ф. Гипсовые композиции с комплексными модификаторами структуры / А.Ф.Гордина, Г.И.Яковлев, И.С.Полянских, Я.Керене, Х.-Б.Фишер, Н.Р.Рахимова, А.Ф.Бурьянов // Строительные материалы. – 2016. – №1. – С. 90–94.

65. Керш Д.В. Гіпсові композиції з зольними мікросферами : Автореф. дис... к.т.н.: 05.23.05 / ОДАБА. – Одеса, 2015. – 20 с.

66. Брутанс З. Изучение магнитного влияния на процессы гидратации // Тр. VI Междунар. Конгр. по химии цемента. – Москва: Стройиздат, 1976. – Т.II. – Кн.2. – С.100–105.

67. Соболев Х.С. Особенности использования сповільнювачів тужавіння під час виробництва гіпсових сухих сумішей / Х.С.Соболев, В.С.Терлига, О.С.Хіта // Вісн. НУ «ЛП». – 2009. – №655. – С. 262–265.
68. Ферронская А.В. Долговечность гипсовых материалов, изделий и конструкций. – Москва: Стройиздат, 1984. – 242 с.
69. Ферронская А.В. Эффективные гипсовые материалы и изделия / А.В.Ферронская, И.М.Баранов, В.Ф.Коровяков // Строительные материалы. – 1998. – №8/98. – С.20–22.
70. Брюкнер Х. Гипс: Изготовление и применение гипсовых строительных материалов / Х.Брюкнер, Е.Дейлер, Г.Фитч. – Москва: Стройиздат, 1981. – 223 с.
71. Рунова Р.Ф. Основи виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів / Р.Ф.Рунова, В.І.Гоц, О.Г.Гелевера, О.П.Константиновський, Ю.Л.Носовський, В.В.Піпа. – Київ: Основа, 2017. – 528 с.
72. Дворкин Л.Й. Эффективные гипсовые материалы / Л.Й.Дворкин, О.М.Гавриш, О.В.Безусьяк, А.В.Мироненко, Т.О.Поліщук-Герасимчук, І.В.Ковалик; за ред. Л.Й.Дворкіна. – Київ: Павленко, 2013. – 239 с.
73. The Gypsum Construction Handbook, 7th Edition. – Wiley, 2014. – 576 p.
74. Manjit Singh. Gypsum & Gypsum Products. Their Science and Technology. – Manakin Press, 2015. – 352 p.
75. Голов К.С. Рентгенозахисні властивості гіпсового в'язучого з рідкоземельним наповнювачем / К. С. Голов, Ю. В. Мисовець // Вісник ПДАБА. – 2009. – № 5. – С.46–51.
76. Меркин А.П. Облегченный пеногипс – основа для отделочных звукопоглощающих изделий / А.П.Меркин, Б.М.Румянцев, Т.Е.Кобидзе // Строительные материалы. – 1979. – №6. – С.16–17.
77. Панов В.П. Газогипс и его свойства // Строительные материалы. – 1985. – №5. – С.25.
78. Бойко Б.И. Порогипс на основе кислотных отходов производства / Б.И.Бойко, Л.И.Бабкин, А.Н.Некакшонов // Строительные материалы. – 1986. – №5. – С.22–23

