

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**Розробка ультралегкого геополімерного бетону/
Development of ultralightweight geopolymer concrete**

спеціальність 132 Матеріалознавство
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Матеріалознавство
(назва освітньої програми)

**Виконав: здобувач вищої освіти
Групи Мм-21
Гуменюк Дмитро Васильович**

(підпис)

**Керівник:
к.т.н., доцент
Мельничук Микола Дмитрович**

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
к.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
Мельничук Микола Дмитрович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

Факультет митної справи, матеріалів та технологій
 Кафедра матеріалознавства
 Ступінь вищої освіти: магістр
 Галузь знань: 13 Механічна інженерія
 Спеціальність: 132 Матеріалознавство
 Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри

Імбирович Н.Ю.

"02" вересня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
 НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Гумешоку Дмитру Всемировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи "Розробка унітарного геополімерного бетону"

керівник роботи к.т.н. доцент Мельничук Микола Дмитрович,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "05" 06 2025 року № 2025/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
 «02» вересня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи склад унітарного геополімерного бетону, умови твердіння

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ; описування складу унітарного геополімерного бетону; матеріали та методи дослідження; описування результатів дослідження; висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

- «Мета роботи» - 1 лист ф. А4
- «Характеристика вихідних композицій» - 1 лист ф. А4
- «Методи випробувань» - 1 лист ф. А4
- «Результати випробувань» - 6 листів ф. А4
- «Висновки» - 1 лист ф. А4

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Н. контроль	Мельниченко С.В., доц.	02.09.25	06.12.25

7. Дата видачі завдання «02» вересня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Вступ, основні сукупні результати узагальненого комплексного бетону, 1 лист-ф. А4	20.10.2025	Виконано
2.	Матеріали по методи досліджень, 2 листи ф. А4	15.11.2025	Виконано
3.	Основні результати досліджень, 4 листи ф. А4	06.12.2025	Виконано
4.	Висновки, 3 листи ф. А4	06.12.2025	Виконано

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Гуменюк Д.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Мельниченко С.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Гуменюк Д. В. Розробка ультралегкого геополімерного бетону

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з таких розділів аналіз сучасних досліджень ультралегкого геополімерного бетону, матеріали та методи дослідження, аналіз результатів дослідження, висновки.

В даній роботі досліджували процес створення ультралегкого геополімерного бетону з властивостями ідентичними або покращеними порівняно з надлегким геополімерним бетоном на основі цементу.

Проводилися дослідження з метою підвищення технологічності ультралегкого геополімерного бетону, досягнення показників його щільності після висихання $\leq 800 \text{ кг/м}^3$, міцності на стиск протягом 28 днів $\geq 10 \text{ МПа}$ та теплопровідності $\leq 0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Ключові слова: геополімер, ультралегкий геополімерний бетон, легкий наповнювач, лужно-активованій матеріал.

					MP 0002.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка ультралегкого геополімерного бетону	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Гуменюк						
Перевірив		Мельничук					3	67
Н. Контр		Мисковець				Луцький НТУ, каф. М, гр. ПМм-21		
Затв.		Імбірочич						

ANNOTATION

Humenyuk D. V. Development of ultralight geopolymer concrete

Master's qualification work OP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Master's qualification work consists of the following sections: analysis of modern research on ultralight geopolymer concrete, materials and research methods, analysis of research results, conclusions.

This work investigated the process of creating ultralight geopolymer concrete with properties identical or improved compared to ultralight geopolymer concrete based on cement.

Research was conducted to improve the manufacturability of ultralight geopolymer concrete, achieve its density after drying $\leq 800 \text{ kg/m}^3$, compressive strength for 28 days $\geq 10 \text{ MPa}$ and thermal conductivity $\leq 0.12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Keywords: geopolymer, ultralight geopolymer concrete, lightweight filler, alkali-activated material.

					MP 0002.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УЛЬТРАЛЕГКОГО ГЕОПОЛІМЕРНОГО БЕТОНУ.....	9
1.1 Структура ультралегкого геополімерного бетону.....	9
1.2 Властивості ультралегкого геополімерного бетону.....	11
1.3 Мета дослідження.....	15
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	17
2.1 Характеристика вихідних матеріалів.....	17
2.2 Методи досліджень.....	21
2.2.1 Дрібномасштабні експерименти.....	22
2.2.2 Великомасштабні експерименти.....	23
2.2.3 Додаткові випробування.....	25
2.3 Склади сумішей.....	30
2.3.1 Суміш з частковою заміною піску на легкий заповнювач LWA.....	31
2.3.2 Суміш з повною заміною піску на легкий наповнювач LWA, на основі неоптимізованого підходу до ущільнення.....	33
2.3.3 Суміш з повною заміною піску на легкий наповнювач LWA, на основі оптимізованого підходу до ущільнення.....	35
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	39
3.1 Результати досліджень зразків із частковою заміною піску на LWA	39
3.2 Результати випробувань зразків з повною заміною піску на LWA, на основі неоптимізованого підходу до ущільнення	50
3.3 Результати досліджень зразків з повною заміною піску на LWA, на основі оптимізованого підходу до ущільнення	57
Висновки.....	64
Список використаних джерел	65
Додатки	

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Розвиток будівельного матеріалознавства характеризується активним пошуком інноваційних, енергоефективних і екологічно безпечних матеріалів, здатних замінити традиційні цементні системи. Зростання викидів вуглекислого газу внаслідок виробництва портландцементу сягає до 7...8 % світових обсягів антропогенних емісій CO₂, створює нагальну потребу у впровадженні альтернативних в'язучих речовин на основі низьковуглецевих технологій. Одним із найперспективніших напрямів у цьому контексті є геополімерні матеріали, що формуються внаслідок реакцій полімеризації алюмосилікатів під дією лужних активаторів і не потребують високотемпературної обробки. Геополімери поєднують у собі високу міцність, хімічну та термічну стійкість, низьку проникність і потенційну можливість переробки промислових відходів, зокрема золи-виносу, доменних шлаків, метакаоліну та зольних залишків.

Особливої уваги набуває напрям створення легких і ультралежких геополімерних бетонів. Традиційні бетонні конструкції мають щільність (густина) 2200...2500 кг/м³, що зумовлює значну вагу елементів та збільшує навантаження на несучі конструкції й фундаменти. Натомість легкі бетони зі щільністю до 1800 кг/м³ широко застосовуються у будівництві завдяки поєднанню конструкційних і теплоізоляційних властивостей. Розробка ультралежких геополімерних бетонів із щільністю нижче 1500 кг/м³ відкриває нові можливості для створення конструкційних теплоізоляційних матеріалів нового покоління, які відповідають принципам сталого будівництва.

Ультралежкі геополімерні бетони поєднують у собі дві ключові тенденції сучасної науки — екологічність матеріалів та ресурсозбереження. Використання алюмосилікатних відходів як сировини дає змогу суттєво скоротити енергетичні витрати виробництва, а введення легких заповнювачів (керамзиту, спученого перліту, вермікуліту, шлакових або зольних гранул, штучних пористих агрегатів) дозволяє регулювати щільність і структуру

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бетону, оптимізуючи співвідношення маси, міцності й теплофізичних характеристик. При цьому залишається невирішеним комплекс питань, пов'язаних із впливом гранулометрії наповнювача, його пористості, структури міжфазної зони контакту та умов геополімеризації на фізико-механічні властивості готового матеріалу.

Важливою проблемою є забезпечення достатнього рівня міцності при зниженій щільності. Відомо, що зменшення об'ємної маси бетону, як правило, призводить до погіршення зчеплення між матрицею і наповнювачем, а також до підвищення загальної пористості, що знижує міцність і довговічність матеріалу. Тому актуальним є визначення оптимальних параметрів складу, що дозволяють досягти балансу між зменшенням ваги та збереженням експлуатаційних властивостей.

Зокрема, необхідно дослідити вплив типу і розміру легкого наповнювача, концентрації лужного активатора, співвідношення Si/Al у вихідній системі та умов твердіння на мікроструктуру, ступінь полімеризації і властивості матеріалу.

Наукові публікації останніх років свідчать про значний інтерес до легких геополімерних систем, проте дослідження ультралегких бетонів зі щільністю менше 1300 кг/м^3 залишаються поодинокими.

Відсутня єдина класифікація таких матеріалів, не встановлені стандартизовані методики оцінки їх механічних, теплоізоляційних та довговічних характеристик. Недостатньо вивчено мікроструктурні процеси в зоні контакту між пористим агрегатом і геополімерною матрицею, що визначає формування дефектної структури та характер руйнування. Крім того, бракує даних щодо поведінки ультралегких геополімерних бетонів в умовах тривалої експлуатації, циклічного зволоження-висушування, заморожування-розморожування та впливу підвищених температур.

Важливим аспектом є встановлення закономірностей формування структури і властивостей ультралегкого геополімерного бетону залежно від

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складу та параметрів технологічного процесу. Вивчення цього питання сприятиме створенню нових композиційних матеріалів із заданим комплексом властивостей, що забезпечують одночасно низьку щільність, достатню міцність і високу довговічність.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УЛЬТРАЛЕГКОГО ГЕОПОЛІМЕРНОГО БЕТОНУ

1.1. Структура ультралегкого геополімерного бетону

Ультралегкий геополімерний бетон – це складна композиційна система, яка поєднує три ключові структурні компоненти: алюмосилікатну геополімерну матрицю, легкий або ультралегкий заповнювач (агрегат) із зниженою щільністю, інтерфейсну (міжфазну) зону контакту матриці-агрегат (ITZ) разом із можливими пороутворювачами або газоутвореними каналами. Конструкція цієї системи визначає її механічні, фізико-хімічні та експлуатаційні властивості, а також можливість зниження щільності при прийнятному рівні міцності та довговічності.

Першим складовим елементом є геополімерна матриця, яка формується шляхом лужно-активованої полімеризації алюмосилікатної сировини – наприклад, золи-виносу, доменного шлаку, метакаоліну тощо. Цей процес включає розчинення SiO_2 та Al_2O_3 , міграцію іонів $\text{Si}^{4+}/\text{Al}^{3+}$, полімеризацію та утворення тривимірної мережі Al–O–Si (або Si–O–Al) ланцюгів.

У ряді досліджень зазначено, що співвідношення Si/Al, мольна концентрація лугів, тип силікатного активатора і об'єм активуючого розчину істотно впливають на щільність матриці, ступінь полімеризації й кінцеві властивості матеріалу [1, 2, 3]. Підвищення рН лужного розчину або підвищена концентрація NaOH прискорює розчинення прекурсорів і підвищує ступінь полімеризації. [4].

Друга складова – легкі агрегати або наповнювачі із зниженою щільністю – використовуються з метою зменшення об'ємної маси бетону. У випадку ультралегких геополімерних бетонів в якості таких агрегатів застосовують спучену глину, пемзу, перліт, шлакові гранули, кокосові або пальмові залишки, штучні пористі агрегати, а також піноутворювачі. Завдяки

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цим матеріалам щільність готового бетону може бути знижена до значень нижче 1500 кг/м^3 , іноді навіть до $800...900 \text{ кг/м}^3$ [5, 6]. При цьому важливою є характеристика легкого агрегату: його внутрішня пористість, межа міцності, водопоглинання, поверхнева текстура, граніометрія та взаємодія з матрицею.

Введення легкого агрегату знижує щільність суміші, але водночас може призводити до зниження несучої міцності через підвищену пористість і слабшу межу зону контакту матриці-агрегат ITZ [3,7].

Третій елемент – інтерфейсна зона ITZ між матрицею і легким агрегатом. У випадку традиційного бетону ITZ вже є слабкою ланкою; у легких геополімерних системах ця зона ще більш критична, оскільки легкі наповнювачі зазвичай мають більшу пористість, меншу міцність і більшу водопоглинальність. Це призводить до того, що усередині межі контакту формується підвищена концентрація мікропор, мікротріщин та неоднорідностей.

У роботі [8] відзначено, що недостатня обробка поверхні легкого агрегату або несумісність розтягувальних та термічних властивостей між матрицею та агрегатом призводить до зниження міцності та довговічності ультралегких геополімерних бетонів.

У структурному плані будова ультралегких геополімерних бетонів передбачає чіткий баланс між пористістю та міцністю матриці, часткою легкого агрегату та якістю контакту. Розробники композицій зазвичай оптимізують:

- щільну геополімерну матрицю з низьким рівнем капілярних пор;
- легкий агрегат із прийнятною міцністю, низьким водопоглинанням і хорошою адгезією до матриці;
- умови тверднення, які забезпечують завершену полімеризацію і формування міцної матриці без утворення великих тріщин.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наприклад, дослідження [9, 10] показали, що використання легкого пористого агрегату (пемзи, перліту) із правильною обробкою поверхні дає можливість створення ультралегких геополімерних бетонів щільністю нижче 1200 кг/м^3 і міцністю близько 18 МПа.

Щодо технологічного аспекту будови: важливими є наступні параметри: співвідношення активатор/прекурсор, природа і концентрація лужного активатора, співвідношення $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, температура/тривалість твердіння, а також попередня обробка легкого агрегату (сушка, імпрегнація, покриття). Наприклад, імпрегнація легкого агрегату NaOH -розчином покращує адгезію до матриці [11, 12].

Таким чином, будова ультралегкого геополімерного бетону є багаторівневою: потрібно враховувати хімічну архітектуру матриці, фізичні характеристики легкого агрегату, механіку взаємодії у межі контакту, а також процеси пороутворення. В дослідженнях важливо сфокусуватись на параметрах складу, які безпосередньо впливають на щільність, структуру матриці, і якісну ITZ-зону, а також на методиках обробки агрегатів та умов твердіння, адже збалансований склад ультралегкого геополімерного бетону — це поєднання полікерованої алюмосилікатної матриці, контрольованого легкого агрегату і якісної ITZ.

1.2. Властивості ультралегкого геополімерного бетону

Властивості ультралегкого геополімерного бетону формуються в результаті його складової будови: матриця-агрегат-ITZ, а також впливу технологічних умов тверднення. Важливими факторами є такі групи властивостей: механічні (міцність на стиск, вигин, модуль пружності), фізико-хімічні (щільність, водопоглинання, пористість, проникність), тепло-звуко-ізоляційні властивості, довговічність (вогнестійкість, морозостійкість,

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стійкість до агресивних середовищ) та зв'язок мікроструктури із макровластивостями.

Численні дослідження механічних властивостей ультралегкого геополімерного бетону показують, що при щільності нижче $\sim 1500 \text{ кг/м}^3$ він досягає 28-денної міцності на стиск у діапазоні від 10 до 30 МПа залежно від складу та умов твердіння [7, 13]. При більш щільних легких сумішах (щільність $\sim 1600\text{-}2000 \text{ кг/м}^3$) міцність може перевищувати 30-40 МПа [14]. Наприклад, заміна піску на спучену глину на 60 % за об'ємом дала приріст міцності до +27 % у 28-денному віці за певних умов [14]. Проте при заміні агрегатів потрібно враховувати зниження модулю пружності – ультралегкого геополімерного бетону має нижчий модуль порівняно зі звичайним бетоном, що може впливати на жорсткість конструкційних елементів [15].

Щільність є ключовим показником легкості конструкції, так, легкий геополімерний бетон характеризується щільністю нижче 2000 кг/м^3 , іноді в межах $800\text{...}1200 \text{ кг/м}^3$ (особливо для теплоізоляційних застосувань) [16].

Зниження щільності супроводжується підвищеною пористістю та водопоглинанням – наприклад, у дослідженні зі щільністю $\sim 823,8 \text{ кг/м}^3$ було водопоглинання до 7.3 % [5, 17]. Водопоглинання і проникність мають значення для довговічності – висока пористість підвищує проникнення агресивних середовищ.

