



Шишко Н. С.



Корх О. І.



Сопов В. П.

**Шишко Н. С.**, аспірант кафедри фізико-хімічної механіки та технології будівельних матеріалів і виробів, Харківський національний університет будівництва та архітектури, ☎ +38 (093) 902 18 64, ✉ nshyshko425@gmail.com

**Корх О. І.**, інженер кафедри фізико-хімічної механіки та технології будівельних матеріалів і виробів, Харківський національний університет будівництва та архітектури, ☎ +38 (093) 974 46 59, ✉ sashkacream0@gmail.com

**Сопов В. П.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізико-хімічної механіки та технології будівельних матеріалів і виробів, Харківський національний університет будівництва та архітектури, ☎ +38 (093) 415 23 15, ✉ vpsopov@gmail.com

**N. Shishko**, post-graduate student of the Department of Physical-Chemical Mechanics and Technology of Building Materials and Products, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, ☎ + 38 (093) 902 18 64, ✉ nshyshko425@gmail.com

**O. Korh**, engineer of the Department of Physical-Chemical Mechanics and Technology of Building Materials and Products, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, ☎ + 38 (093) 974 46 59, ✉ sashkacream0@gmail.com

**V. Sopov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Physical-Chemical Mechanics and Technology of Building Materials and Products, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, ☎ + 38 (093) 415 23 15, ✉ vpsopov@gmail.com

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЩІЛЬНОЇ УПАКОВКИ КОМПОНЕНТІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СКЛАДУ БЕТОНУ

### APPLICATION OF THE DENSE PACKING OF COMPONENTS IN THE DESIGN OF CONCRETE COMPOSITION

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЛОТНОЙ УПАКОВКИ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СОСТАВА БЕТОНА

**Анотація.** Один із способів проектування складу високоміцного бетону ґрунтується на застосуванні методу щільної упаковки вихідних компонентів. Для оцінки впливу окремих складових на властивості бетонних сумішей і бетонів було розроблено склади з послідовною зміною кількості компонентів. В якості мінеральних доба-вок застосовувались пірогенний мікрокремнезем «Аеросил» та мікрокремнезем аморфної модифікації. Ефективність даного методу було оцінено дослідженнями властивостей отриманих бетонів за допомогою стандартних методів випробування (міцність на стиск) та електронно-мікроскопічних досліджень.

**Ключові слова:** склад бетону, щільна упаковка, компоненти бетону, міцність на стиск, електронна мікроскопія.

**Аннотация.** Один из способов проектирования состава высокопрочного бетона основывается на применении метода плотной упаковки исходных компонентов. Для оценки влияния отдельных составляющих на свойства бетонных смесей и бетонов был разработан склади с последовательной сменой количества компонентов. В качестве минеральных добавок применялись пирогенное микрокремнезем «Аэросил» и микрокремнезем аморфной модификации. Эффективность данного метода была оценена исследованиями свойств полученных бетонов с помощью стандартных методов испытания (прочность на сжатие) и электронно-микроскопических исследований.

**Ключевые слова:** состав бетона, плотная упаковка, компоненты бетона, прочность на сжатие, электронная микроскопия.

**Abstract.** One of the methods of designing a high-strength concrete structure is based on the application of the dense packing method of the original components. To evaluate the influence of individual components on the properties of concrete mixtures and concretes, the compositions with a consistent change in the number of components were developed. As mineral additives, pyrogenic microsilica Aerosil and microsilica of amorphous modification were used. The effectiveness of this method was estimated by studying the properties of the resulting concrete using standard test methods (compressive strength) and electron microscopy.

**Key words:** concrete composition, dense packing, concrete components, compressive strength, electronic microscopy.

#### Актуальність

При підборі складу високоміцного бетону використовують полідисперсні частки різних фракцій від 1 нм до декількох мм. Відомо, що характер укладання частинок на початковому етапі дійсно впливає на формування властивостей бетону [1-3]. Загальною вимогою для виготовлення такого виду бетону є оптимізація гранулометричного складу компонентів бетонної суміші з метою забезпечення найбільш щільної упаковки. Удосконалена упаковка частинок бетонної матриці зменшить пористість і проникність бетону і тим самим поліпшить довговічність бетону.

