МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Кваліфікаційна робота/проект

_____другий магістерський рівень_____
(рівень вищої освіти)

на тему: Дрібнозернистий базальтофібробетон з добавкою тонкодисперсного кремнезему_____

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1922-пцб-2
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми промислове і цивільне будівництво
(код і назва освітньої програми)
_____Шевченко Олександр Леонідович_____
(прізвище та ініціали)

Керівник _____доц., к.т.н., Шокарєв Є.О._____
посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали

Рецензент _____доц., к.т.н.Данкевич Н.О._____
посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали

Запоріжжя
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Кафедра Промислового та цивільного будівництва
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(шифр і назва)
Освітня програма «Промислове і цивільне будівництво»
(шифр і назва)
Спеціалізація -
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
завідувач кафедри *промислового та цивільного будівництва*
проф. І.А. Арутюнян
"___" _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ / ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Шевченко Олександру Леонідовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи (проекту) Дрібнозернистий базальтофібробетон з добавкою тонкодисперсного кремнезему
керівник роботи Шокарєв Є.О., доц., к.т.н.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "30" 09 2024 року № *1486-с*
2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи *грудень 2024р.*
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи компоненти для отримання модифікованого базальтофіброволокна
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, розділ 1 – Стан питання та перспективи виробництва базальтофібробетону; розділ 2 – Характеристика вихідних матеріалів і методів досліджень; розділ 3 – Визначення оптимальних речовинних складів базальтофіброцементних композицій; 4 – Технологія виробництва дрібнозернистого базальтофібробетону з нанокремнеземом. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язк креслень) 8 листів

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдан прийн
Розділ 1	Шокарєв Є.О., доц. кафедри		
Розділ 2	Шокарєв Є.О., доц. кафедри		
Розділ 3	Шокарєв Є.О., доц. кафедри		
Розділ 4	Шокарєв Є.О., доц. кафедри		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим
1	Розділ 1	1.09.2024 - 1.10.2024	
2	Розділ 2	2.10.2024 – 03.11.2024	
3	Розділ 3	04.11.2024 – 17.11.2024	
4	Розділ 4	18.11.2024 – 30.11.2024	

Студент _____ Шевченко О.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ Шокарєв Є.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Данкевич Н.О.
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Шевченко Олександр Леонідович. Дрібнозернистий базальтофібробетон з добавкою тонкодисперсного кремнезему.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник Шокарєв Є.О. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра промислового та цивільного будівництва, 2024.

Досліджується можливість отримання фібробетону із застосуванням базальтового волокна, отриманого відцентрово-дутовим способом, та нанодисперсного кремнезему. Спільне використання базальтового волокна та нанокремнезему дозволяє покращити фізико-механічні та експлуатаційні характеристики бетонів. Зміна фазового складу та мікроструктури базальтфіброцементних композицій оцінюється за допомогою рентгенофазового аналізу та растрової електронної мікроскопії.

Відомо, що використання міцного дрібнозернистого бетону для монолітного будівництва є актуальним завданням. В роботі проводилася розробка складів та вивчення властивостей бетонів на основі цементу з наномодифікатором та базальтовим волокном. Для широкомасштабного впровадження їх необхідно вирішити проблему зниження витрати цементу та покращення деформативних характеристик композиту. Теоретичними передумовами цього напряму є модифікація цементної матриці та застосування дрібного наповнювача.

Ключові слова: дисперсне армування бетону, базальтове волокно, нанокремнезем, міцність при стисканні, міцність при згинанні, рентгенофазовий аналіз.

ABSTRACT

Shevchenko Oleksandr Leonidovich. Fine-Grained Basalt Fiber Concrete with the Addition of Finely Dispersed Silica.

Qualified graduation work to achieve a higher level of master's degree in the specialty 192 Construction and Civil Engineering, scientific ceramics specialist Shokarev, Ye.O. Yury M. Potebnya Engineering and Scientific Educational Institute, Zaporizhzhia National University, Department of Industrial and Civil Construction, 2024.

The possibility of producing fiber concrete using basalt fiber obtained by the centrifugal blowing method and nanosilica is being investigated. The combined use of basalt fiber and nanosilica allows for improving the physical and mechanical properties of concretes. Changes in the phase composition and microstructure of basalt fiber-cement composites are evaluated using X-ray phase analysis and scanning electron microscopy.

It is known that the use of high-strength fine-grained concrete for monolithic construction is a relevant task. The work involved the development of compositions and the study of the properties of concretes based on cement with a nanomodifier and basalt fiber. For large-scale implementation, it is necessary to solve the problem of reducing cement consumption and improving the deformation characteristics of the composite. The theoretical prerequisites for this direction are the modification of the cement matrix and the use of fine filler.