Завдяки підвищеній пористості і легким агрегатам, ультралегкий геополімерний бетон має знижений коефіцієнт теплопровідності: у роботі з композицією зі штучного пінного геополімерного наповнювача (для ультралегкості), спученої глини (для базової міцності й теплоізоляційності), і перліту (для додаткової пористості й зниження теплопровідності) досягнуто $\lambda \approx 0,1708 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, що на $\sim 75 \%$ менше ніж у контрольної суміші [15, 18]. Це робить ультралегкий геополімерний бетон придатним для застосування як теплоізоляційного елемента, фасадного блоку, панелі.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вивчено вплив підвищених температур, циклів заморожування-розморожування, корозійного впливу та проникнення хлоридів. Наприклад, дослідження показали, що при нагріванні до 400...800 °С міцність ультралегкого геополімерного бетону починає знижуватись різко — через різні коефіцієнти термічного розширення матриці та агрегату, випаровування зв'язаної води, мікротріщини в ITZ [19]. Крім того, проникність і капілярне водопоглинання залишаються вищими, ніж у щільних системах, що призводить до зниження морозостійкості.

Дослідження [20] ультралегкого геополімерного бетону за допомогою SEM, порометрії та XRD показують, що міцність і довговічність ультралегкого геополімерного бетону корелюють зі ступенем полімеризації матриці, розподілом пор, об'ємом і розміром капілярних пор, а також якістю ITZ. Наприклад, чим щільніше матриця і чим краще адгезія легкого агрегату, тим вища міцність і нижча водопоглинання.

Основним викликом для розробки ультралегкого геополімерного бетону є зниження щільності без суттєвого падіння міцності або довговічності. Дослідження із щільністю менше 1200 кг/м³ і міцністю більше 15 МПа існують, але їх значно менше і часто вони орієнтовані на теплоізоляційні, нетипові навантаження [21]. Для конструкційного застосування потрібен більш суворий контроль якості, стандартизація методик випробувань і довговічні дослідження.

Властивості ультралегкого геополімерного бетону формуються як функція трьох факторів: складу (матриця + агрегат), будови (пористість, ITZ) і технології (твердішання, обробка агрегата). Важливим фактором є оптимізація цих параметрів для досягнення цільових показників: щільність ≤ 1500 кг/м³, міцність ≥ 30 МПа, водопоглинання ≤ 5 % та теплопровідність мінімальна.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Насьогодні розроблено ультралегкий геополімерний бетон щільністю $\leq 800 \text{ кг/м}^3$ з використанням цементу як в'язучого, який має 28-денну міцність на стиск 10...12 МПа та теплопровідність 0,12 Вт/(м·К) [3].

Ряд досліджень демонструють, що заміна цементного в'язучого геополімерним в'язучим у бетонах може привести до нижчої теплопровідності [4], меншої усадки при висиханні [5, 6] та вищої кислотостійкості та вогнестійкості [7, 8]. Це може ще більше розширити потенціал надлегкого бетону. Крім того, використання в'язучого матеріалу геополімерної природи, замість цементного, також зменшить негативний вплив на навколишнє середовище, що пов'язано зі зменшенням викидів CO_2 , які є значними при виробництві портландцементу [9].

Важливим фактором для аналізу властивостей геополімерних матеріалів є їхня технологічність, показники щільності, міцності на стиск, теплопровідності та проникнення води під тиском.

У багатьох випадках бетони на основі геополімерного або цементного в'язучого мають схожі властивості [13, 16], але й мають деякі відмінності. Окрім уже згаданих переваг геополімерного в'язучого, іншими позитивними властивостями є нижчі показники щільності, теплопровідності та проникнення води під тиском.

Застосовуючи різні підходи до ущільнення, можна досягти бетонів з різною пористістю та міцністю на стиск за допомогою цементу або геополімерних в'язучих [16, 20, 21]. Однак, щільність порошку геополімеру може бути нижчою порівняно з щільністю цементного порошку, це також може сприяти отриманню бетону з нижчою щільністю.

У попередніх дослідженнях [4] зазначалося, що в'язуча речовина на основі геополімеру також може позитивно впливати на теплопровідність та водопроникнення під тиском порівняно з цементом. Теплопровідність бетону може бути нижчою через меншу щільність геополімерного матеріалу порівняно з цементом [4]. Пориста структура в'язучих речовин на основі

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

геополімеру може бути щільнішою, що призводить до меншого водопроникнення під тиском порівняно з цементом.

Капілярні пори, які часто спостерігаються в портландцементних бетонах, відсутні в матриці геополімерних в'язучих речовин [13, 21].

З іншого боку, деякі характеристики в'язучої речовини на основі геополімеру потребують особливої уваги. Активатор лугів є дорогим і може бути небезпечним у роботі. Також досі не розроблені суперпластифікатори (SP) та спеціальні повітрявтягуючі агенти (АЕА) для цементних в'язучих речовин. Високе значення рН в'язучої речовини на основі геополімеру може зруйнувати добавки [2, 22], що ускладнює створення працездатної системи геополімеру.

Надлегкий бетон може бути застосований у монолітній будівлі, де бетонні стіни повинні мати необхідну міцність та ізоляційні властивості. Коли замість цементного в'язучого застосовується гідрацетат, властивості надлегкого бетону можуть покращитися.

У дослідженнях [13, 20] було отримано бетони на цементній основі з 28-денною міцністю на стиск 23..30 МПа та відносно низькою теплопровідністю 0,485...0,847 Вт/(м·К) порівняно зі звичайним бетоном, як показано в таблиці 1.1, однак щільність таких матеріалів становить від 1280 до 1490 кг/м³ [5, 16].

1.3. Мета дослідження

Метою цього дослідження є створення ультралегкого геополімерного бетону з ідентичними або покращеними властивостями порівняно з надлегким геополімерним бетоном на основі цементу.

Цілями дослідження є підвищення технологічності ультралегкого геополімерного бетону, досягнення показників його щільності після

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

висихання $\leq 800 \text{ кг/м}^3$, міцності на стиск протягом 28 днів $\geq 10 \text{ МПа}$ та теплопровідності $\leq 0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Мета буде досягнута шляхом виконання наступних завдань:

– заміна цементу на геополімерне в'язуче в рецептурі ультралегкого геополімерного бетону на основі цементу [3] для отримання ультралегкого геополімерного бетону;

– розробка бетону з низької густиною шляхом застосування різних підходів ущільнення відповідно та дослідження впливу методу проектування на теплопровідність, міцність на стиск протягом 28 днів та довговічність з точки зору проникнення води під тиском;

– вивчення впливу методів укладання, співвідношення рідина/порошок, концентрацій лужних активаторів та інших компонентів на реологічні властивості свіжого бетону.

– визначення властивостей тверднення (щільність, міцність на стиск, теплопровідність та водопроникність під тиском) з різними конструкціями укладання, співвідношенням рідина/порошок, кількістю повітрявтягуючого агента (АЕА), концентраціями лужних активаторів та вмістом пористого кварцового наповнювача PQA та модифікованого суперпластифікатором (PQA SP).

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика вихідних матеріалів

В дослідженнях використовувалася вода, мінеральні в'язучі речовини PQA, пісок, легкий заповнювач LWA, NaOH, суперпластифікатори (SP) та спеціальні повітрявтягуючі агенти АЕА. Експерименти проводяться у двох варіаціях. Для економії часу та сировини проводилися експерименти в малих об'ємах (1 літр), які називаються «дрібномасштабними експериментами».

Для перевірки результатів, отриманих у дрібномасштабних випробуваннях, та для дослідження додаткових властивостей (щільність після висихання в печі, теплопровідність та проникнення води під тиском), проводяться експерименти у великому масштабі (≥ 20 літрів), які називаються «великомасштабними експериментами».

Мінеральні в'язучі речовини

Як в'язучі речовини використовуються портландцемент (СЕМ І 52.5 R) та попередньо змішане геополімерне мінеральне в'язуче (мінерал PQA), що складається з високоякісних промислових мінералів. У таблиці 2.1 наведено щільність та огляд хімічного складу цементу та мінералу PQA, виміряного за допомогою XRF з використанням Philips PANanalytical типу Epsilon 3

Мінерал PQA являє собою суміш, багату на SiO_2 (53%) та Al_2O_3 (18%), а цемент являє собою суміш, багату на CaO (69%) та SiO_2 (20%). Мінерал PQA має значно вищий вміст SiO_2 , Al_2O_3 та нижчий вміст CaO порівняно з цементом.

Гранулометричний розподіл частинок речовин наведено на рисунку 2.1 (виміряно за допомогою Mastersizer 2000), показано, що цемент є дрібнішим порівняно з мінералом PQA (з D50 цементу 12 мкм та D50 мінералу PQA 15 мкм).

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Хімічний склад матеріалів дослідження

	PQA	CEM I 52.5 R	Пісок
Щільність (кг/м ³)	2498	3093	2657
Склад	Вміст (%)	Вміст (%)	Вміст (%)
SiO ₂	52,753	20,373	95,509
Al ₂ O ₃	18,053	3,429	2,549
CaO	12,923	68,86	0,103
Fe ₂ O ₃	5,917	1,477	0,264
MgO	3,858	0,694	–
K ₂ O	2,092	0,721	1,174
SO ₃ ,	1,763	3,878	0,155
Na ₂ O	1,107	–	–
TiO ₂	1,012	–	–
MnO	0,138	–	–
BaO	0,105	–	–

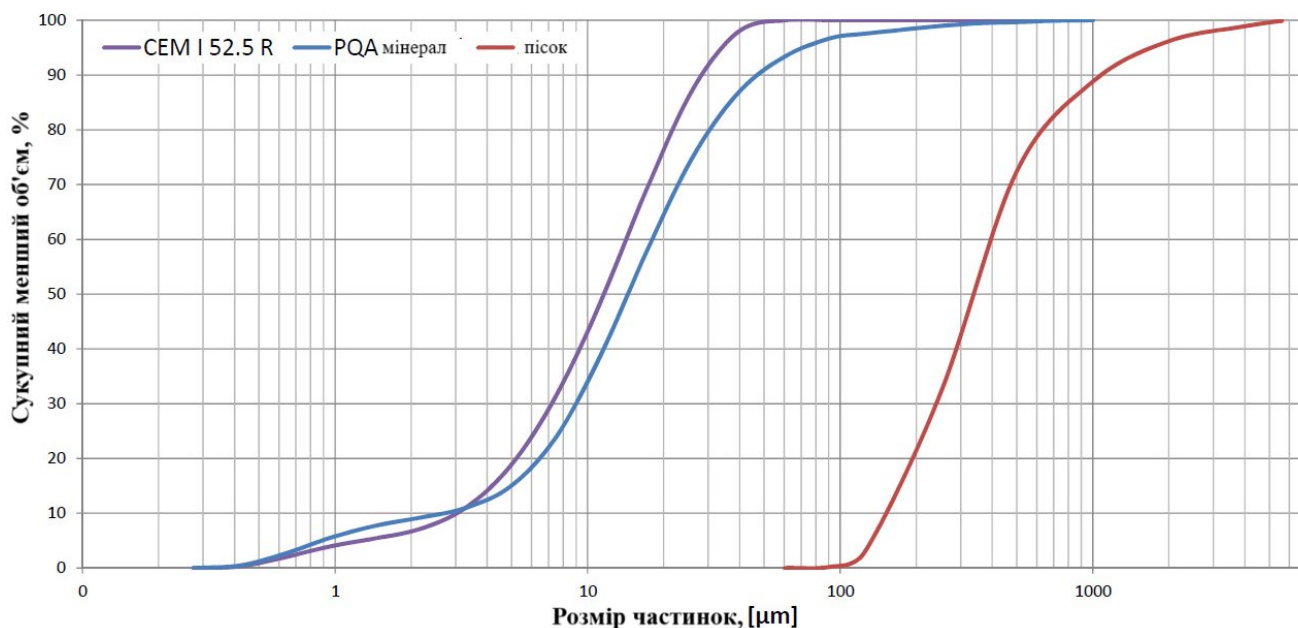


Рисунок 2.1 – Гранулометричний розподіл цементу, мінералу PQA та піску

Використовується природний пісок розміром частинок 0...4 мм. Його щільність та хімічний склад наведено в таблиці 2.1. Основним

компонентом є SiO_2 . На рисунку 2.1 наведено гранулометричний розподіл піску, так D50 піску становить 330 мкм.

Легкий заповнювач (LWA), що використовувався в експерименті, являє собою гранулят пінопласту, виготовлений із залишків переробленого скла. Його спікають та розширюють у обертовій печі за температури від 750°C до 900°C . Щільність LWA значно нижча порівняно зі звичайними гранулятами і тому ідеально підходить для застосування в ультралегкого геополімерного бетону.

LWA з різними фракціями розмірів частинок наведено в таблиці 2.3. Щільність та опір подрібненню зменшуються зі збільшенням розміру частинок. Теплопровідність LWA з розміром 2...4 мм та 4...8 мм однакова. LWA з різними фракціями розміру частинок проілюстровано на рисунках 2.2 та 2.3, а внутрішня поверхня LWA розміром 2...4 мм показана на рисунку 2.4.

Таблиця 2.2 – Основні властивості легкого заповнювача LWA

Розмір, мм	Насипна щільність ($\text{кг}/\text{м}^3$), ($\pm 15\%$)	Щільність частинок ($\text{кг}/\text{м}^3$), ($\pm 15\%$)	Опір роздавлюванню ($\text{Н}/\text{мм}^2$)	Теплопровідність ($\text{W}/(\text{m K})$)
0,1...0,3	450	800	3,5	x
0,25...0,5	300	540	2,9	x
0,5...1,0	250	450	2,6	x
1,0...2,0	220	350	2,4	x
2,0...4,0	190	310	2,2	0.07
4,0...8,0	170	300	1,9	0,07



Рисунок 2.2 – Легкий заповнювач
LWAз фракцією частинок 0,25...0,5 мм



Рисунок 2.3 – Легкий заповнювач
LWAз фракцією частинок 2...4 мм



Рисунок 2.4 – Внутрішня поверхня
LWA товщиною 2...4 мм

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Розчин гідроксиду натрію NaOH використовується як активуючий розчин. NaOH – це 33% (за масою) чистий розчин промислового класу з густиною 1,36 кг/л та початковою молярністю 11,2 М.

Розчин має вищу в'язкість порівняно з водою та значно зростає при вищих молярностях [20] і це може впливати на реологію та технологічність пасти/розчину у свіжих розчинах.

В експериментах використовувався суперпластифікатор (PQA SP), який спеціально розроблений для геополімерів. На основі попередніх досліджень використовується фіксована доза 1,5 кг/м³. Ефективний суперпластифікатор запобігатиме аглютинації молекул, що вказує на те, що менше рідини буде захоплено між молекулами і більше доступної рідини буде присутньо в суміші, що сприятиме технологічності. Коли в суміші присутньо більше доступної рідини, більше NaOH доступно для розчинення сировини.

В експериментах використовувалася повітрововтягуюча добавка АЕА. Як зазначено в розділі 1, багато АЕА, розроблених для цементних сумішей, можуть не працювати в сумішах геополімерів. Високе значення рН систем GP може окислювати (руйнувати) АЕА [2]. У цьому дослідженні аналізуються Sika LPS A 94, Sika EAR solid, Tillman mengolie™ АЕА-В та BasF Micro Air 169, щоб дослідити, чи зменшується щільність сумішей геополімеру внаслідок застосування АЕА.

2.2. Методи досліджень

У цьому дослідженні для проведення експериментів використовується двосторонній підхід. Протягом усього дослідження, особливо на початковому етапі, експерименти проводяться в малому масштабі (1 літр), щоб отримати багато даних за короткий період часу. Цей етап зосереджений на визначенні міцності на стиск у різному віці та густині (розрахунковій та

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експериментально визначеній густині, виміряній густині безпосередньо після змішування в мірній чашці).

На наступних етапах розроблялися перспективні експерименти на основі результатів, отриманих на попередніх етапах. Більшість експериментів проводилися у великому масштабі (20 літрів) для перевірки результатів. На цих етапах також досліджувалася густина після висихання в печі (густина висушеного в печі зразка), теплопровідність та проникнення води під тиском (додатково до розрахованої та експериментально визначеної густини та міцності на стиск).

Використовувався оптимізований та неоптимізований підхід до ущільнення бетону. Перший передбачає ретельний підбір режиму вібрації, типу вібраційного обладнання та тривалості його роботи відповідно до консистенції бетонної суміші та конструктивних умов. У цьому випадку вібрація забезпечує повне видалення повітря, рівномірне розміщення заповнювачів, відсутність порожнин і раковин, а також однорідну структуру бетону без розшарування. Такий підхід гарантує отримання щільного, міцного, довговічного та водонепроникного бетону з високими експлуатаційними характеристиками.