Відомо, що дисперсність частинок визначає розмір пор цементного каменю, що формуються, регулюючи їх зв'язність, і, отже, проникність. Однак, розміри пор, що утворилися в результаті надлишку дрібнодисперсних частинок заповнювача (наприклад, велика кількість діоксиду кремнію по відношенню до цементу), можуть домінувати в загальній проникності цементного каменю, але ж не є результатом щільної упаковки частинок. Для оптимізації упаковки частинок необхідно мати їх розпо-

діл за розмірами в більш широкому діапазоні розмірів. У цьому відношенні бетон є найбільш прийнятним об'єктом, оскільки він складається з частинок з розмірами від декількох нм до декількох см.

Формування мікроструктури цементного каменю обумовлено не тільки характером упаковки вихідних частинок компонентів бетону, але ж і взаємодією між ними, яке призводить до зміни їх розподілу у просторі. У більшості випадків взаємодія компонентів (частинки цементу, золи виносу та ін.) супроводжується зростанням об'єму продуктів реакції та, як наслідок, зниженням проникності бетону. Навіть частинки, які багато хто вважає інертними (наприклад, вапняковий порошок), будуть реагувати, коли є необхідні реагенти (наприклад, гідрати оксиду алюмінію при пуцоланової реакції золи виносу) і теоретично вносять позитивний вклад в зниження проникності.

Для більш повного розуміння механізму взаємодії компонентів у високоміцному бетоні, впливу хімічних і мінеральних добавок на ущільнення його структури доцільно провести відповідні експериментальні дослідження.

### Матеріали і методи дослідження

Для отримання високоміцних бетонів було розроблено склади бетонів з послідовною зміною кількості компонентів для урахування впливу окремих компонентів на властивості бетонних сумішей і бетонів (табл. 1).

В якості мінеральних добавок застосовувались пірогенний мікрокремнезем Аеросил та мікрокремнезем аморфної модифікації. Як хімічна добавка, була прийнята добавка «MasterGlenium ACE». Дозування суперпластифікатора (в рухливих сумішах) приймалося в кожному складі для забезпечення марки рухомості приблизно Р4. Також були розроблені склади жорстких сумішей.

При проектуванні складів високоміцного бетону важливим є визначення ефективної кількості хімічних і мінеральних добавок. Для цього можна використати комп'ютерну модель структуроутворення цементного каменю, за допомогою якої може бути визначено об'єм капілярних пор, що дозволить визначити необхідну кількість дрібнодисперсних мінеральних добавок.

**Імітаційне моделювання мікроструктури цементного каменю.** Найбільш поширеними є імітаційні методи математичного комп'ютерного моделювання: метод аналітичних розрахунків, метод динаміки багатьох тіл [4, 5], методи кінцевих і дискретних елементів, метод моделювання гідродинаміки потоків, метод моделювання виробничих процесів [6]; інтегровані методи і підходи до вирішення оптимізаційних задач.

Незважаючи на велику кількість відомих методів моделювання упаковок сфер, доводиться стикатися з матеріалами, в структурі яких переважають частки складної форми (бетон). Упаковка частинок такої форми є ресурсомістким завданням. Вирішенням цієї проблеми може бути застосування наближення у вигляді сфероциліндру (капсулоподібний циліндр з двома напівсферичними торцями [7]).

В останні десятиліття все більшу популярність отримує імітаційно-статистичне моделювання структури цементного каменю і бетону [8, 9]. В основі цього підходу лежить уявлення про щільну упаковку, наслідком якої є характер формування міцних властивостей бетону. За таким методом була розроблена імітаційна модель гідратації цементу (рис. 1-2).

Наведений підхід структурно-імітаційного моделювання дає можливість в будь-який термін твердіння цементу оцінити мікроструктуру цементного каменю.