Keywords: dispersed reinforcement of concrete, basalt fiber, nanosilica, compressive strength, flexural strength, X-ray phase analysis.

ЗМІСТ

Вступ…….7
1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА БАЗАЛЬТОФІБРОБЕТОНУ…….10
1.1 Теоретичні та технологічні основи підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей базальтофібробетону……10
1.2 Сировинні матеріали для одержання фібробетону……19
1.2.1 Класифікація та види фібри для виробництва фібробетону…….19
1.2.2 Використання в'яжучих речовин для дисперсного армування базальтовими волокнами……...21
1.2.3 Використання модифікуючих добавок для виробництва фібробетону…25
1.3 Використання ультрадисперсних добавок у технології виробництва фібробетонів……...27
2 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ……...34
2.1 Характеристика вихідних матеріалів для отримання базальтофібробетону…….34
2.1.1 Спосіб отримання та характеристики базальтового волокна……36
2.1.2 Спосіб отримання та характеристики нанокремнезему…….39
2.2 Характеристика методів досліджень……..41
3 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЧОВИННИХ СКЛАДІВ БАЗАЛЬТОФІБРОЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ……46
3.1 Вплив вмісту нанокремнезему та базальтового волокна на фізико-механічні властивості цементного каменю…….46
3.2 Дослідження реологічних характеристик фіброцементних композицій при введенні базальтового волокна та нанокремнезему……53
3.3 Оптимізація складів фіброцементних композицій за допомогою методу математичного планування експерименту……..56
3.4 Визначення ефективного способу розподілу базальтового волокна у складі фіброцементних композицій…….59

4 ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ДРІБНОЗЕРНИСТОГО БАЗАЛЬТОФІБРОБЕТОНУ З НАНОКРЕМНЕЗЕМОМ ……...63
4.1 Розробка технології виробництва дрібнозернистого базальтофібробетону з нанокремнеземом……...63
4.2 Статичний, динамічний та конструктивний розрахунки несучих залізобетонних елементів адміністративно-громадського 12-ти поверхової будівлі у м. Житомир……...……..……71
4.2.1 Характеристика будівлі та архітектурно-конструктивне рішення…..….71
4.2.2 Проєктне рішення……..……...74
4.2.3 Характеристика розрахункової моделі…….…..75
ВИСНОВКИ……...……...…….81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..82

ВСТУП

Актуальність роботи. В даний час основною тенденцією розвитку бетонознавства є перехід від традиційних складів бетону до багатокомпонентних. Одним з шляхів вирішення завдань щодо вдосконалення експлуатаційних характеристик бетонів є його армування різними видами металевих і неметалевих фібр мінерального та органічного походження. Розробка технології виробництва фібробетону, армованого базальтовим волокном, перспективна та досить вивчена багатьма дослідниками [1; 4; 6]. Базальтове волокно може використовуватися для отримання високоміцного тонкодисперсного бетону, бетону для дорожнього будівництва, ефективного пінобетону.

Крім того, в технології виробництва бетону перспективне використання нанодисперсних добавок, зокрема нанокремнезему, введення яких дозволяє регулювати структуру та властивості бетонів.

Маючи значні переваги, фібробетони поки не знайшли широкого застосування у будівництві. Водночас, їх використання при забезпеченні оптимальних показників матеріаломісткості та собівартості є актуальною. Її успішна реалізація дозволить у повному обсязі розкрити потенціал дисперсно-армованих бетонів.

При використанні базальтових волокон, що мають хімічну спорідненість з мінералами портландцементу (ПЦ), необхідно врахувати можливу взаємодію, що призведе до руйнування базальтового волокна та зниження армуючого ефекту. Для зниження негативного впливу середовища портландцементу на корозію неметалічних волокон застосовують різні кремнеземоисті добавки. Використання нанодисперсного діоксиду кремнію - нанокремнезему (НК) досить широко досліджується для бетонів різного призначення. Хімічна активність нанокремнезему у поєднанні з високою питомою поверхнею дозволяє йому бути ефективним компонентом сучасних

високоміцних бетонів. Однак використання НК для забезпечення корозійної стійкості базальтового волокна; оптимальних рівнів вмісту БВ та НК, вплив БВ та НК на фізикомеханічні, деформативні та експлуатаційні властивості фібробетону раніше не розглядалося.

Мета та завдання роботи. Метою цієї роботи є розробка технології виробництва фібробетону з використанням базальтового волокна, отриманого відцентрово-дутьовим способом, і нанодисперсного кремнезему.