79. Меркин А.П. Технология заливочного пеногипса /А.П.Меркин, Т.Е.Кобидзе, А.П.Никитин, Е.А.Зудяев // Сельское строительство. – 1988. – №12. – С.21.
80. Садуакасов М.С. Влияние  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  на структурообразование и прочность пеногипса // Строительные материалы. – 1990. – №1. – С.22–23.
81. Меркин А.П. Пеногипс на основе фосфогипса / А.П.Меркин, А.С.Багдасаров, Б.А.Артомасов, О.В.Устименко // Строительные материалы. – 1995. – №4. – С.13–14.
82. Румянцев Б.М. О научных основах поризации гипсовых систем / Сб.докл. – Москва: НИИСФ, 2002. – С.15–17.
83. Румянцев Б.М. Производство и применение пеногипсовых материалов / Б.М.Румянцев, Д.С.Критарасов / Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века. – 2004. – №9. – С.74–75.
84. Бессонов И.В. Теплоизоляция из пеногипса // Научн.тр.П Всерос. (Междунар.) конфер.»Бетон и железобетон – пути развития». Т.4. Легкие и ячеистые бетоны. – Москва, 2005. – С.29–35.
85. Skujans J., Vulans A., Iljins U., Aboltins A., 2007. Measurement of Heat Transfer of Multilayered Wall Construction with Foam Gypsum, Applied Thermal Engineering. – 2007. – Vol.27. – Issue 7. – pp.1219–1224.
86. Багдасаров А.С. Пеногипсовые изделия на основе местных вяжущих / А.С.Багдасаров, А.И.Нестеренко, А.Ю.Пупкова // Вестник ДагГТУ. Технические науки. – 2018. – №45(4). – С.153-161. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-153-161>.
87. Садуакасов М.С. Теоретические основы повышения прочности структуры гипсового камня на основе пластифицированного вяжущего / М.С.Садуакасов, Б.М.Румянцев // Строительные материалы. – 1993 . – №3. – С.19–22.
88. Дворкін Л.Й. Вплив кратності піни на густину та міцність піногіпсу / Л.Й.Дворкін, О.В.Безусяк, І.В.Ковалик // Вісник ОДАБА. – 2009. – Вип.33. – С.186–192.

89. Ковалик І.В. Вплив тонкості помелу гіпсового в'язучого на властивості піногіпсу // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2011. – Вип.22. – С.85–92.

90. Дворкін Л.Й. Розрахунок міцності штучного гіпсового каменю / Л.Й.Дворкін, О.В.Безуськ, І.В.Ковалик // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. – 2009. – Вип.34. – С.361–367.

91. Dvorkin L.J. The effect of foam multiplication factor on density and strength of foamgypsum / L.J.Dvorkin, O.V.Bezusyak, I.V.Kovalyk // “Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami-2009”, T.9. Techniczne nauki. Budownictwo I architektura. – Nauka I studia, 2009. – S.82–87.

92. Дворкін Л.Й. Розрахунок міцності піногіпсу / Л.Й.Дворкін, О.В.Безуськ, І.В.Ковалик // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2009. – Вип.32. – С.25–29.

93. Дворкін Л.Й. Розрахунок міцності пористого будівельного матеріалу на прикладі піногіпсу / Л.Й.Дворкін, О.В.Безуськ, І.В.Ковалик // Вісник ОДАБА. – 2010. – Вип.38. – С.195–201.

94. Дворкін Л.Й. Розрахунок міцності піногіпсу на основі структурно-фізичної моделі / Л.Й.Дворкін, О.В.Безуськ, І.В.Ковалик // Вісник НУВГП. – 2010. – Вип.1(49). – С.136–143.

95. Дворкін Л.Й. Дослідження якісних показників піногіпсу та проектування його складу / Л.Й.Дворкін, О.В.Безуськ, І.В.Ковалик // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2011. – №39. – С.153–159.

96. Дворкін Л.Й. Проектування складу піногіпсу за його заданими показниками / Л.Й.Дворкін, О.В.Безуськ, І.В.Ковалик // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2011. – №40. – С.63–68.

97. Дворкин Л.И. Проектирование состава пеногипса / Л.И.Дворкин, А.В.Безуськ, И.В.Ковалык // Строительные материалы. – 2011. – №6. – С.10–12.

98. Дворкин Л.И. Расчетно-экспериментальный метод проектирования состава пенгогипса / / Л.И.Дворкин, А.В.Безуськ, И.В.Ковалык // Популярное бетоноведение. – 2011. – №3/4(39). – С.53–59.