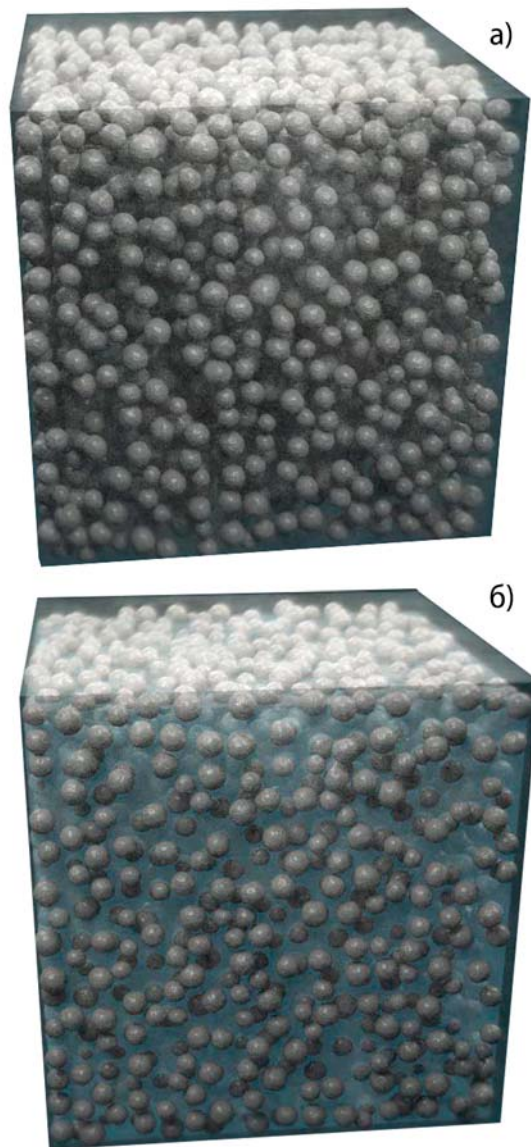


Рис. 1. Розподіл частинок цементу в об'ємі 150×150×150 мкм а) без води б) з водою

Таблиця 1.

### Склади бетонів, що досліджувались

№ складу	Витрата матеріалів, кг/м <sup>3</sup>						
	Цемент	Щебень		Пісок	Хімічна добавка	Мінеральна добавка	Вода
		Фр. 5-10	Фр. 10-20				
1	400	660	440	700	-	-	1400
2	400	660	440	700	0,6%	-	1100
3	380	660	440	700	0,7%	0,14	1100
4	366	660	440	700	0,7%	0,24	1100
5	400	540	800	550	-	-	870
6	400	540	800	550	0,9%	-	670
7	380	540	800	550	1,1%	0,14	670
8	367	540	800	550	1,5%	0,24	670
9	380	660	440	700	0,7%	0,14	1174
10	366	660	440	700	0,7%	0,24	1174
11	380	540	800	550	1,1%	0,14	693
12	367	540	800	550	1,5%	0,24	693