Неоптимізований підхід проявляється у довільних параметрах вібрування, нерівномірному охопленні зони ущільнення та недотриманні технологічних параметрів.

2.2.1. Дрібномасштабні експерименти

Дрібномасштабні експерименти проводилися за такою процедурою. Зразки, що склалися з піску, LWA, в'язучого (геополімеру або цементу), води, NaOH та/або PQA SP, відливалися об'ємом 1 літр.

Тверді речовини додавалися в змішувач Hobart та перемішувалися протягом 10 секунд. Вся рідина змішувалася для створення бажаної

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

молярності лугу та додавалася до сухих матеріалів у змішувачі. Загальну суміш потім перемішували протягом 3 хвилин.

Свіжий розчин переносився у полістирольні форми (4 x 4 x 16 см³). Метою цього дослідження було створення суміші з хорошою технологічністю. Однак, коли технологічність сумішей була дуже поганою, суміші ущільнювали за допомогою ущільнювального стрижня та молотка. Слід враховувати, що через ручне зусилля можуть виникнути людські помилки під час ущільнення.

Щоб запобігти деформації полістирольних форм під тиском молота, форму розміщують у сталевій рамі. Ця сталева рама та інші інструменти для ущільнення бетону показані на рисунках 2.5 та 2.6 відповідно. На цьому етапі LWA розміром 4...8 мм не випробовувався, оскільки цей розмір занадто великий для змішувача Hobart. Крім того, щільність та теплопровідність цих частинок порівнянні з LWA розміром 2...4 мм.

Заповнені форми зважували, накривали фольгою та піддавали твердненню за кімнатних умов. За вагою заповнених форм розраховували експериментально визначену щільність. На 7, 14 та 28 день одну з 3 призм виймали з форми, зважували, вимірювали висоту відповідно. З точним визначенням висоти було розраховано густину з точністю до 1 кг/м³.



Рисунок 2.5 – Сталева рама навколо пінополістирольної форми

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.6 – Пресувальні стрижні, молоток та інструмент для оздоблення

Міцність на стиск вимірювали за допомогою контрольованої випробувальної машини MEGA 100-200-10-D-S.

2.2.2. Великомасштабні експерименти

Великомасштабні експерименти проводилися, з одного боку, для перевірки результатів, отриманих у дрібномасштабних експериментах, а з іншого боку, для аналізу додаткових властивостей (легкооброблюваність у часі, міцність на стиск, густина після висихання в печі, теплопровідність та проникнення води під тиском). Великомасштабні експерименти проводяться за наступною процедурою. Зразки на основі геополімеру відливаються в ємності об'ємом не менше 20 літрів. Вода, NaOH, АЕА та суперпластифікатор змішуються разом. Якщо не зазначено інше, використовується розчин з 3М NaOH. У випадку застосування попередньо замочених LWA, частинки поміщають у воду на одну годину.

Після цього частинки відокремлюють від решти води за допомогою сита та поверхнево сушать папером. Мінерал PQA та LWA (сухий або попередньо замочений) змішували в бетонозмішувачі (Atika-180 220 вольт, 180 літрів, як

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показано на рисунку 2.7), а рідину додавали під час змішування твердих речовин.



Рисунок 2.7 – Бетонна суміш

Суміш спочатку змішували протягом 7 хвилин зі звичайною швидкістю змішування бетону. Коли вимірювали технологічність за цей час, швидкість обертання знижували, тобто дорівнювали швидкості під час транспортування.

За потреби, усадку та текучість вимірювали конусом Абрамса. Осідання вимірювали відповідно до BS EN 12350-2-3009. Потік вимірювали двічі за перпендикулярними діагоналями після того, як конус Абрамса піднімають, а стіл для опускання опускають 10 разів замість 15, щоб заощадити час.

У невеликому масштабі технологічність деяких сумішей вимірювали конусом Хегермана (міні-осідання). На рисунках 2.8 та 2.9 проілюстровано суміші, які не піддаються обробці, у великих та малих масштабах експериментів.

Після змішування свіжу густину вимірювали мірною склянкою, а технологічність вимірювали з часом, або суміші відливали безпосередньо.

Суміш відливали у сталеві форми (10 x 10 x 10 або 15 x 15 x 15 см³) та полістирольні форми (4 x 4 x 16 см³), і перші експерименти ущільнювали вручну.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.8 – Випробування на осідання
за допомогою конуса Абрамса

Спочатку першу половину форм заповнювали сумішшю, і суміш ущільнювали стрижнем і молотком, потім форму повністю заповнювали і знову ущільнювали стрижнем і молотком.

Як зазначено в розділі 2.2.1, при ручному ущільненні можуть виникнути людські помилки. В наступних експериментах ущільнювали за допомогою вібраційного столу, оскільки LWA не плавала, що могло бути спричинено вібрацією через їхню дуже низьку щільність.



Рисунок 2.9 – Випробування на плинність
за допомогою конуса Хегермана

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Сталеві форми маркували, накривали фольгою та піддавали твердненню при кімнатній температурі. Через один день зразки виймали з форми, запаяли в пластик та вони додатково тверділи за кімнатної температури (показано на рисунку 2.11 та рисунку 2.12).

На 7-й та 28-й день міцність на стиск зразків розміром 10 x 10 x 10 см³ вимірювали на трьох зразках за допомогою контрольованої випробувальної машини під назвою Ratio-Тес, як показано на рисунку 2.10.



Рисунок 2.10 – Вимірювання міцності на стиск

Міцність на стиск на 1-й, 7-й, 14-й та/або 28-й день вимірювали двічі на двох сторонах зразків призм розміром 4 x 4 x 16 см³ за допомогою приладу MEGA 100-200-10-D-S відповідно до NEN EN 196-1.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27



Рисунок 2.11 – Герметизація форм

На 28-й день водопроникнення вимірювали на трьох зразках розміром 15 x 15 x 15 см³ відповідно до BS EN 12390-8:2009 (рисунок 2.13).



Рисунок 2.12 – Зразки загорнуті в пластикову фольгу та поміщені в пластиковий пакет

Через 28 днів виміряли масу зразків (розміром 10 x 10 x 10 см³) та висушили їх у печі за температури 105 ± 5 °С, доки різниця в масі через 24 години не стане меншою за 0,2% згідно з EN 12390-7:2009.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28



Рисунок 2.13 – Випробування після проникнення води під тиском

Після досягнення цієї температури теплопровідність зразка визначали за допомогою аналізатора теплопередачі (ISOMET модель 2104, зображена на рисунку 2.14). Теплопровідність вимірювали на двох зразках, і для отримання середнього значення проводили два вимірювання кожного зразка.



Рисунок 2.14 – Вимірювання теплопровідності

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2.2.3. Додаткові випробування

Водопоглинання вимірювали LWA розміром 2...4 та 4...8 мм. Початковий вміст води в LWA вимірюється шляхом сушіння LWA протягом 24 годин у печі при температурі 105°C. Спостерігалось, що частинки поставляються в сухому стані. LWA поміщають між двома ситами та поміщають під воду. Через годину сита з частинками виймають з води та поміщають у піч при температурі 105°C. Коли зовнішня поверхня частинок трохи висохне, частинки знову зважують. Це випробування проводили двічі.

2.3. Склади сумішей

Склади сумішей виконувалися для розробки ультралегкого бетону на основі геополімеру. Як згадувалося в розділі 1, метою є створення ультралегкого бетону на основі геополімеру з щільністю в печі $\leq 800 \text{ кг/м}^3$, хорошою оброблюваністю протягом часу, міцністю на стиск протягом 28 днів $\geq 10 \text{ МПа}$ та теплопровідністю $\leq 0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

У попередніх дослідженнях [6, 12] повідомлялося, що в складах сумішей із застосуванням різних методів ущільнення отримують бетони з різною пористістю та міцністю на стиск [11]. Коли склад суміші розроблено належним чином, можна досягти бажаних властивостей, оскільки склад суміші впливає, наприклад, на технологічність, щільність, пористість, теплопровідність, міцність на стиск та водопроникність.

У літературі зазначається, що склад суміші з оптимізованим ущільненням призводить до найвищої міцності, оскільки буде певний розподіл між меншими та більшими частинками, а пористість суміші буде мінімальною завдяки краще ущільненим інгредієнтам [15]. Однак, оскільки низька щільність та теплопровідність також є цілями, неоптимізоване ущільнення з великою кількістю більших частинок (з нижчою щільністю)

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може призвести до покращення властивостей щодо щільності та теплопровідності. У цьому дослідженні вивчалися склади сумішей, застосовуючи два різних підходи до ущільнення: неоптимізований та оптимізований.

На різних етапах проводилися такі дослідження:

- Часткова заміна піску на LWA, оптимізоване ущільнення.

Вплив LWA досліджено шляхом заміни піску на різних рівнях у сумішах на основі піску та в'язучої речовини (геополімеру або цементу) з використанням різних доз рідини.

- Повна заміна піску на LWA на основі неоптимізованого підходу до ущільнення

Вивчення впливу неоптимізованого ущільнення з великою кількістю LWA розміром 2...4 мм на щільність, теплопровідність та інші властивості.

- Повна заміна піску за допомогою LWA, на основі оптимізованого підходу до ущільнення.

2.3.1. Суміш з частковою заміною піску на легкий заповнювач LWA

У літературі зазначається, що на властивості бетону можуть впливати різні розміри частинок [3, 6]. При використанні менших частинок питома площа поверхні збільшується, що може призвести до більшої загальної площі поверхні для заданого завантаження частинок. Крім того, різні щільності, швидкості водопоглинання та опори роздавлюванню для різних розмірів LWA можуть впливати на властивості бетону. Досліджений вплив різних об'ємів різних розмірів LWA.

У попередніх дослідженнях [2, 11] зазначається, що різні співвідношення рідина/суха суміш та вода/цемент можуть впливати на властивості бетону. Збільшена кількість рідини збільшить

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

легкоукладальність суміші, але зменшить міцність на стиск, оскільки в результаті утворюється менш щільна суміш.

У дослідженні [10] зазначалося, що цементне в'язуче потребує вищого співвідношення вода/цемент порівняно зі співвідношенням рідина/суха суміш у в'язучому на основі геополімеру. Через це співвідношення вода/цемент для сумішей на основі цементу, що використовуються в цьому дослідженні, вище порівняно зі співвідношенням рідина/суха суміш на основі геополімеру.

Досліджений вплив різних співвідношень рідина/суха суміш та вода/цемент, а також вплив рідких сумішей LWA на густину та міцність на стиск у дрібномасштабних експериментах на основі піску та геополімеру або цементного в'язучого, де різні об'єми піску замінюються на LWA.

Вивчено вплив заміни піску, різних розмірів LWA та різних співвідношень рідина/порошок для цементу та сумішей геополімеру (дрібномасштабні експерименти).

У таблиці 2.4 представлено огляд проведених експериментів.

Склади сумішей були наступні:

– на основі піску (660 мл/л) та геополімеру або цементного в'язучого (340 мл/л; мінеральний та рідкий);

– на основі геополімеру: 450 грам/л мінералу PQA та 160 мл/л рідини (співвідношення рідина/суха суміш 0,39 за масою).

– на основі цементу: 434 грам/л цементу та 200 мл/л (співвідношення вода/цемент 0,46), що ґрунтується на рецептурі ULWC на основі цементу [3].

Досліджені різні співвідношення рідина/суха суміш та вода/цемент. У сумішах на основі геополімеру вплив кількості рідини досліджується з використанням 140, 160 та 180 мл зі співвідношеннями рідина/суха суміш 0,34, 0,39 та 0,44 (за масою) відповідно.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Слід враховувати, що абсолютна кількість NaOH збільшується зі збільшенням об'єму рідини при однаковій молярності. Вплив різних молярностей буде детально досліджено на наступному етапі.

У рецептах на основі цементу досліджувався вплив 180, 200 та 220 мл/л при співвідношеннях вода/цемент 0,41; 0,46; 0,51 (за масою) відповідно.

Пісок замінюється на LWA з різним об'ємом (20, 40 або 60%) з різним розміром LWA (0,25...0,5 мм, 0,5...1 мм, 1...2 мм та 2...4 мм) для всіх рідких дозувань.

Таблиця 2.4 – Склад сумішей, виконаних при оптимізованому ущільненні

	Суміш на основі геополімеру	Суміш на основі цементу
Мінерал (мас.)	450 г	434 г
Рідина (об'єм)	140, 160, 180 мл	180, 200, 220 мл
Суміш (об'єм)	640, 660, 680 мл	
Заміна піску	0, 20, 40, 60 %	0, 20, 60 %
LWA розміри	0,25...0,5; 0,5...1; 1...2, 2...4 мм	
Молярність рідини	3 М	–

2.3.2. Суміш з повною заміною на легкий наповнювач LWA, на основі неоптимізованого підходу до ущільнення

На цьому етапі вивчається вплив неоптимізованого ущільнення на густину, теплопровідність та інші властивості бетону. При оптимізованому ущільненні пористість суміші буде мінімальною завдяки певному розподілу між меншими та більшими частинками [15] для досягнення високої міцності. При неоптимізованому ущільненні мінімальна пористість може бути не досягненою. Оскільки, окрім оцінки міцності на стиск, у цьому дослідженні

також визначалася теплопровідність та щільність, в таких випадках неоптимізоване ущільнення може бути бажаним. Щільність та теплопровідність більших частинок значно нижчі порівняно з меншими частинками, що може позитивно вплинути на ці властивості. Використовували частинки LWA розміром 2...4 мм, оскільки опір руйнуванню значно вищий для частинок LWA 2...4 мм порівняно з LWA 4...8 мм.

Досліджено вплив попередньо просоченого LWA на властивості бетону. У попередніх експериментах, заснованих на неоптимізованому ущільненні, спостерігається, що суміші з нанесенням сухого LWA можуть призвести до отримання зразків, які демонструють сегрегацію. При нанесенні сухого LWA рідина може опускатися на дно безпосередньо після заливки. У попередніх дослідженнях [17] спостерігалось, що попередньо просочений LWA може повільно вивільняти рідину в суміш, що може запобігти її безпосередньому опусканню на дно після заливки. Також досліджено, чи призведе застосування попередньо замоченого LWA до отримання суміші без сегрегації та з однорідним розподілом LWA в суміші. У таблиці 2.5 наведено огляд суміші з попередньо замоченим LWA на основі неоптимізованого пакування. Використовується невелика кількість LWA розміром 0,5...1 мм, оскільки попередні експерименти, проведені в цьому дослідженні, показали, що додавання дрібних частинок може збільшити 28-денну міцність на стиск.

Таблиця 2.5 – Склад суміші з попередньо замоченим LWA на основі неоптимізованого пакування

Наповнювачі (об'єм)	660 мл
В'язуче(об'єм)	340 мл
Мінерал (мас.)	450 г
Рідина (об'єм)	160 мл
рідина/суха суміш (за масою)	0,39
Заміна піску	100 %
LWA розміри	90% 2...4 мм; 10 % 0,5...1 мм
Молярність рідини	3 М

2.3.3. Суміш з повною заміною на LWA, на основі оптимізованого підходу до ущільнення

Досліджений вплив оптимізованого ущільнення, оскільки оптимізоване ущільнення може сприяти високій міцності на стиск за рахунок зменшеної пористості через краще ущільнені інгредієнти [15].

Експерименти засновані на оптимізованому ущільненні із застосуванням сухого LWA, призводять до затверділих зразків без відкритих пор, також збільшується міцність на стиск порівняно з експериментами, заснованими на неоптимізованому ущільненні. Крім того, було досліджено вплив цього підходу до ущільнення на густину

Нижчі співвідношення рідина/суха суміш можуть негативно впливати на технологічність, однак, міцність бетону на стиск може зрости [10, 11], досліджено різні співвідношення рідина/суха суміш.

Кількість мінералу PQA може мати значний вплив на щільність бетону, оскільки він має найвищу щільність серед використаних матеріалів у бетоні. Крім того, коли частина мінералу PQA замінюється на LWA, теплопровідність може зменшитися, оскільки в попередніх дослідженнях [2], [9] та [14] було відзначено, що теплопровідність бетону зменшується при нижчих щільностях, оскільки в суміші буде присутнє більше повітря.