99. Ушеров-Маршак А.В. Микроструктура цементного камня / А.В.Ушеров-Маршак, В.П.Сопов // Коллоидный журнал. – 1997. – Т.59. – №6. – С.846–850.

100. Ольгинский А.Г., Чернявский В.Л. Влияние среды на адаптацию зоны контакта заполнителей с с цементным камнем в бетоне / А.Г.Ольгинский, В.Л.Чернявский // Бетон и железобетон. – 2020. – №4(505). – С.5–8.

101. Сычев М.М. Каталитический характер процессов гидратации цементов // Цемент. –1990. -№ 1. -С.18-19.

102. Дворкин Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Л.И.Дворкин, В.И.Соломатов, В.Н.Выровой, В.А.Чудновский; под ред. Л.И.Дворкина. – Київ: Будівельник, 1991. –136 с.

103. Соломатов В.И., Выровой В.Н. Кластерообразование композиционных строительных материалов // Технол. механика бетона. – Рига: РПИ. –1985. – С.5–21.

104. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н., Химмлер К.Г. Полиструктурные композиционные материалы в строительстве. – Москва: Стройиздат, 1988. – 312 с.

105. Ольгинский А.Г., Регми Говинда, Прадхан Набин. Пылеватые минеральные добавки к цементным бетонам // Строительные материалы и конструкции. – 1990. – № 3. – С.18.

106. Шпирько Н.В. Исследование влияния электромагнитной активации концентрированной цементной суспензии на свойства цементного камня и бетона / Н.В.Шпирько, Т.Н.Дубов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2020. – 2 (263-264). – С.102–107.

107. Шпирько Н.В. Строительные материалы с использованием отходов углеобогащения / Н.В. Шпирько, СВ Бондаренко // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – 2017. – Вип.99. – С.213–217

108. Tolmachov S., Belichenko O. Physico-chemical investigation of water suspension microfillers. Springer Nature Switzerland AG 2021. // Z. Blikharskyu (Ed.): Proceedings of EcoComfort 2020, LNCE 100, P.466–473.

109. Беліченко О.А., Толмачов С.М. Дослідження фізико-хімічних властивостей водних суспензій мікронаповнювачів з суперпластифікаторами / О.А.Беліченко, С.М.Толмачов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2020. – Вип.38. – С.66–77.

110. Рунова Р.Ф. Физико-химические и технологические основы контактно-конденсационных вяжущих // Цемент. –1990. -№5. –С.12-14.

111. Ланкин Я.И., Конторович С.И., Амелина Е.А., Щукин Е.Д. Экспериментальное исследование формирования контактов срастания между частичками кремнезема в пересыщенных растворах кремневой кислоты // Коллоидный журнал. –1980. -т.42. –вып.4 -С.649-652.

112. Щукин Е.Д., Конторович С.И., Амелина Е.А. Физико-химические закономерности структурообразования в дисперсных системах как научная основа повышения прочности и долговечности материалов // Журн.ВХО им. Д.И.Менделеева.- 1989.- Т.34.-№2.- С.167-174.

113. Плугин, А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: Монография в 3-х тт. Т.1. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, Л.В.Трикоз, А.С.Кагановский, Ал.А.Плугин; Под ред.А.Н.Плугина. – К.: Наук. думка, 2011. – 331 с.

114. Плугин, А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: Монография в 3-х тт. Т.2. Теория твердения портландцемента / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Д.А.Плугин, А.С.Кагановский, Ал.А.Плугин, О.В.Градобоев; Под ред. А.Н.Плугина. – К.: Наук. думка, 2012. – 224 с.

115. Плугин, А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: Монография в 3-х тт. Т.3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Д.А.Плугин, А.С.Кагановский, Ал.А.Плугин, О.В.Градобоев, О.С.Борзяк; Под ред. А.Н.Плугина. – К.: Наук. думка, 2012. – 288 с.

116. Влияние активных поверхностных центров на прочность свежесформованных мелкозернистых бетонов / В.И.Бабушкин, А.А.Плугин, Т.А.Костюк, В.А.Матвиенко // Науковий вісник будівництва.- Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 1999.- Вип.5.- С.85-88.