Для вирішення поставленої мети у роботі визначено такі **завдання**:

1. Вивчення хімічної стійкості базальтового волокна, що в лужному середовищі портландцементу гідратується та дослідження впливу на неї нанодисперсного кремнезему.

2. Визначення ефективного способу введення в цементну матрицю базальтового волокна та нанодисперсного кремнезему та оцінка його впливу на фізико-механічні властивості цементного каменю та бетону.

3. Дослідження складів та технології виробництва дрібнозернистого базальтофібробетону з використанням базальтового волокна і нанокремнезему.

4. Техніко-економічне обґрунтування технології виробництва базальтофібробетону.

Наукова новизна роботи. Встановлено ефективність застосування базальтового волокна, отриманого відцентрово-дуттьовим способом і характеризується неоднорідністю по основним характеристикам, як дисперсно-армуючого компонента, та нанокремнезему, отриманого шляхом випаровування та конденсації речовини релятивістським пучком електронів, для отримання високоміцного дрібнозернистого цементного фібробетону.

Досліджено спосіб підвищення корозійної стійкості базальтового волокна за рахунок введення нанодисперсного кремнезему, що має високу хімічну активність Нанокремнезем, володіючи розвиненою питомою поверхнею та підвищеною хімічною активністю, взаємодіє з вапном, що утворюється при гідратації цементу, запобігаючи корозії базальтового волокна. Інтервал дозування нанокременезему значно нижче в порівнянні з

відомими аналогами мікророзмірних кремнеземовмісних добавок та лежить у межах 0,1…0,15 % від маси цементу.

Виявлено закономірності та кількісні залежності міцності цементу та бетону від кількості та довжини базальтового волокна, дозування нанокремнезему, способу введення нанокремнезему та волокна.

Встановлено склади та визначено основні властивості базальтофібробетону із застосуванням базальтового волокна і нанокремнезему.

Виявлено ефективний спосіб розподілу базальтового волокна в об'ємі цементної матриці, що полягає в короткочасному змішуванні. Отримано базальтофібробетон з міцністю при стисканні – 60…65 МПа, при згинанні – 14…16 МПа, морозостійкістю – 200…250 циклів, усадкою - 0,9…1,1 мм/м.

Методологія та методи дослідження. Основні фізико-механічні показники визначалися відповідно до стандартних методик; якісний та кількісний фазовий склад – за методикою рентгено-фазового аналізу; визначення та оцінка тепловиділення при гідратації портландцементу та фіброцементу проводилися за допомогою калориметричного методу; аналіз реотехнологічних характеристик здійснено за допомогою визнаних реологічних моделей та законів.

Структура і об'єм магістерської роботи. Робота складається із введення, чотирьох розділів, висновків, загальних висновків та пропозицій, списку використаних джерел. Основною темою текст викладено на 83 сторінках, з них 10 малюнків, 15 таблиць, та містить списки літератури зі 25 найменування праць вітчизняних та зарубіжних авторів.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА БАЗАЛЬТОФІБРОБЕТОНУ

1.1 Теоретичні та технологічні основи підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей базальтофібробетону

В даний час за критерієм міцності при стисканні бетону поділяють на 4 групи [1]: I - рядові, з міцністю до 40 МПа; II – високоміцні бетони (40…80 МПа); III - особливо високоміцні (80…120 МПа); IV - Надвисокоміцні бетони (понад 120 МПа). Зростаюча потреба в високоміцних бетонах обумовлена двома факторами: по-перше, збільшенням навантажень на несучі і, особливо, прогонові конструкції висотних будівель, яких важкий бетон класів В30…В50 вже не задовольняє конструктивним вимог. Другий фактор – зростання цін на всі сировинні матеріали залізобетону – висуває новий принцип бетонного будівництва: «Економити не цемент у бетоні, а бетон у конструкції». А це можливо лише за рахунок зменшення поперечних перерізів несучих елементів завдяки суттєвому зростанню міцності у них. Однак застосування високоміцних бетонів спричиняє ряд труднощів та ризиків. Так, наприклад, дрібнозернистий бетон має недостатню міцність на розтяг при вигині, її зростання «відстає» від зростання міцності на стиск. До того ж високоміцні бетони вимагають підвищеної витрати цементу, що призводить до зростання усадкових деформацій та внутрішніх напруг, накопиченню мікродефектів, що збільшують небезпеку крихкої руйнації конструкцій. Усунути ці недоліки високоміцних бетонів можна з допомогою фібри [2].