У попередніх експериментах, проведених у дрібному масштабі в цьому дослідженні, було відзначено, що щільність та 28-денна міцність на стиск зменшуються при меншій кількості мінералу PQA. Коли використовується 400 замість 492 г/л мінералу PQA на літр, щільність значно зменшується, як результат 28-денна міцність на стиск ще прийнятна, тоді як 28-денна міцність на стиск значно знижується при подальшому зменшенні мінералу PQA.

Досліджено вплив мінералу PQA концентрацією 400 грамів/л на інші властивості бетону. Проведені експерименти, в яких об'єм LWA розміром 4...8 мм замінюється на 2...4 мм.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Опір роздавлюванню LWA розміром 4...8 мм значно нижчий порівняно з LWA розміром 2...4 мм (1,9 порівняно з 2,2 Н/мм²), тоді як щільність та теплопровідність приблизно однакові. Крім того, у попередніх дослідженнях зазначається, що більш однорідний розподіл LWA в суміші може призвести до нижчої теплопровідності [14], тому коли LWA розміром 4...8 мм замінюються на 2...4 мм, теплопровідність може зменшуватися, а міцність на стиск збільшуватися. Досліджено вплив заміни об'єму LWA розміром 4...8 мм на 2...4 мм на властивості бетону.

Досліджено оптимізоване ущільнення на основі мінералу PQA, оскільки в попередніх експериментах використовувалося оптимізоване ущільнення на основі цементу, яке не було повністю оптимізованим через різні значення PSD (щільність шару). Різні співвідношення рідина/порошок у суміші ультралегкого бетону на основі цементу (великомасштабний експеримент).

У таблиці 2.6 наведено різні склади сумішей. В суміші 19.G цементне в'язуче замінено на геополімерне в'язуче зі співвідношенням рідина/суха суміш 0,39 (за масою), оскільки попередні експерименти на основі цього співвідношення, проведені в цьому дослідженні, показали задовільні властивості. У сумішах 25, 26 та 27 використовується нижче співвідношення рідина/суха суміш, оскільки це може збільшити міцність на стиск. Склад сумішей 19.G, 25, 26 та 27 наведено в таблиці 2.6. і таблиці 2.7

Таблиця 2.6 – Склад сумішей 19.G, 25, 26 та 27

Складова	19.G	25	26	27
1 Пісок, г	0	0	0	0
2 LWA 0,25-0,5, г	27	28	28	29
3 LWA 0,5-1,0, г	41	42	43	43
4 LWA 1,0-2,0, г	31	32	33	33
5 LWA 2,0-4,0, г	54	56	57	57
6 LWA 4,0-8,0, г	66	68	69	70
PQA мінерал, г	492	492	492	492
PQA SP, г	4	3	3	3
33% NaOH, г	64	58	55	51
H ₂ O, г	125	115	108	100
Густина (г/л)	905	894	887	879

Таблиця 2.7 – Склад сумішей з різними співвідношеннями рідина/суха суміш

Показник	Суміш 19.G	Суміш 25	Суміш 26	Суміш 27
Наповнювачі (об'єм), мл	628	643	653	663
В'язуче(об'єм), мл	372	357	347	337
Мінерал (мас.), г	492			
Рідина (об'єм), мл	175	160	150	140
рідина/суха суміш (за масою), мл	0,39	0,36	0,34	0,313
Заміна піску	100%			
LWA розміри, мм	0,25...8			
	Оптимізоване пакування на основі цементу ультралегкого бетону			
Молярність рідини	3М			

У таблиці 2.8 наведено склади, різні об'єми геополімерного в'язучого з LWA 4...8 мм та без нього. У сумішах 33 та 34 кількість мінералу PQA зменшена до 400 г/л, оскільки це може позитивно впливати на щільність та теплопровідність. У сумішах 32 та 34 об'єм LWA розміром 4...8 мм замінено на 2...4 мм, оскільки зазначається, що це може позитивно впливати на міцність на стиск та теплопровідність.

Таблиця 2.8 – Склад сумішей з різним об'ємом геополімерного зв'язуючого матеріалу, а також з LWA та без нього розміром 4-8 мм

Показник	Суміш 26, суміш 32	Суміш 33, суміш 34
Наповнювачі (об'єм), мл	653	700
В'язуче(об'єм), мл	347	300
Мінерал (мас.), г	492	400
Рідина (об'єм), мл	150	140
рідина/суха суміш (за масою), мл	0,34	0,39
LWA розміри, мм	Оптимізоване пакування на основі цементу ультралегкого бетону	
	0,2...8 , 0,25...4	0,25...8; 0.25...4
Молярність рідини	3М	

Оптимізований склад на основі мінералу PQA показаний таблиці 2.9. LWA розміром 4...8 мм не використовується, оскільки додавання цієї фракції частинок негативно впливає на міцність на стиск та теплопровідність. Слід використовувати 388 грамів/л мінералу PQA та 140 мл/л рідини, однак у цьому експерименті використовується 174 мл/л рідини зі співвідношенням рідина/суха суміш 0,49 (за масою). Більший об'єм рідини застосовується через погану технологічність суміші. Співвідношення рідина/порошок не збільшується далі, оскільки це може негативно вплинути на міцність на стиск. Потрібно більше рідини для підвищення технологічності суміші.

Таблиця 2.8 – Склад суміші 35 на основі неоптимізованого пакування на основі мінералу PQA

Показник	Суміш 35
Наповнювачі (об'єм), мл	671
В'язуче(об'єм), мл	329
Мінерал (мас.), г	388
Рідина (об'єм), мл	174
рідина/суха суміш (за масою), мл	0,49
LWA розміри, мм	Оптимізоване пакування на основі ультралегкого бетону та PQA мінералах
	0,25...4
Молярність рідини	3М

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Результати досліджень зразків із частковою заміною піску на LWA

Заміна піску, різні розміри LWA та різні співвідношення рідина/порошок для цементу та геополімерної суміші зумовлює зміну їхніх властивостей. Погіршується технологічність при застосуванні LWA з меншим розміром частинок, що можна пояснити збільшеною питомою поверхнею. Коли питома площа поверхні більша, більша кількість рідини прилипає до частинок, що призводить до меншої кількості доступної рідини для покращення технологічності, це також зазначено в дослідженнях [4].

На рисунках 3.1 та 3.2 проілюстровано розраховані густини на основі різних замін (об'ємів) піску на LWA для різних доз рідини.

Густина

Густина сумішей зменшується зі збільшенням об'єму заміни піску на LWA через значно нижчу густину LWA. Більші частинки мають більший вплив порівняно з меншими частинками через ще нижчу густину більших частинок

У таблиці 3.1 наведено вплив розміру частинок та об'єму рідини на густину. Це демонструється нахилом різних графіків для різних розмірів частинок та кількості рідини, наведених залежно від густини. Показано, що густина зменшується швидше, якщо використовуються більші частинки, тому чим більший нахил, тим вищий цей ефект. Також показано, що густина зменшується швидше для меншого об'єму рідини. Коли застосовується менше рідини, використовується більше LWA, зменшується густина. Ці характеристики також спостерігаються, коли цемент застосовується як в'язуча речовина.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

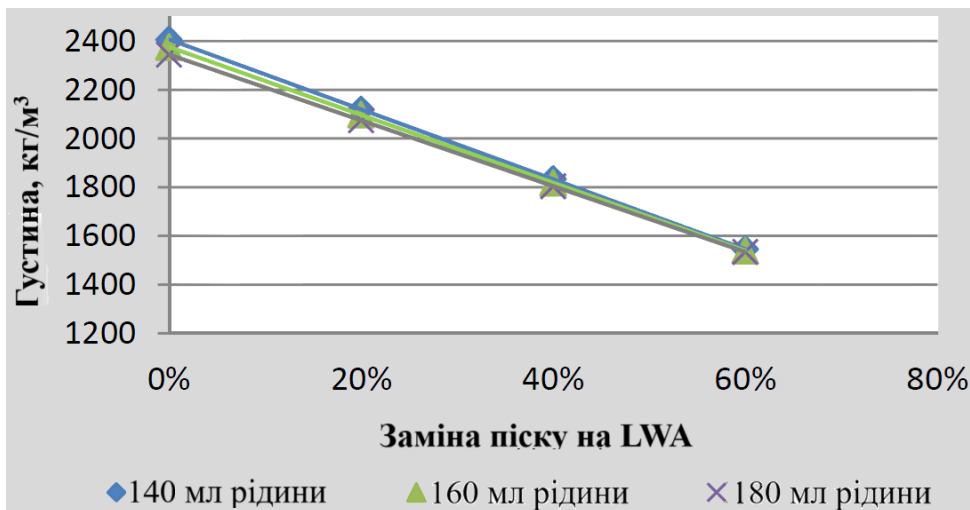


Рисунок 3.1 – Розрахункова густина при заміні піску на LWA розміром 0,25...0,5 мм з різною кількістю рідини (суміші геополімеру)

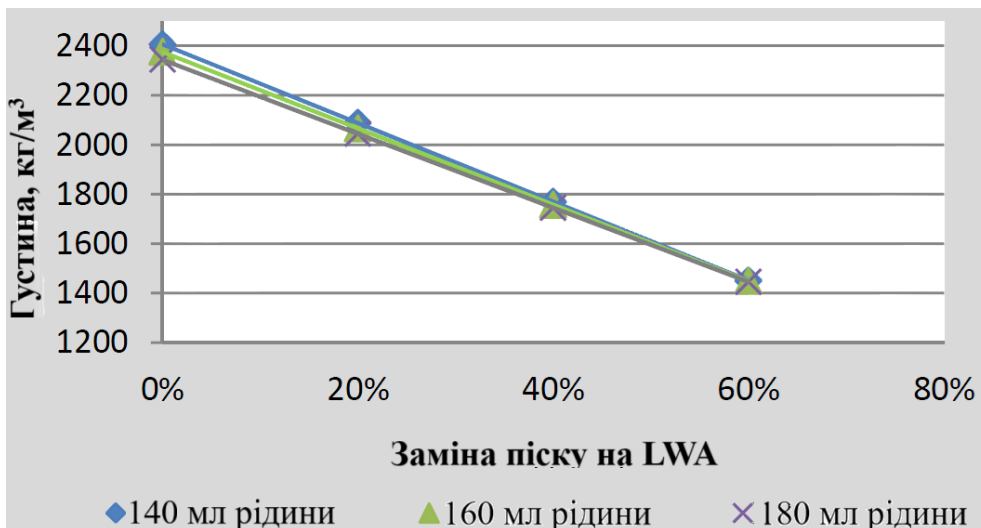


Рисунок 3.2 – Розрахункова густина при заміні піску на LWA розміром 2...4 мм з різною кількістю рідини (геополімеру)

На рисунках 3.3 та 3.4 наведено розраховану та експериментально визначену густину на основі різної заміни піску (за об'ємом) на LWA з різними розмірами 0,25...0,5 мм та 2...4 мм відповідно.

Таблиця 3.1 – Залежність між густиною та заміною піску для різних розмірів частинок та кількістю рідини

Розрахунковий нахил різних графіків (Rc)				
Об'єм рідини, мл	0,25...0,5 мм LWA	0,5...1,0 мм LWA	1,0...2,0 мм LWA	2,0...4,0 мм LWA
140	-1434,8	-1496	-1564	-1591,2
160	-1392,6	-1452	-1518	-1544,4
180	-1350,4	-1408	-1472	-1497,6

Розраховані густини для сумішей із зв'язуючим на основі геополімеру та цементного зв'язуючого дуже схожі між собою, тоді як густина мінералу PQA нижча порівняно з цементом. Менша маса цементу порівняно з мінералом PQA у в'язуючому є причиною цього явища.

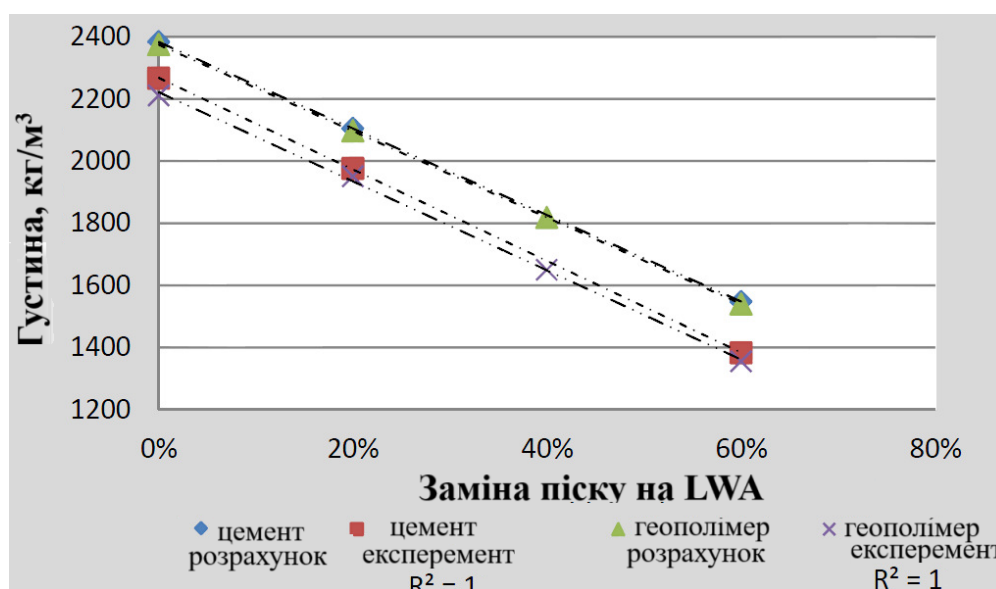


Рисунок 3.3 – Залежність густини геополімерних сумішей (160 мл/л рідини) та цементних сумішей (200 мл/л води) від заміни піску на 0,25...0,5 мм LWA

Експериментально визначені густини (суміші на основі геополімеру та цементу) близькі одна до одної, але експериментально визначена густина для сумішей з геополімеру дещо нижча порівняно із сумішами з цементом. В'язкість цементної суміші нижча порівняно із сумішшю геополімеру через відсутність NaOH [10], що також може сприяти кращому ущільненню. Завдяки легшому ущільненню, повітряні порожнини можуть легше виходити

із суміші, що може призвести до вищої експериментально визначеної густини.

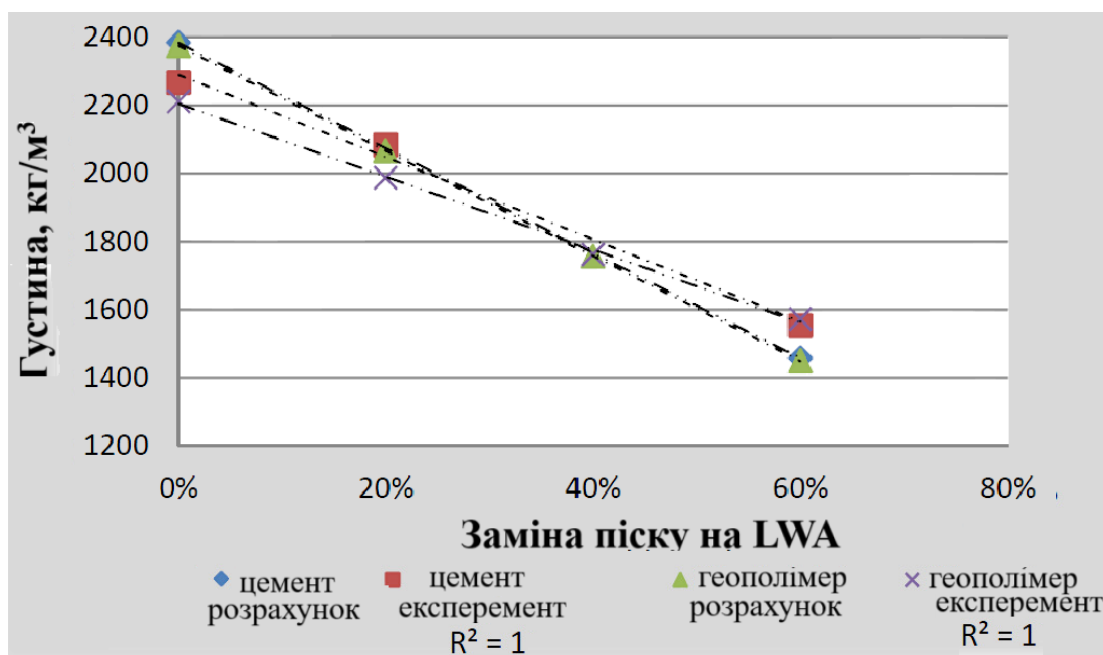


Рисунок 3.4 – Залежність густини геополімерних сумішей (160 мл/л рідини) та цементних сумішей (200 мл/л води) від заміни піску на 2...4 мм LWA

Попередні дослідження показали, що у звичайних бетонних сумішах [13, 15] захоплюється близько 3% повітря. У сумішах на основі геополімеру (без заміни піску) це становить близько 6...8% , оскільки суміші були вологими.