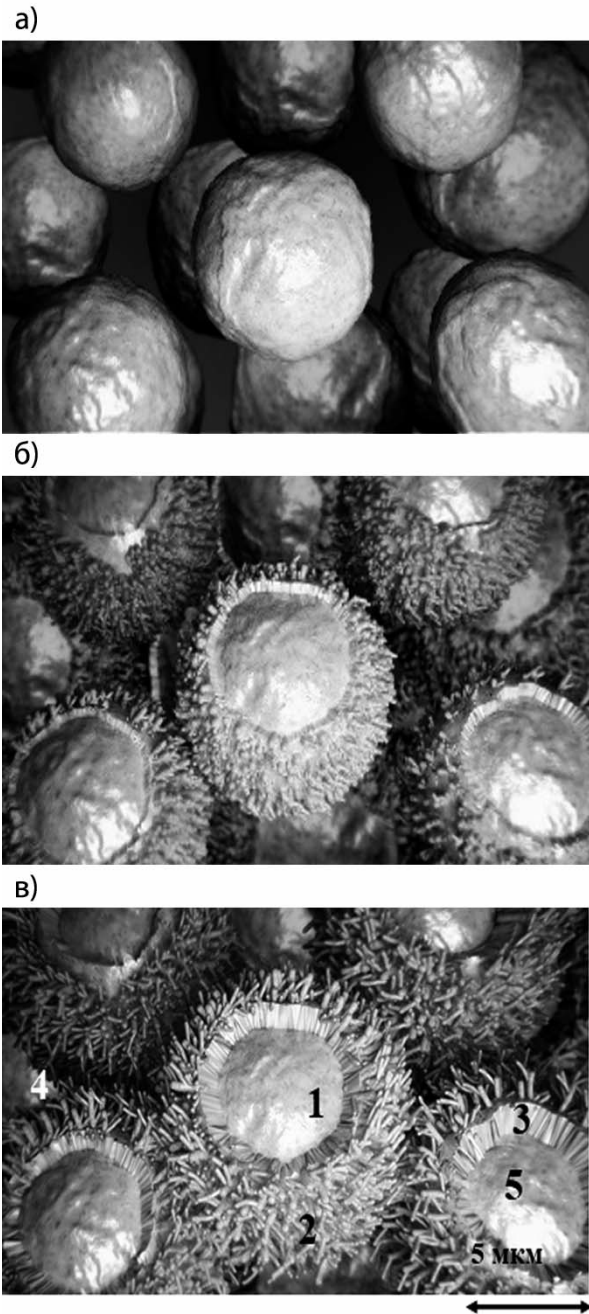


Рис. 2. Стадії гідратації цементних часток  
 а) початок гідратації б) через 8 годин твердіння  
 в) через 1 добу твердіння  
 1 – зерно цементу, яке ще не прореагувало; 2 – гідросилікати кальцію; 3 – гідроксид кальцію; 4 – капілярні пори

**Результати міцнісних іспитів бетонних зразків.**

На рис. 3-4 наведено результати іспитів бетонних зразків (куби 10×10×10 см) у віці 3, 7 і 28 діб.

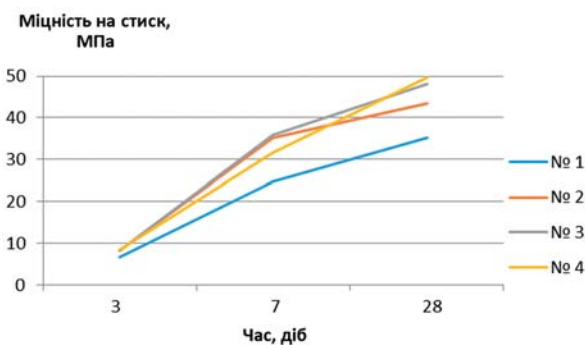


Рис. 3. Показники міцності рухливої суміші з добавкою Аеросил

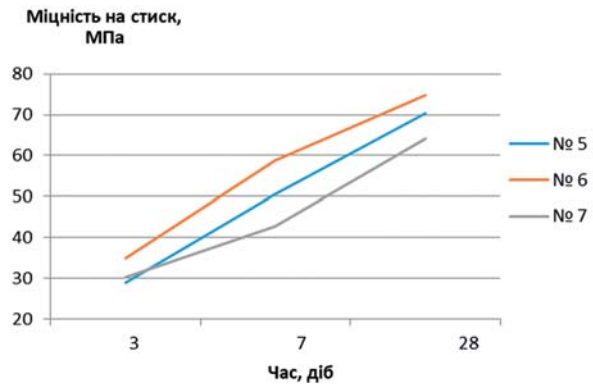


Рис. 4. Показники міцності жорсткої суміші з до-бавкою Аеросил

Як видно з рис. 3-4 введення добавки пластифікатору призводить до зростання міцності бетону відповідно на 3 добу на 28%, на 7 добу на 44,8%, на 28 добу на 23,7%.

При збільшенні кількості Аеросилу до 10% на початкових стадіях твердіння до 7 діб спостерігається зниження показників міцності бетону. Але ж у 28 діб значення міцності практично не змінюється у порівнянні зі зразком № 3. У порівнянні з контрольним зразком, міцність зразку з дозуванням Аеросилу 5% у віці 28 днів більша на 37,3 %, а з дозуванням Аеросилу 10% на 41,2%.

Показники міцності жорстких сумішей з добавкою Аеросил наведені на рис. 5. На рисунку ми бачимо, що зразок №8, у порівнянні з іншими зразками у серії, не набрав достатньої міцності за 28 діб. Зразки № 7 та № 8 було неможливо добре ущільнити, через використання Аеросилу з високою питомою поверхнею. Тому значення міцності цих зразків не можна сприймати як повністю достовірні.

Введення суперпластифікатору в жорстку суміш призводить до зростання міцності у віці 3 діб на 21,4%, 7 діб на 16,5% та 28 діб на 6,1%. Міцність зразку №7 у віці 3 доби зростає на 4, 9%, порівняно з контрольним зразком, а далі міцність знижується на 18,4% – 7 доба та на 10% – 28 доба.