117. Плугін, А.А. Гідроізоляційні цементні композити проникної дії / А.А.Плугін, Т.О.Костюк, О.Ю.Прошин, Д.О.Бондаренко, О.А.Плугін, О.С.Борзяк, В.А.Арутюнов. – Харків: Колегіум, 2018. – 268 с.

118. Плугін А.А. Підвищення міцності та водостійкості гіпсових в'язучих нанодисперстними мінеральними добавками // А.А. Плугін, Х.-Б. Фішер, О.С. Борзяк, А.С. Єфіменко, А.А. Жигло / Зб. наук. праць УкрДУЗТ. – Харків, 2017. – Вип.171. – С. 37-43.

119. Плугин А.А. Совершенствование состава и структуры бетона с учетом электроповерхностных свойств его составляющих для повышения прочности и стойкости изделий кольцевого сечения: Дисс... канд. техн. наук: 05.23.05. – Защ.14.06.1994. – Харьков: ХИСИ, 1994. – 245 с.

120. ДСТУ Б В.2.7-82:2010 Будівельні матеріали. В'язучі гіпсові. Технічні умови / ДП «НДІБМВ». – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 29 с.

121. ДСТУ Б В.2.7-302:2014 Шлак доменний гранульований для цементів, бетонів і будівельних розчинів. Технічні умови та оцінка відповідності (EN 15167-1:2006, NEQ)

122. ДСТУ EN 13263-1:2019 Мікрокремнезем для бетону. Частина 1. Визначення, вимоги та критерії відповідності (EN 13263-1:2005 + A1:2009, IDT)

123. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови (EN 934-2:2001, NEQ)

124. ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості

125. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов / Под ред. О.П.Мчедлова-Петросяна. – Москва: Стройиздат, 1986. – 408 с.

126. Бабушкин В.И., Новикова С.П. О роли коллоидно-химических явлений в объемных изменениях цементного камня и бетона // Тр. ВНИИВОДГЕО.- М.: 1973.- С.133-144.

127. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. – Москва: КДУ, 2007. – 721 с.

128. Сульфаты неорганические // Химический энциклопедический словарь / Под ред. И.Л.Кнунянца. – Москва: Советская энциклопедия, 1983. – 792 с.

129. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. – Москва: Стройиздат, 1989. - 188 с.

130. Червенко Є.М. Модифікована композиційна гіпсовміщуюча в'язуча речовина та розчини на її основі // Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка. – 2012. – Вип. 44. – С. 143–153.

131. Заява на видачу патенту на винахід № а202008431 Гіпсове в'язуче підвищеної водостійкості / Пługін А.А., Єфіменко А.С., Геворкян Е.С., Борзяк О.С., Панченко С.В., Ватуля Г.Л., Пługін О.А., Суханова Ю.А., Калюжна О.В., Крикун О.П. – Заявлено 29.12.2020.

132. Заява на видачу патенту на корисну модель № u202008433 Гіпсове в'язуче підвищеної водостійкості / Пługін А.А., Єфіменко А.С., Геворкян Е.С., Борзяк О.С., Панченко С.В., Ватуля Г.Л., Пługін О.А., Суханова Ю.А., Калюжна О.В., Крикун О.П. – Заявлено 29.12.2020.

133. Заява на видачу патенту на корисну модель № u202008436 Гіпсове в'язуче підвищеної водостійкості / Пługін А.А., Єфіменко А.С., Геворкян Е.С., Борзяк О.С., Панченко С.В., Ватуля Г.Л., Пługін О.А., Суханова Ю.А., Калюжна О.В., Крикун О.П. – Заявлено 29.12.2020.

134. Емельянова И.А. Современные строительные смеси и оборудование для их приготовления / И.А.Емельянова, О.В.Доброходова, А.И.Анищенко. – Харьков: Тимченко, 2010. –146 с.