Експериментально визначена густина вища порівняно з розрахунковою густиною при більшому об'ємі заміщення (> 40%) для LWA розміром 0,5...1, 1...2 та 2...4 мм, що збільшується при більших розмірах. Це може бути пов'язане з тим, що більші частинки мають вище водопоглинання порівняно з меншими частинками. Коли LWA поглинає більше рідини, експериментально визначена густина вища, оскільки видима маса суміші збільшується.

Міцність на стиск

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

На рисунках 3.5...3.8 показано міцність на стиск на основі зміни міцності через 7 днів для сумішей геополімерів з концентрацією рідини 160...180 мл/л та LWA з розміром частинок 0,25...0,5 та 1...2 мм.

Заміна піску на LWA призвела до зниження міцності на стиск. Чим вищий ступінь заміни, тим більший ефект. Причиною цього може бути нижчий опір роздавлюванню LWA порівняно з піском.

Через 7 днів міцність нижча, у випадку, коли більший об'єм піску замінюється на LWA. Через водопоглинання швидкість поліконденсації з часом може бути нижчою, що може призвести до більш пористої мікроструктури та нижчої міцності на стиск.

Суміші на основі більших частинок мають дещо вищу 28-денну міцність на стиск порівняно із сумішами на основі менших частинок. Більший об'єм рідини не призводить до зниження міцності на стиск. Це може бути пов'язано з тим, що суміші були вологими. Більша кількість рідини призводить до більш вологих сумішей, які легше ущільнювати порівняно з сухими сумішами. Краще ущільнення може призвести до вищої міцності на стиск.

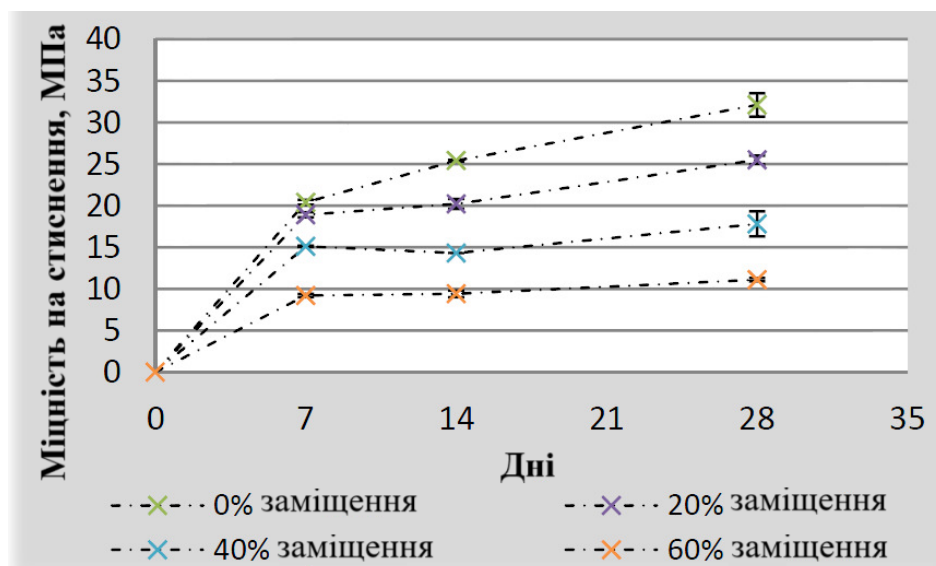


Рисунок 3.5 – Зміна міцності на стиск при заміні піску на LWA 0,25...0,5 мм при застосуванні рідини 160 мл/л (суміші геополімеру) залежно від часу

Іншою причиною може бути вища абсолютна кількість NaOH у в'язучій речовині. Більша кількість рідини (а разом з нею і вища абсолютна кількість NaOH) може збільшити швидкість поліконденсації.

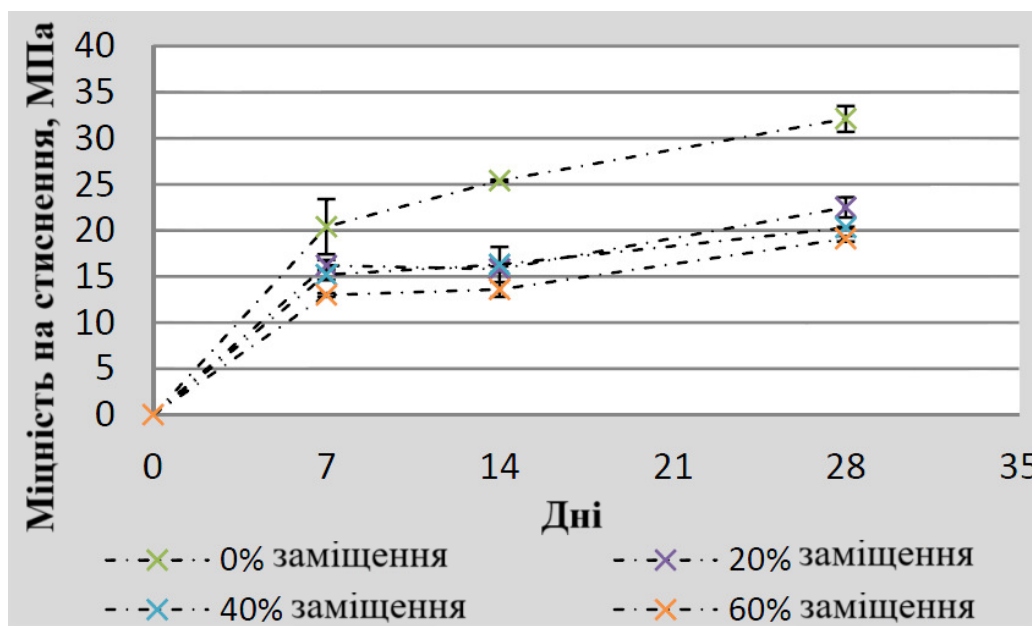


Рисунок 3.6 – Зміна міцності на стиск при заміні піску на LWA 1...2 мм при застосуванні рідини з концентрацією 160 мл/л (суміші геополімеру) залежно від часу

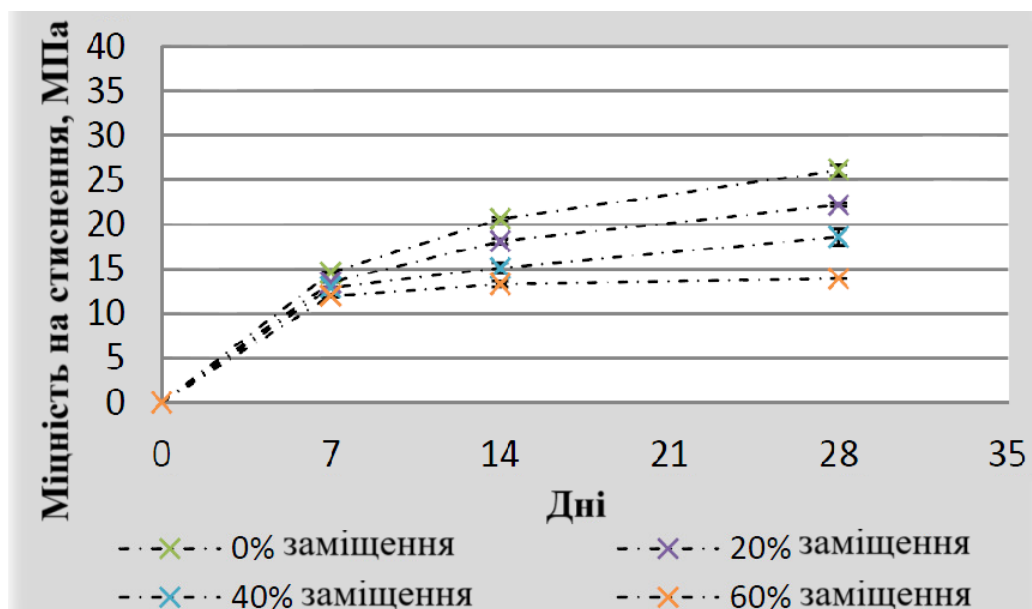


Рисунок 3.7 – Зміна міцності на стиск при заміні піску на LWA 0,25...0,5 мм у сумішах, де застосовується 180 мл/л (суміші геополімеру) залежно від часу

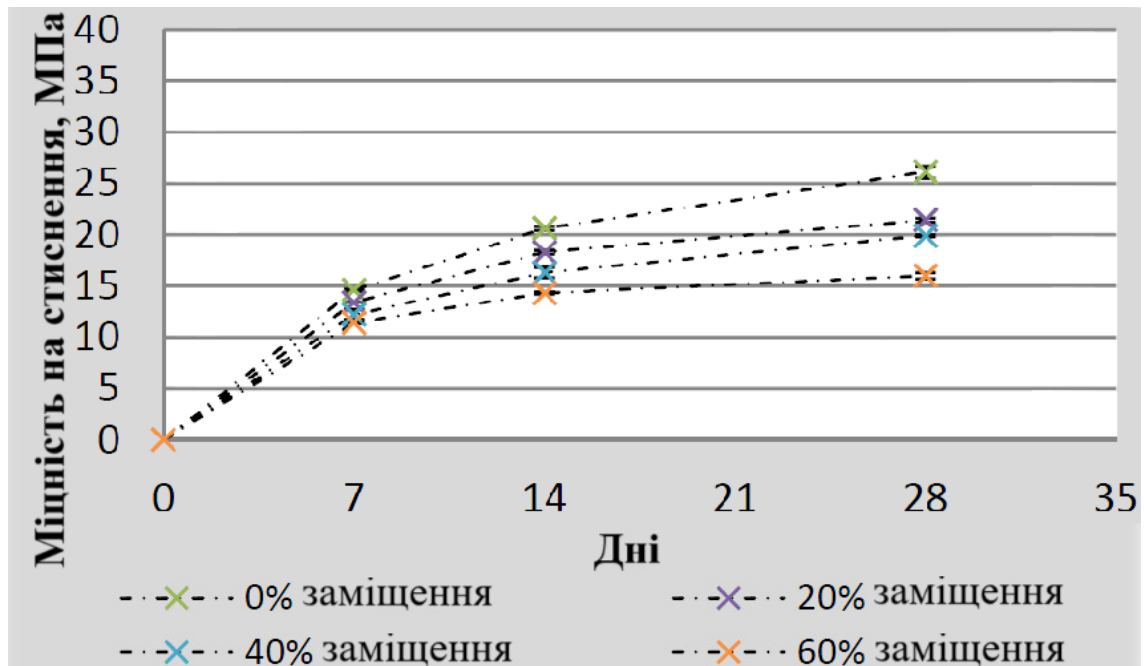


Рисунок 3.8 – Зміна міцності на стиск при заміні піску на LWA 1...2 мм у сумішах, де застосовується 180 мл/л рідини (суміші геополімеру) залежно від часу

На рисунках 3.9 та 3.10 показано розвиток міцності до 28 днів для сумішей на основі цементу. Показано, що для сумішей з 0, 20 або 60% заміни (за об'ємом) піску на LWA після 7 днів твернення подальшого розвитку міцності не відбувається. Це відрізняється від сумішей на основі геополімерного в'язучого (рисунки 3.5 - 3.8), які мають незначний розвиток міцності після 7 днів.

Також спостерігається в експериментах на основі геополімеру, залишок рідини в суміші для розвитку міцності після 7 днів мінімальний. Для сумішей на основі цементу можливо, що рідини не залишилося достатньо для реакції протягом певного періоду часу. У такому разі розвиток міцності з часом не спостерігається.

Незначне зниження міцності спостерігається між 7 та 14 днями в сумішах на основі цементу, що може бути викликано помилками ручного ущільнення.

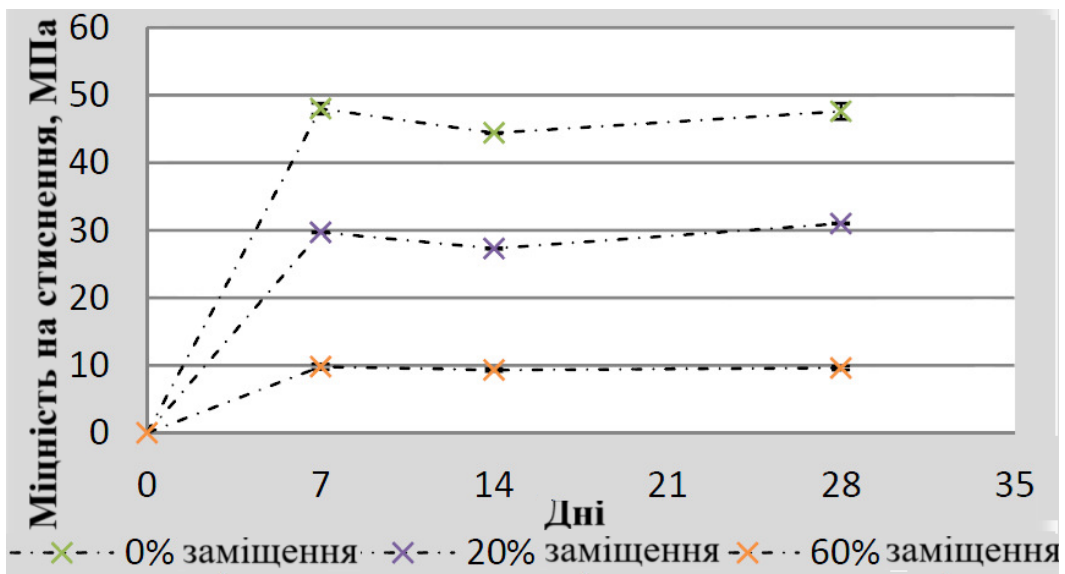


Рисунок 3.9 – Міцність на стиск протягом кількох днів для сумішей з 200 мл/л рідини та 0,25...0,5 мм LWA (цементні суміші)

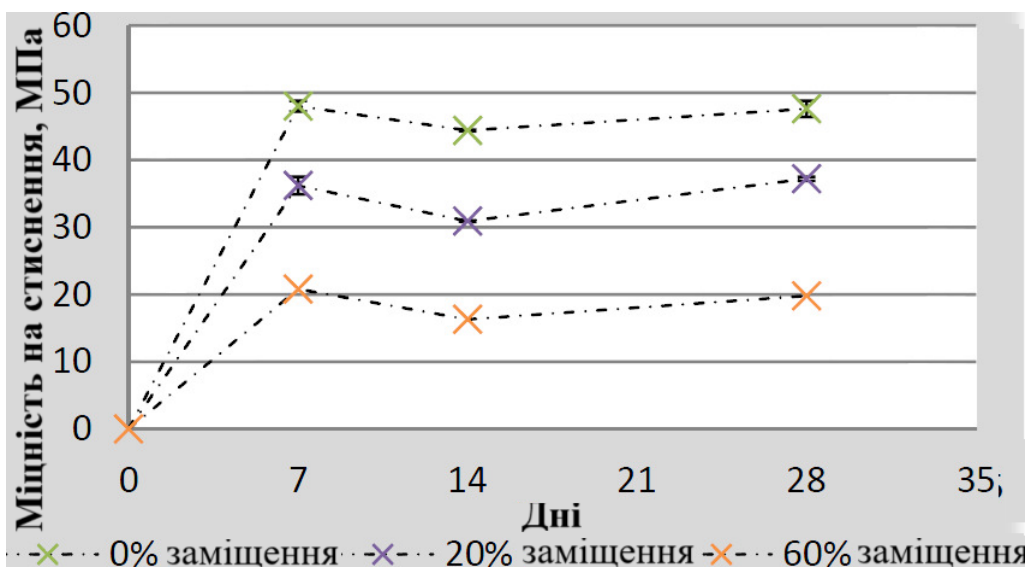


Рисунок 3.10 – Міцність на стиск протягом кількох днів для сумішей з концентрацією рідини 200 мл/л та шаром LWA 1...2 мм (цементні суміші)

На рисунках 3.11 та 3.12 проілюстровано 28-денну міцність на стиск на основі різних об'ємів заміщення (пісок за допомогою LWA). Ефект показано

для сумішей на основі геополімеру та цементних в'язучих на одному графіку.