На рис. 5 представлені результати випробувань зразків рухливої і жорсткої суміші з мікрокремнеземом аморфної модифікації. З графіків видно, що міцність жорстких сумішей значно більше, ніж рухливих. Міцність зразку № 11 у порівнянні зі зразком № 9 зростає у віці 3 діб на 86,9 %, у віці 7 діб на 65,9% та у віці 28 діб на 32,6%. Міцність зразку №12 значно зростає у порівнянні зі зразком № 10 у віці 3 діб на 147%, 7 діб на 109,2 % та 28 діб на 68,1%.

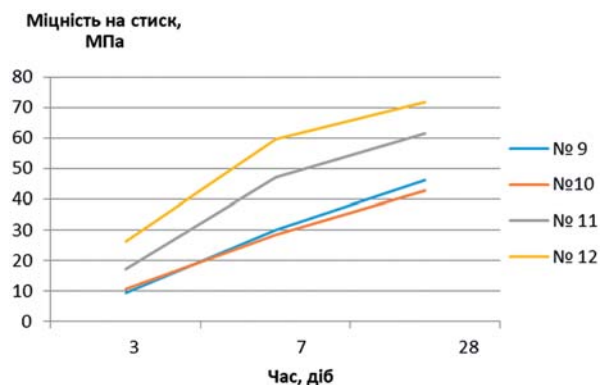


Рис. 5. Показники міцності рухливої та жорсткої суміші з мікрокремнеземом

Для розуміння і трактування результатів, які отримані при фізико-механічних випробуваннях, було проведено дослідження мікроструктури зразків бетону з модифікованими складами. Результати мікроскопічних досліджень на 28 добу твердіння наведено на рис. 7.

Присутність суперпластифікатора «MasterGlenium ACE» в бетонній суміші в поєднанні з мінеральною добавкою мікрокремнезому 6% Аеросил в розрахунку від маси портландцементу надалі зумовлює утворення більш щільної мікроструктури в'язкої матриці, ніж у контрольному зразку (рис. 6 а). Це досягається за рахунок зниження загальної кількості необхідної води замішування, що безпосередньо впливає на зниження капілярної пористості затверділого в'язучого. Відзначено менший ступінь дефектності структури, зростання нових типів кристалів голчастої і пластинчастої форми (рис. 6 а, б), контактна зона «цементний камінь-заповнювач» (рис. 6 б) більш щільна в порівнянні з мікрознімками бетону контрольного складу.

Більш наочно це спостерігається на знімках з більшою роздільною здатністю (рис. 7). Позначення відповідають рис. 6.

На контрольних зразках відзначена мікроструктура в'язучого (рис. 7), яка характеризується в основному аморфною структурою матриці, що складається з низькоосновних і високоосновних гідросилікатів кальцію. Структура при цьому не однорідна, є значна кількість дефектів, у яких проглядається дрібнокристалічний портландит (рис. 8 а, в, г), що утворюється після формування первісної структури твердофазного каркасу. На рис. 8 а, в також проглядаються дефекти будови контактної зони «цементний камінь – заповнювач», що простежується у вигляді утворення зазору між цементним каменем і заповнювачем.