Початкова міцність бетонів на основі геополімеру та цементу не є рівнозначною через різні співвідношення рідина/суха суміш, проте зниження міцності більше зі збільшенням кількості заміщення LWA для сумішей на основі цементу порівняно із сумішами на основі мінералу PQA. За допомогою каскадного тесту на вилуговування спостерігається, що SiO_2 у LWA розчиняється розчином NaOH . У попередніх дослідженнях [6] спостерігається, що геополімерне в'язуче з вищим співвідношенням Si/Al може мати вищу міцність на стиск.

Шляхом розчинення SiO_2 у LWA опір роздавлюванню LWA може зменшуватися, проте співвідношення Si/Al геополімерного в'язучого збільшується, що може збільшити міцність в'язучого на стиск. Це може сприяти меншій втраті міцності геополімерного бетону порівняно з цементним бетоном.

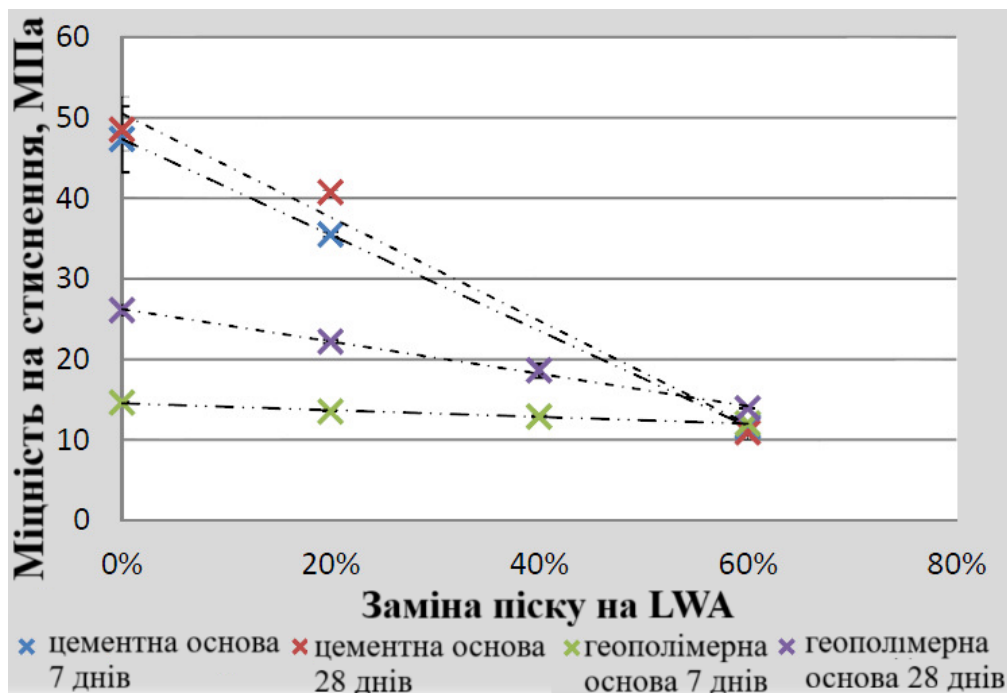


Рисунок 3.11 – Міцність на стиск сумішей на основі геополімеру (180 мл/л рідини) та цементних сумішей (220 мл/л води) при заміні піску на LWA розміром 0,25...0,5 мм

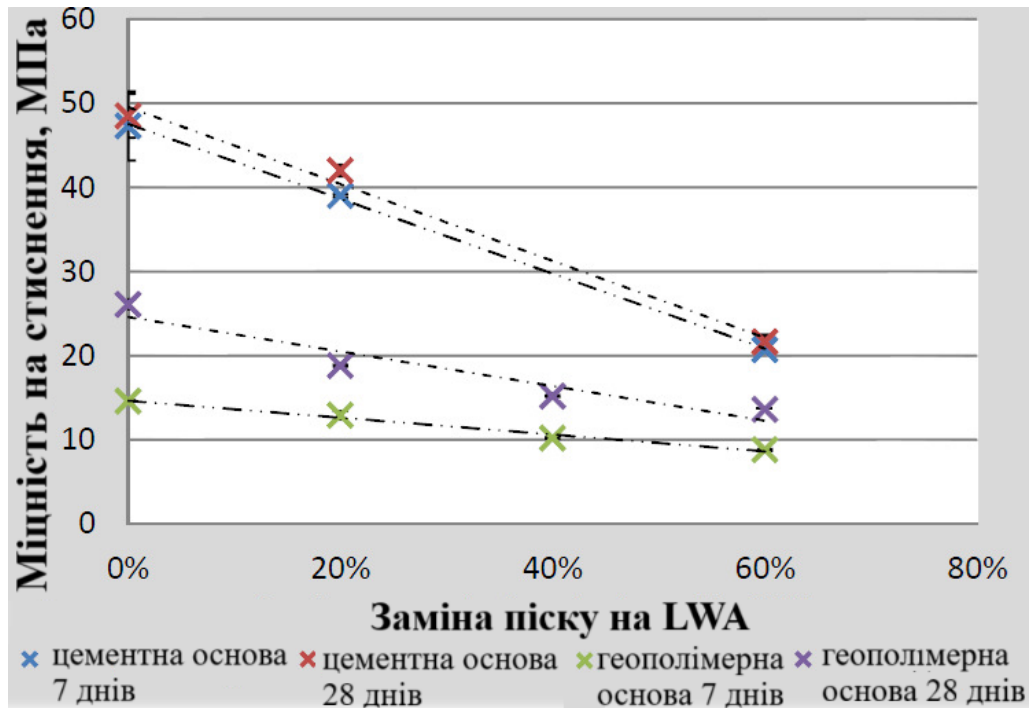


Рисунок 3.12 – Міцність на стиск сумішей на основі геополімеру (180 мл/л рідини) та цементних сумішей (220 мл/л води) при заміні піску на LWA розміром 2...4 мм

Отже, за часткової заміни піску на легкий заповнювач LWA спостерігається:

- краща технологічність для сумішей з більшими частинками порівняно з меншими. Це можна пояснити збільшенням питомої площі поверхні при нанесенні дрібних частинок, оскільки більше рідини прилипає до LWA, коли питома площа поверхні вища. Це призведе до меншої кількості доступної рідини для приготування, що зумовить погіршення технологічності.

- розрахункова густина нижча, коли пісок замінюється на LWA розміром 2...4 мм, ніж коли його замінюють на LWA розміром 0,25...0,5 мм, що очікувано, оскільки густина більших частинок нижча порівняно з меншими частинками.

- експериментально визначена густина вища при більшій кількості заміни піску, коли використовується LWA розміром 2...4 мм замість 0,25...0,5 мм. Це нетипово, оскільки густина більших частинок нижча

порівняно з густиною менших частинок. Однак, вище водопоглинання більших частинок порівняно з меншими частинками може сприяти отриманню суміші з вищою експериментально визначеною густиною. Крім того, в сумішах з меншими частинками може бути захоплено більше повітря через гіршу технологічність та більшу питому поверхню, що може призвести до нижчої експериментально визначеної густини.

–експериментально визначена густина вища порівняно з розрахованою густиною при більшому об'ємі заміни піску на LWA розміром 2...4 мм. Це також спостерігається для LWA 1...2 мм та 0,5...1 мм, однак, у меншій мірі. Для LWA 0,25...0,5 мм це не показано. Це демонструє, що більші частинки поглинають значну кількість рідини/води в сумішах, і що водопоглинання більших частинок вище порівняно з меншими частинками.

– міцність на стиск зменшується, коли щільність зменшується через заміну піску на LWA. Усі частинки, здаються, мають порівнянний ефект. Крім того, міцність на стиск вища в сумішах на основі цементу, коли частина піску замінюється на LWA 2...4 мм порівняно з LWA 0,25...0,5 мм. Це нетипово, оскільки опір роздавлюванню LWA 0,25...0,5 мм вищий порівняно з LWA 2...4 мм. Суміш на основі дрібних частинок показала погану технологічність і була вологою, що можна пояснити більшою питомою поверхнею LWA. Погана технологічність може призвести до поганого ущільнення, що може спричинити утворення зразків з повітряними пустотами, що призводить до зниження міцності на стиск.

– втрата міцності при більшій кількості заміни піску на LWA більш помітна для сумішей на основі цементного в'язучого порівняно із сумішами на основі геополімерного в'язучого. Як зазначалося, розчинений SiO_2 з LWA в NaOH може сприяти збільшенню міцності на стиск геополімерного в'язучого. Це може призвести до меншої втрати міцності бетонів на основі геополімеру при більшій кількості заміни піску.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– суміші на основі геополімерного в'язучого демонструють зростання міцності після 7 днів твердіння (0...40%), тоді як міцність сумішей на основі цементу залишається постійною після 7 днів. У суміші на основі цементу може бути недостатньо рідини для збільшення міцності на стиск з часом.

– спостерігається, що, незважаючи на те, що вимірювання міцності виконуються на одній призмі, результати є точними. Однак слід враховувати, що зразки ущільнюються вручну, що може призвести до похибок.

3.2. Результати випробувань зразків з повною заміною піску на LWA, на основі неоптимізованого підходу до ущільнення

У малому масштабі експерименти проводяться з рецептами на основі мінералу PQA 450 грамів/л, 140 або 160 мл/л рідини та LWA, яка складається з 80...95% LWA 2...4 мм та 5%...20% LWA 0,25...0,5 мм.

Показано, що суміші з 90...95% 2...4 мм та 5...10% 0,25...0,5 мм LWA, 450 грамів/л мінералу PQA та 160 мл/л рідини показали задовільні результати, тоді як суміші, що містили 140 мл/л, були занадто сухими. Розрахункова та експериментально визначена густина становить від 840 до 860 кг/м³ та від 880 до 920 кг/м³ відповідно, а міцність на стиск через 28 днів становить близько 9...10 МПа.

Суміші з 450 грамів/л мінералу PQA, 160 мл/л рідини та LWA, що складається з 90...95% (за об'ємом) 2...4 мм LWA та 5...10% 0,25...0,5 мм та/або 0,5...1 мм LWA, випробувалися у великому масштабі. На рисунку 3.13 а показано, що суміші були вологими, це може бути спричинено різним підходом до змішування для великомасштабних експериментів порівняно з дрібномасштабними експериментами. Отримано погану технологічність, що призвело до незадовільного ущільнення. Затверділі зразки мають відкриті порожнини (показано на рисунках 3.13 б та 3.13 в) через незадовільне ущільнення, і як наслідок гірші властивості.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункова щільність, експериментально визначена та після сушіння в печі становлять близько 820, 830 та 710 кг/м³ відповідно, а міцність на стиск через 28 днів становить від 8 до 10 МПа. Теплопровідність становить від 0,153 до 0,232 Вт/(м·К), а проникнення води під тиском – від 16,0 до 26,0 мм.



а

б

в

Рисунок 3.13 – Суміш геополімеру із повною заміною піску на LWA:

а – волога суміш; б – порожнини в зразках; в – розподіл LWA в ULWC на основі неоптимізованого упакування

Суміш з вищою кількістю рідини досліджувалася, щоб з'ясувати, чи матиме це позитивний вплив на технологічність. Суміш з 450 г/л мінералу PQA, 180 мл/л рідини (замість 160 мл/л) та LWA, що містить 95% та 5% LWA з розміром частинок 2...4 мм та 0,25...0,5 мм відповідно, є більш вологою у свіжому стані, це призводить до сегрегації, що робить результати ненадійними (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Розділення у разі надмірної кількості рідини

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Затверділі властивості схожі із сумішшю , яка містить 160 мл/л рідини.

Досліджено вплив попереднього замочування LWA на властивості бетону на основі неоптимізованого ущільнення. Експеримент базувався на 450 грам/л мінералу PQA, 160 мл/л рідини та LWA, що містить 90% LWA 2...4 мм та 10% LWA 0,5...1,0 мм, при цьому LWA попередньо замочується.

Суміш з попередньо замоченим LWA представлена на рисунках 3.15 та 3.16, як бачимо у зразку є значно менша кількість бульбашок повітря у затверділому стані порівняно зі зразками, в яких застосовувалися сухі LWA. У попередніх дослідженнях зазначалося, що попередньо замочені заповнювачі можуть повільно вивільняти попередньо замочену рідину в суміш, що сприятиме розвитку міцності з часом [13]. Крім того, це може запобігти сегрегації зразка, оскільки спочатку у в'язучому є менше рідини. Також, коли рідина присутня в LWA, NaOH не потрапляє в LWA, що може запобігти розчиненню LWA, з одного боку, а з іншого боку, у зв'язуючій речовині доступно більше NaOH, що сприяє розвитку міцності зв'язувальної речовини.

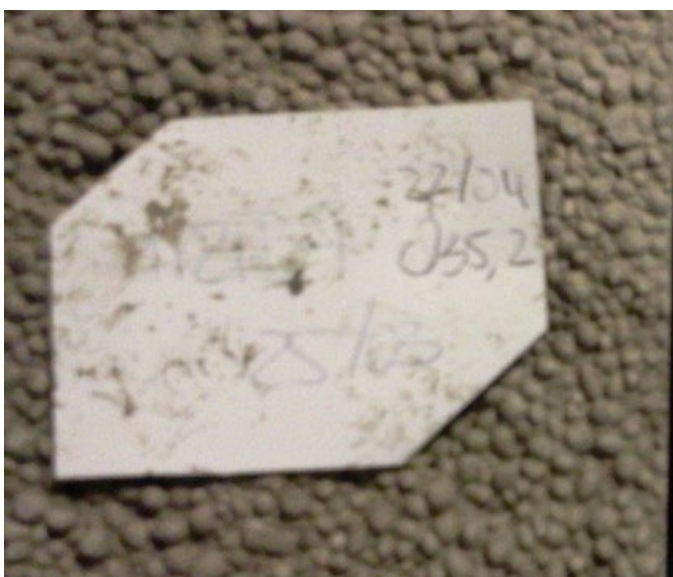


Рисунок 3.15 – Верхня частина затверділого зразка суміші з попередньо просоченою LWA заповнена пастою

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.16 – Зразок із попередньо просоченим LWA має кілька відкритих порожнин

На рисунку 3.17 показано експериментально визначені, розраховані та висушені в печі густини сумішей як для сухого, так і для попередньо замоченого (водою) LWA зразків.

Розраховані та експериментально визначені густини близькі за значенням (близько 840 кг/м^3). Густина висушеної в печі трохи нижча для суміші, виготовленої з попередньо замоченим LWA, порівняно із сумішшю, виготовленою з сухим LWA.