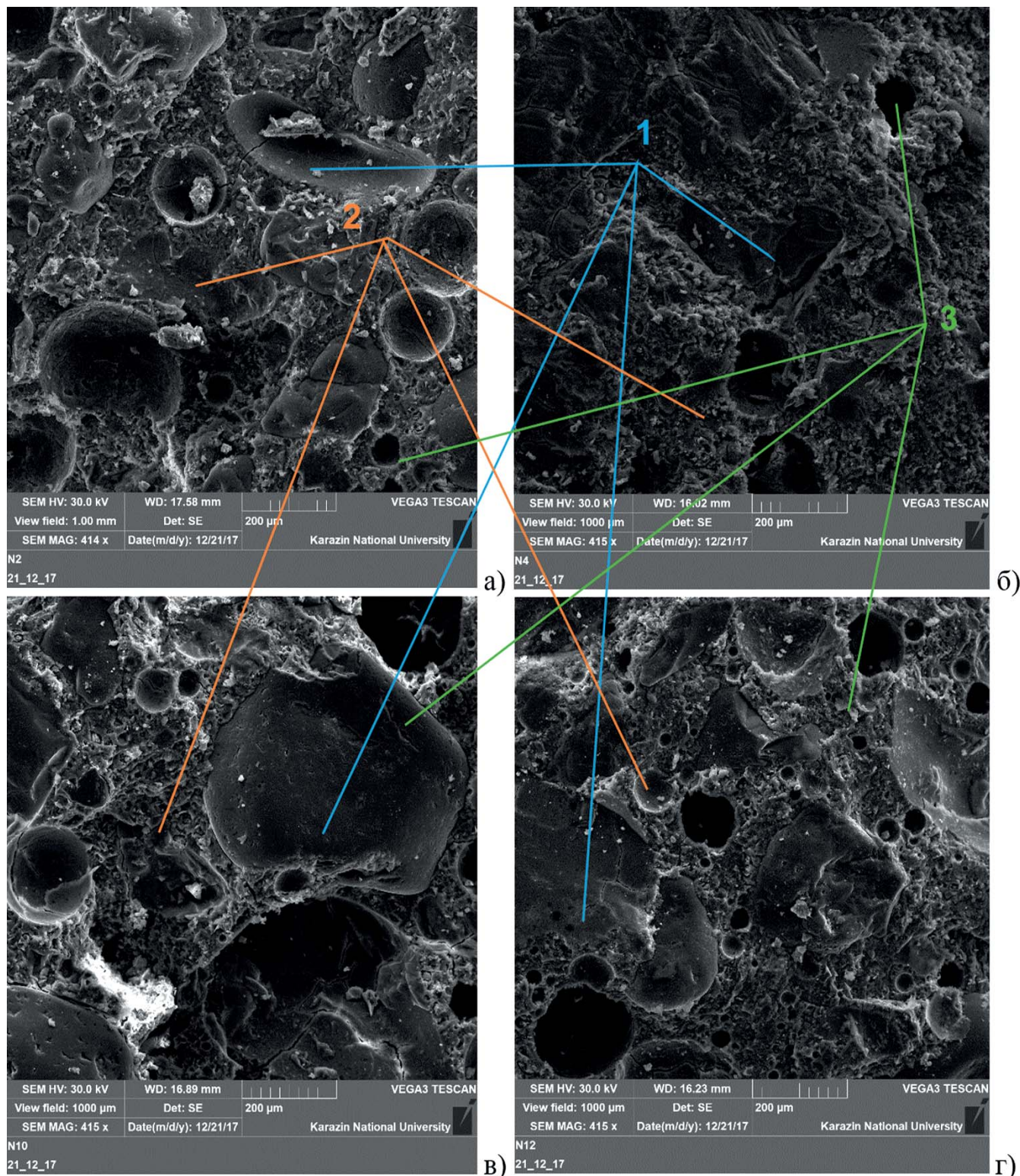


Рис. 6. Мікроскопія бетону у віці 28 діб (роздільна здатність 200 мкм)  
а) склад №2; б) склад №4; в) склад №10, г) склад №12  
1- заповнювачі; 2 – гідросилікати кальцію; 3 – пори