У суміші може бути використана більша кількість води, ніж розрахована, через вище водопоглинання LWA. Це може сприяти нижчій густині висушеної в печі, оскільки в сухому стані може випаровуватися більше рідини.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

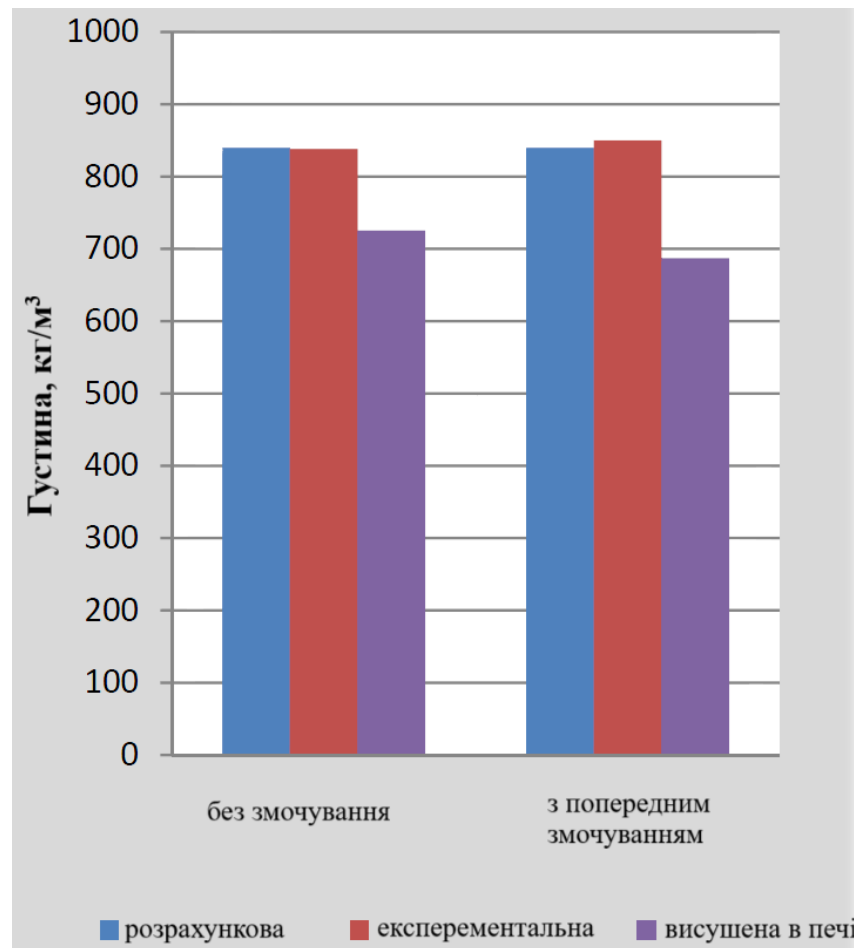


Рисунок 3.17 – Густина сумішей із сухим та попередньо замоченим LWA

Міцність на стиск

На рисунку 3.18 показано розвиток міцності для сумішей із застосуванням сухого та попередньо замоченого LWA. Спостерігається незначне збільшення розвитку міцності через 7 днів для суміші з попередньо замоченим LWA.

Як згадувалося, це може бути спричинено тим, що в LWA присутня вода, яка може повільно виходити під час реакції з мінералом [7]. Крім того, коли LWA попередньо замочується, менше NaOH поглинається частинками, що призводить до збільшення кількості NaOH, доступного для реакції. Міцність на стиск через 28 днів становить 9 МПа для обох сумішей, тобто більша кількість NaOH у суміші не збільшує міцність.

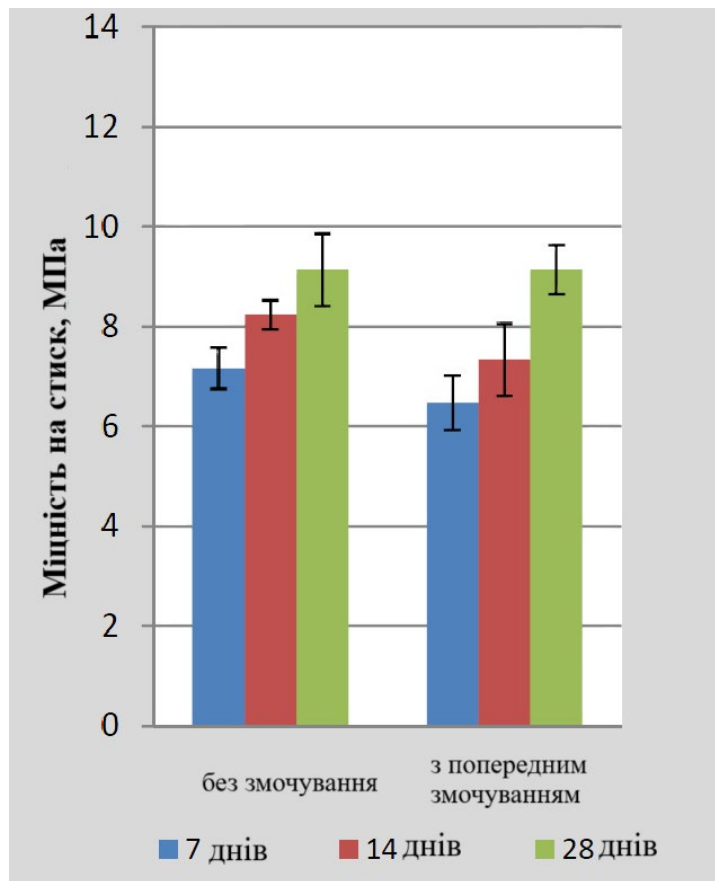


Рисунок 3.18 – Міцність на стиск сумішей із сухим та попередньо замоченим LWA

Теплопровідність

Теплопровідність становить 0,193 Вт/(м·К) для суміші з сухими частинками та 0,133 Вт/(м·К) для суміші з попередньо замоченими частинками. Зразки з сухими частинками містять відкриті порожнини, тоді як зразки з попередньо замоченим LWA мають лише кілька бульбашок повітря. Відкриті порожнини можуть призвести до вищої теплопровідності. Іншою причиною може бути те, що попередньо замочені частинки можуть бути захищені від розпаду частинок NaOH, оскільки частинки заповнені водою. Цілий LWA може краще сприяти нижчій теплопровідності порівняно з пошкодженими частинками.

У таблиці 3.1 наведено огляд властивостей сумішей з неоптимізованим ущільненням (450 грам/л мінералу PQA, 160 або 180 мл/л рідини та LWA, що складається з 90...95% 2...4 мм та 5...10% 0,25...0,5 та/або 0,5...1 мм).

Найбільш задовільною сумішшю є суміш із попередньо замоченим LWA. Міцність на стиск через 28 днів становить 9,1 МПа, розрахункова, експериментально визначена та висушена в печі густина становить 840, 850 та 687 кг/м³ відповідно, а теплопровідність становить 0,133 Вт/(м·К). Особливо теплопровідність у цій суміші нижча (0,133 порівняно з 0,15...0,24 Вт/(м·К)), що може бути пов'язано з тим, що ці зразки мають менше відкритих порожнин.

Іншою причиною може бути те, що частинки можуть бути захищені від розчинення NaOH через наявність води. Непошкоджені частинки можуть краще сприяти нижчій теплопровідності порівняно з пошкодженими частинками.

Міцність на стиск через 28 днів безпосередньо не пов'язана з густиною. Міцність на стиск усіх сумішей через 28 днів становить близько 9 МПа. Можна припустити, що міцність на стиск буде вищою для сумішей з більшою кількістю дрібних частинок через вищий опір дрібних частинок роздавлюванню, проте, оскільки отримано погане ущільнення, результати можуть бути ненадійними.

Коли висушені в печі зразки піддають дії температури 600 °С протягом однієї години, міцність на стиск зменшується на 60...70. Це значно вище порівняно з результатами, отриманими в дослідженнях, які становлять близько 26% [13].

Однак, слід враховувати, що використовуються висушені в печі зразки, які можуть мати змінену мікроструктуру порівняно зі зразками, які тверднуть при кімнатній температурі. Це може сприяти більшій втраті міцності, оскільки зразки можуть вже мати втрату міцності в сухому стані.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Властивості сумішей на основі неоптимізованого пакування

Показник	450 грамів PQA мінерал, 160 мл рідини, 95%, LWA = 2,0...4,0 мм, 5% = 0,25...0,5 мм	450 грамів PQA мінерал, 160 мл рідини, 90%, LWA = 2,0...4,0 мм, 10% = 0,2...0,5 мм	450 грамів PQA мінерал, 160 мл рідини, 95%, LWA = 2,0...4,0 мм 5% LWA = 0,5...1,0 мм	450 грамів PQA мінерал, 160 мл рідини, 90%, LWA = 2,0...4,0 мм 10% = 0,5...1,0 мм	450 грам PQA мінерал, 160 мл рідини, 90% LWA = 2,0...4,0 мм, 5% = 0,25...0,5 мм, 5% = 0,5...1,0 мм	LWA у воді за годину до змішування. 450 грамів мінералу PQA, 160 мл рідини, 90% LWA = 2,0...4,0 мм, 10% = 0,5...1,0 мм	450 грамів PQA мінералу, 180 мл рідини, 95% LWA = 2,0-4,0 мм, 5% = 0,25-0,5 мм
Експериментальна густина (кг/м ³)	852	81	835	838	847	850	861
Густина після сушіння в печі (кг/м ³)	725	742	711	725	721	687	681
28 -денна міцність на стиск (МПа)	8,4	9,4	8,9	9,1	9,8	9,1	9,0
Теплопровідність (В/(м·К))	0,153	0,232	0,214	0,193	0,168	0,133	0,165
Проникнення води під тиском (мм)	25,7	18,7	21,0	26,0	16,0	x	x

3.3. Результати досліджень зразків з повною заміною піску на LWA, на основі оптимізованого підходу до ущільнення

Як зазначено в розділі 2.3, досліджувалася можливість заміни цементного в'язучого на геопелімерне в ультралегкому бетоні [3]. Суміші розроблені на основі оптимізованого ущільнення ультралегкого бетону на основі цементу з використанням мінералу PQA 492 грам/л та 175-140 мл/л рідини замість цементу та води. Використовуються різні співвідношення рідина/суха суміш, оскільки в попередніх дослідженнях спостерігалось, що менша кількість рідини може призвести до вищої міцності на стиск [9, 10, 14].

Технологічність сумішей значно покращується при використанні більшого об'єму рідини порівняно із сумішами з меншим об'ємом рідини. Крім того, технологічність значно знижується з часом (рисунки 3.19, 3.20).

Рисунок 3.19–Технологічність суміші одразу після змішування при використанні рідини з концентрацією 160 мл/л



Рисунок 3.20 – Технологічність суміші після 60 хвилин змішування при використанні рідини з концентрацією 160 мл/л

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунках 3.21 та 3.22 показано текучість та осідання сумішей з різними об'ємами рідини (з оптимізованим ущільненням на основі цементу). Як згадувалося, технологічність значно знижується при нижчих дозах рідини та з часом.

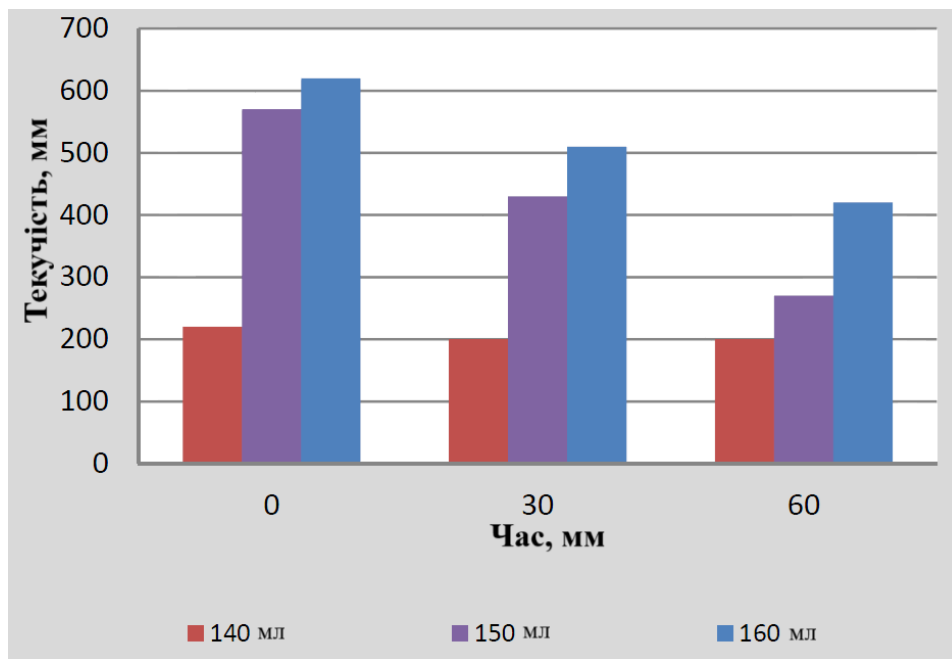


Рисунок 3.21 – Текучість сумішей з оптимізованим ущільненням з однаковим об'ємом мінералу та різною кількістю рідини

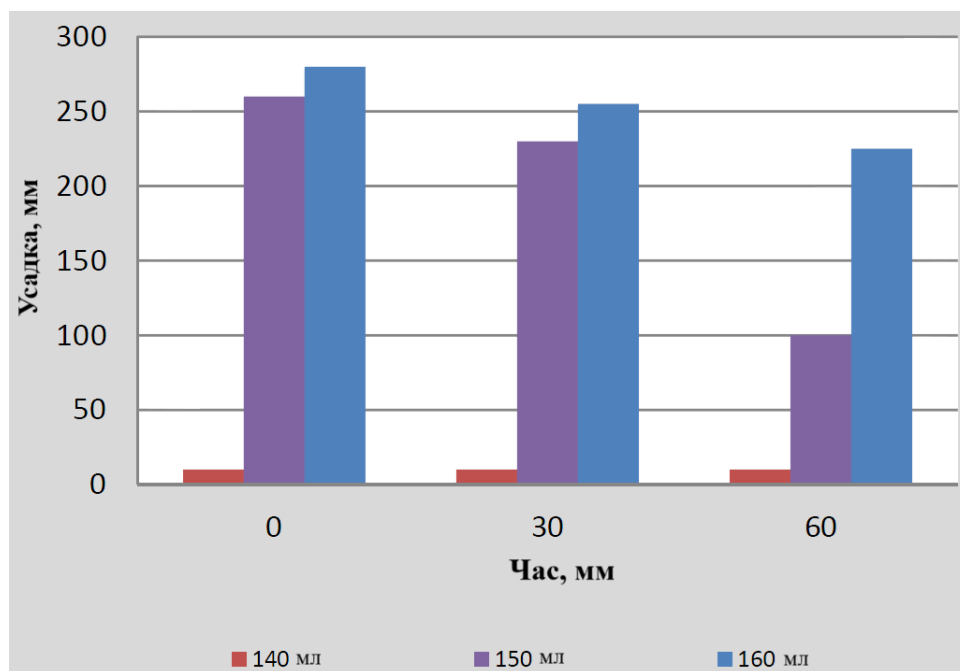


Рисунок 3.22 – Усадка сумішей з оптимізованим ущільненням з однаковим об'ємом мінералу та різними дозами рідини

Водопоглинання LWA може бути причиною цього. Для суміші зі 140 мл/л рідини безпосередньо після змішування немає технологічності ($t = 0$ хвилин).

На рисунку 3.23 показано густину різних сумішей експериментально визначену, розраховану та після сушіння в печі.

Розрахована густина збільшується при більшій кількості рідини, проте немає зв'язку між експериментально визначеною густиною та кількістю рідини.