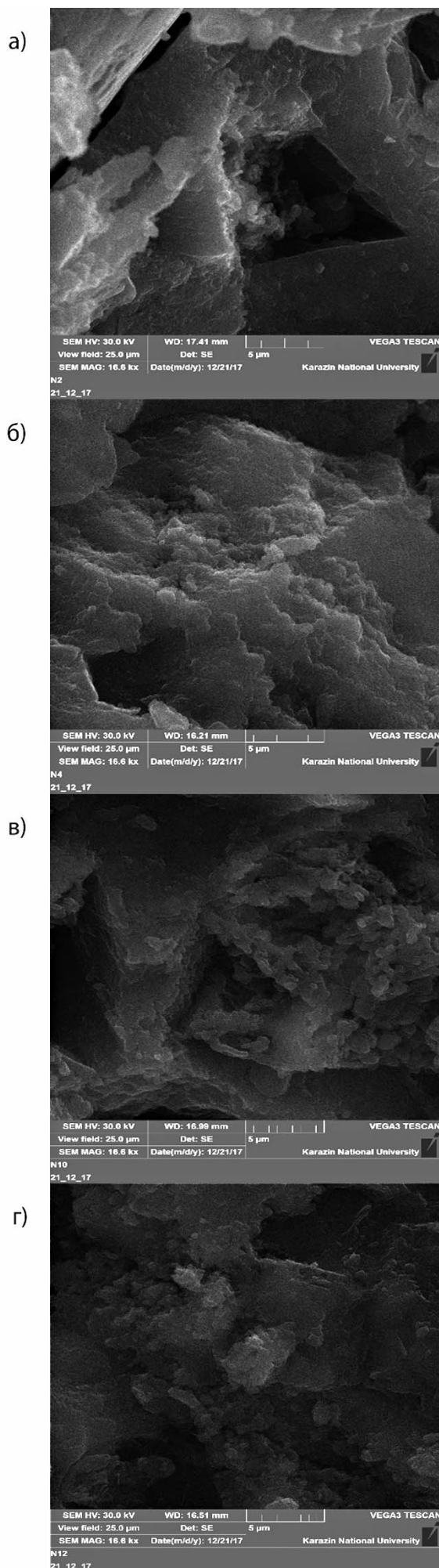


Рис. 7. Мікрознімки цементного каменю (роздільна здатність (5 мкм))

### Висновки

За результатами досліджень можна зробити наступні висновки:

- використання комбінації добавок, що включає суперпластифікатор і мікрокремнезем призводить до ущільнення кристалічної структури гідросилікатними новоутвореннями, також забезпечується щільний контакт між цементним каменем і заповнювачем. Формування такої структури призводить до суттєвого підвищення як міцності цементної матриці, так і міцності модифікованого бетону в цілому;
- застосування мікрокремнезема, за рахунок якого відбувається зв'язування більшої кількості іонів  $\text{Ca}^{2+}$ , що виникає при процесах дисоціації зерен цементного клінкера, сприяє утворенню низькоосновних гідросилікатів кальцію;
- застосування принципів щільної упаковки частинок вихідних компонентів бетону сприяє поліпшенню його фізико-механічних, фізико-хімічних і експлуатаційних властивостей;
- отримана імітаційна модель гідратації цементу дає змогу судити про характер протікання процесу структуроутворення, ріст новоутворень та характер розподілу порового простору.

### Література:

1. Mangulkar M. N., Jamkar S.S. Review of Particle Packing Theories Used for Concrete Mix Proportioning. // International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 4, Issue 5, May-2013. – pp. 143-148.
2. Benz, D.P.: «CEMHYD3D; a Three Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modeling Package», Version 2.0 NISTIR 6845, US Department of Commerce, Washington DC, 1997 and also «Three-dimensional computer simulation of portland cement hydration and microstructure development», J. Am. Ceram. Soc., Vol. 80 (1997) pp. 3–21.
3. Andersen, P.J. and Johansen, V. Particle packing and concrete properties, Material Science of Concrete: II, 1991, Skalny J and Mindess S (Edited), The American Ceramic Society, Inc., Westerville, Ohio. pp.111-147.
4. Берлин, А.А. Имитация свойств твердых тел и жидкостей методами компьютерного моделирования / А.А. Берлин, Н.К. Балабаев // Физика. Соревновательный журнал. №11. – 1997. – с.85-92.
5. Satoh, A. Introduction to Practice of Molecular Simulation: Molecular Dynamics, Monte Carlo, Brownian Dynamics, Lattice Boltzmann and Dissipative Particle Dynamics / A. Satoh // Elsevier, 2011. – 322p.
6. Пальцер, У. Компьютерное моделирование в производстве бетонных изделий / У. Пальцер, Й.Г. Швабе // Бетон и железобетон. – 2010. – с. 20-22.
7. Мизгулин, В.В. Моделирование плотных материалов методом упаковки сферополиэдров / В.В. Мизгулин, Р.М. Кадушников, Д. М. Алиевский, В. М. Алиевский // Компьютерные исследования и моделирование. 2012. – Т.4. – №4. – С.757–766.
8. Maekawa K., Ishida T., Kishi T. Multi-scale modeling of concrete performance – Integrated material and structural mechanics // Journal of Advanced Concrete Technology, 1 (2). – 2003. – pp. 91-126.
9. Харитонов, А.М. Структурно-имитационное моделирование в исследованиях свойств цементных композитов: автореф. дис. на соискание ученой степени доктора тех. наук (05.23.05 – Строительные материалы и изделия) / А.М. Харитонов; науч. консультант П.Г. Комохов. – С.-Петербург, 2009. – 38 с.