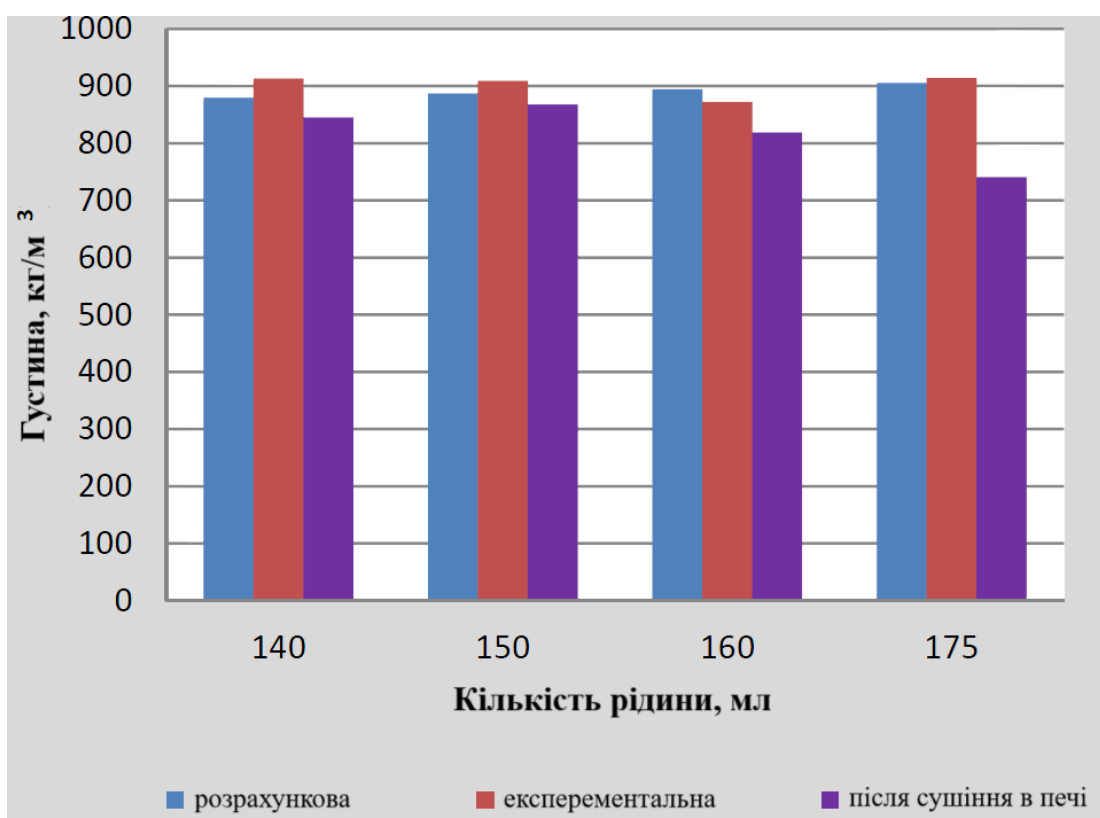


Рисунок 3.23 – Густина сумішей з різною кількістю рідини

Міцність на стиск

На рисунку 3.24 показано міцність на стиск для сумішей з різним часом тверднення. Набір міцності від 7 до 28 днів становить приблизно 1 МПа для сумішей зі 140, 150 або 160 мл/л рідини. Набір міцності становить приблизно 2 МПа при використанні 175 мл/л рідини. У суміші із 175 мл/л рідини може бути більше вільної рідини, що зумовлює збільшення тривалості реакції

поліконденсації, що призводить до підвищення властивості набування міцності з часом.

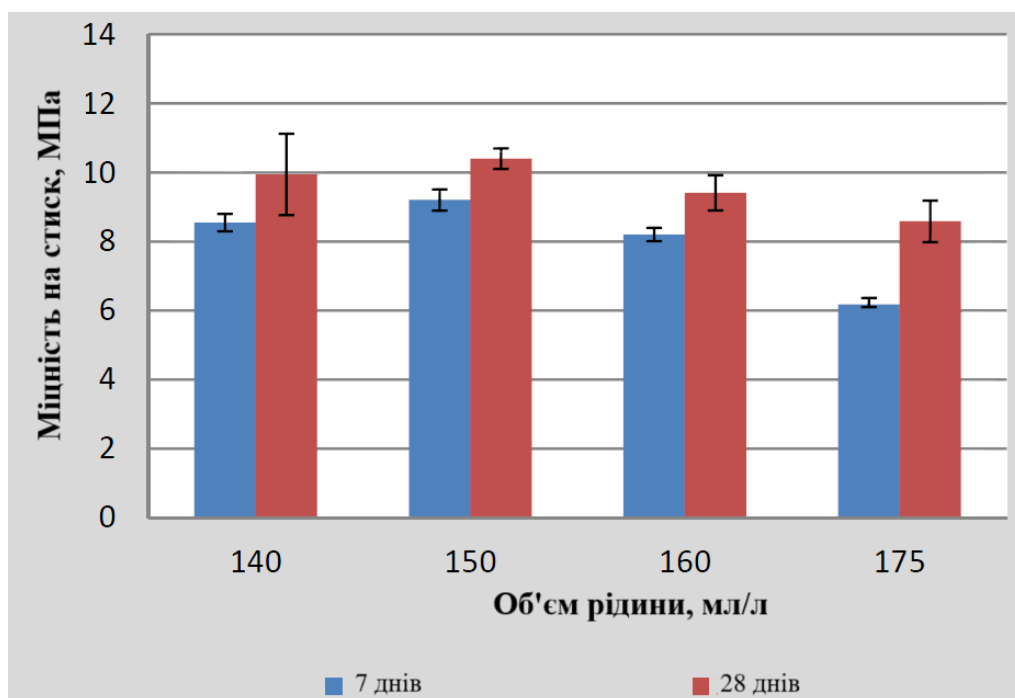


Рисунок 3.24 – Міцність на стиск сумішей, отриманих із застосуванням різних об'ємів рідини

Стандартне відхилення 28-денної міцності на стиск при застосуванні рідини з концентрацією 140 мл/л вище порівняно з іншими сумішами. Суміш зі 140 мл/л рідини не має потрібної технологічності, що може призвести до поганого ущільнення і бути причиною високого відхилення від еталону. Таким чином, можна зробити висновок, що кількість рідини 140 мл/л є занадто малою для цього рецепту.

Суміш зі 150 мл/л рідини демонструє найвищу 28-денну міцність на стиск. Недостатня кількість води/рідини призводить до поганої технологічності, що призводить до неоднорідної структури.

Коли використовується занадто багато рідини (160 та 175 мл/л рідини), надлишок рідини призводить до зниження міцності на стиск. На рисунку 3.25 показано 28-денну міцність на стиск у залежності від густини. Як видно з рисунку, немає чіткого зв'язку між 28-денною міцністю на стиск та експериментально визначеною густиною. Однією з причин цього

можуть бути коливання оброблюваності. Коли оброблюваність погана, ущільнення може бути поганим, що спричиняє відхилення в експериментально визначеній густині через велику кількість повітря, що знаходиться в суміші.

Міцність на стиск, зменшується при нижчій розрахунковій густині, що суперечить результатам, отриманим у попередніх дослідженнях [9, 12]. Однак у сумішах з вищою густиною об'єм рідини більший, а об'єм LWA менший, що призводить до вищої густини. Як згадувалося, при вищих співвідношеннях рідина/суха суміш міцність на стиск зменшується, проте експериментально визначена густина збільшується, що може бути причиною того, що експериментально визначена густина збільшується при нижчій міцності на стиск. Крім того, це вказує на те, що вища абсолютна кількість NaOH (при більшому дозуванні рідини) не сприяє міцності на стиск.

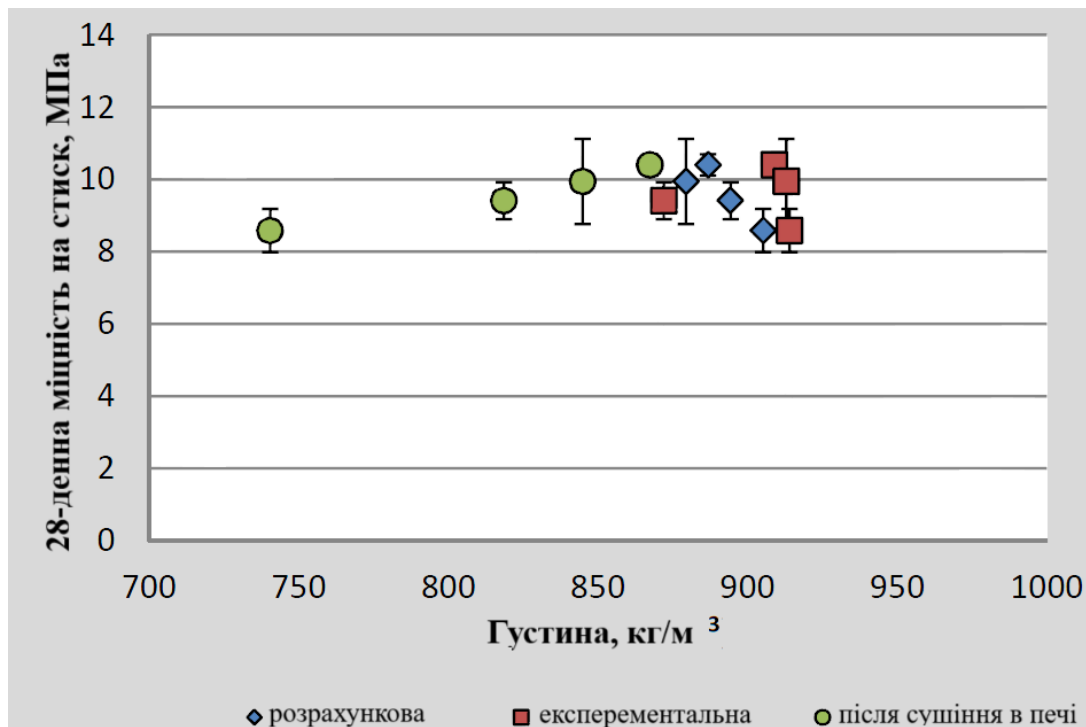


Рисунок 3.25 – Залежність 28-денної міцності на стиск від густини

Суміш з найнижчою розрахованою густиною не відповідає тенденції міцності на стиск на основі розрахованої густини. Це суміш з найнижчим

співвідношенням рідина/суха суміш, яка показала погане ущільнення, що може призвести до нижчої міцності на стиск за 28 днів, ніж очікувалось.

Коли всі зразки знаходяться у сухому стані, чітко видно, що 28-денна міцність на стиск зростає при вищій щільності після сухого стиску. Це узгоджується з результатами, отриманими в дослідженнях [12, 19].

Отже, задовільняє поставлене завдання суміш зі складом: 457 грамів/л PQA мінералу, 139 мл/л рідини (оптимізоване ущільнення) на основі цементу, LWA розміром 2...4 мм, повітровтягуючі добавки АЕА 3 грамів/л. У Таблиці 3.2 узагальнено властивості затверділих ультралегких бетонів на основі цементного та геополімерного в'язучого.

Таблиця 3.2 – Властивості затверділого ультралегкого бетону на основі цементного та геополімерного в'язучого

Показник	Ультралегкий бетон на цементній основі	Ультралегкий бетон на геополімерній основі	% ультралегкого бетону на геополімерній основі відносно ультралегкого бетону на цементній основі
Мінерал, г	403...432	457	x
Рідина, мл	184...201	139	x
LWA розмір, мм	0.25...8	025...4	x
Усадка (м ³), одразу після змішування	83; 195	240	123...289%
Текучість (м ³), одразу після змішування	390; 460	480	104...123%
Експериментальна щільність (кг/м ³)	x	881	x
Щільність після висихання (кг/м ³)	660; 701	778	111...118%
Міцність на стиск через 28 днів (МПа)	10,1; 10,3	9,7	94...96%
Теплопровідність (Вт/(м ³ · К))	0,12	0,108	90%
Водопроникність під тиском (м ³)	11,7; 35	22,7	65...194%

ВИСНОВКИ

В цьому дослідженні розроблено склад ультралегкого бетону на основі геополімерного в'язучого. Дослідження ультралегкого бетону на основі цементу використовувалися як орієнтир для побудови експерименту[3].

Поставленою метою було створити ультралегкий бетон ($\leq 800 \text{ кг/м}^3$) на основі геополімерного в'язучого з рівними або покращеними властивостями ніж у бетону на цементній основі (28-денна міцність на стиск ($\geq 10 \text{ МПа}$) та теплопровідність ($\leq 0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$)).

Задовільняє поставлене завдання суміш зі складом: 457 грамів/л PQA мінералу, 139 мл/л рідини (оптимізоване ущільнення) на основі цементу, LWA розміром 2...4 мм, повітровтягуючі добавки АЕА 3 грамів/л.

Отриманий ультралегкий бетон з геополімерним в'язучим має покращені властивості порівняно з ультралегким бетоном з цементним в'язучим, а саме кращу легкоукладальність, 28-денну міцність на стиск та теплопровідність.

Спостерігалось, що густина безпосередньо пов'язана з теплопровідністю. Вища густина може бути отримана завдяки кращому ущільненню, що може збільшити міцність на стиск. У цьому дослідженні спостерігається, що на густину та міцність на стиск значною мірою впливає кількість мінералу PQA. Крім того, міцність на стиск збільшується, коли LWA розміром 4...8 мм замінюється на 2...4 мм.

При зменшенні густини, теплопровідність також зменшується. Як згадувалося, на густину найбільше впливає кількість мінералу PQA. Коли кількість мінералу PQA зменшується, кількість LWA збільшується. Це призводить до насичення суміші більшою кількістю повітря, що сприяє нижчій теплопровідності. Теплопровідність збільшується, коли міцність на стиск збільшується. Так, вища міцність на стиск досягається, коли ущільнення максимальне, але при цьому зменшується кількість повітря в суміші, що сприяє підвищенню теплопровідності

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Provis J.L. Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what? // *Materials and Structures*. – 2018. – Vol. 51. – P. 11. – DOI: 10.1617/s11527-017-1131-5.
2. Bernal S.A., Provis J.L. Durability of Alkali-Activated Materials // *Cement and Concrete Research*. – 2023. – Vol. 165. – P. 107–159. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.107159.
3. Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. – 5th ed. – Geopolymer Institute, 2020.
4. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., et al. Structural evolution of geopolymer gels during synthesis // *Cement and Concrete Research*. – 2021. – Vol. 140. – P. 106291. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106291.
5. Zhou Y., Liu X., Li N. Effect of Si/Al ratio on geopolymer structure and mechanical properties // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 323. – P. 126612.
6. Roviello G., et al. Lightweight geopolymer composites: microstructure–property relationships // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 407. – P. 137015.
7. Liew Y.M., Heah C.Y., Kamarudin H. Structure and properties of lightweight geopolymer concrete // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46. – P. 18398–18407.
8. Nath P., Sarker P.K. Effect of GGBFS on setting, workability and early strength of fly ash geopolymer concrete // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 66. – P. 163–171.
9. Temuujin J., van Riessen A., Williams R. Influence of composition on microstructure of geopolymer // *Journal of Materials Science*. – 2019. – Vol. 54. – P. 14603–14615.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

10. Almutairi A.L., Tayeh B.A., et al. Lightweight geopolymer concrete with perlite aggregate // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 270. – P. 121408.

11. Luukkonen T., Abdollahnejad Z., et al. One-part geopolymer mixes from industrial side streams: A review // Cement and Concrete Research. – 2018. – Vol. 103. – P. 21–34.

12. Duxson P., Provis J.L., et al. The role of gel structure in the performance of geopolymer binders // Journal of Materials Science. – 2007. – Vol. 42. – P. 2917–2933.

13. Rangan B.V. Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. – Department of Civil Engineering, Curtin University, Perth, Australia, December 2010.

14. Wallah S.E., Rangan B.V. Low-Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties. Research Report GC2. – Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2006.

15. Davidovits J. Geopolymers and Geopolymeric Materials // Journal of Thermal Analysis. – 1989. – Vol. 35.

16. Davidovits J. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials // Journal of Thermal Analysis. – 1991. – Vol. 37.

17. Davidovits J. Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. – Melbourne, Australia, 28–29 October 2002.

18. Davidovits J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. – Melbourne, Australia, 28–29 October 2002.

19. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. – 3rd ed. – Saint-Quentin: Institut Geopolymere, 2011.

20. F. Collins & J.G. Sanjayan, Department of Civil Engineering, Monash University, Clayton, Victoria, Australia, “Strength and Shrinkage Properties of Alkali-activated Slag Concrete Containing Porous Coarse Aggregate,” Cement and Concrete Research, vol. 29, 26 October 1998.

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. A.H.M. Andreasen and J. Andersen, "Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Kornern (mit einigen Experimenten)," Vols. Kolloid-Zeitschrift , no. 50, pp. 217-288, 1930.

22. R. Arellano Aguilar, O. Burciaga Diaz, J.I. Escalante Garcia, Center of Research and Advanced Studies, Mexico, "Lightweight Concretes of Activated Metakaolin-Fy Ash Binders, with Blast Furnace Slag Aggregates," Construction and Building Materials, vol. 24, 16 December 2010

					MP 0002.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67