Досвід застосування фібробетонів у зарубіжній та вітчизняній практиці показує, що раціональними областями використання таких бетонів є широка номенклатура монолітних та збірних бетонних конструкцій. Так, застосування фібробетону найбільш ефективно в тонкостінних плоских і криволінійних

конструкціях, безнапірних і низьконапірних трубах, а також при виготовлення ударостійких і згинальних конструкцій з метою виключення додаткової арматури та пов'язаних з нею робіт.

Найчастіше в цементних бетонах застосовується сталева фібра завдовжки 2...4 см, діаметром 0,7...1 мм за коефіцієнтів армування 2,5...4 % від маси бетону.

Це призводить до збільшення міцності на вигин на 15...20% та зниження внутрішніх напруг. Однак потенціал дисперсного армування повністю не реалізується через малу питому поверхню сталевої фібри, невисокої адгезії до неї цементного каменю та недостатньої міцності самого бетону, що призводить до «просмикування» фібр при його руйнуванні [2].

У зв'язку з цим перспективне застосування базальтового волокна, практично ще не застосовується в цементних бетонах. За міцністю воно перевершує сталь, і має, за рахунок малого діаметра волокон (9...12 мкм), набагато більшою питомою поверхнею зчеплення з цементним каменем, ніж сталевий, маючи з ним хімічну спорідненість. При цьому відносне подовження при розриві базальтової фібри вдвічі нижче, ніж сталевий, що дозволяє їй більш ефективно перешкоджати утворенню мікротріщин у бетоні при навантаженні [2].

Виробництво базальтофібробетону (БФБ), виробів та конструкцій на його основі регламентується ВСН 56-97 [19]. Для отримання базальтофібробетону найчастіше передбачається використовувати конструкційний дрібнозернистий бетон із середньою щільністю не менше 2000 кг/м^3 на кварцовому піску з крупністю зерен від 1,5 мм до 2,3 мм. Бетон повинен мати водопоглинання не більше 8 % масі.

Дрібнозернистий бетон для базальтофібробетонних конструкцій залежно від виду та умов їх роботи передбачається наступних класів і марок: за міцністю на стиск - В20, В25, В30, В35, В40; класів за міцністю на основі розтяг - Bt 1.6; Bt 2; Bt 2.4; Bt 2.8; Bt 3.2; t 3.6; Bt 4; марок по морозостійкості – F50; F75; F100; F150; F200; F250; F300; F400, F500; марок по

водонепроникності – W4; W6; W8; W10; W12 [19].

Як зазначається в літературі, зміцнення волокнами ґрунтується на припущенні, що матеріал бетонної матриці передає волокнам прикладене навантаження за допомогою дотичних сил, що діють поверхні розділу, і якщо модуль волокна більше модуля матриці, то основну частку прикладених напруг сприймають волокна, а загальна міцність композиції пропорційна їх об'ємному змісту [6-8].

У дослідженнях, що належать до дисперсного зміцнення бетонних матеріалів можна виділити два напрями. Перше засноване на застосуванні спеціальних затравок, що інтенсифікують процеси твердіння бетону та покращують його фізико-механічні показники. Певний інтерес представляє спрямована кристалізація новоутворень у процесі твердіння бетону, тобто забезпечення дисперсного самоармування бетону за рахунок утворення в його обсязі орієнтованих зростків новоутворень у вигляді кристалогідратів, що дозволяють істотно підвищити міцність зразків [8].

Другий напрямок заснований на застосуванні для підвищення міцності бетонної матриці армуючих волокон, що відрізняються за своїм складом від матеріалу матриці та здатних у процесі роботи композиції сприймати більш високі в порівнянні з матрицею напруги, що розтягують. Отриманий ефект зміцнення значною мірою залежить від виду використовуваних волокон, характеру їх зчеплення та орієнтації в обсязі бетону, хімічної стійкості по відношенню до продуктів гідратації цементних в'яжучих [2, 6, 8, 10, 12, 14].

Методами дисперсного армування передбачаються можливості отримання спрямованої та довільної (вільної) орієнтації волокон в обсяг бетону. Спрямована орієнтація реалізується головним чином за використання безперервних ниток, джгутів, різноманітних тканих і нетканих сіток, розріджених тканин та інших аналогічних матеріалів. Подібний вигляд орієнтації може бути здійснений при армуванні бетону короткими волокнами, зокрема сталевими фібрами для формування виробів, наприклад у магнітному полі. Плоскодовільна орієнтація характеризується рівноймовірним та

необмеженим (вільним та хаотичним) розподілом волокон у площині (у двомірному просторі). Дисперсне армування в цьому випадку реалізується головним чином у тонкостінних виробах у вигляді плоских листів, плит, а також в елементах, що мають криволінійну форму [7, 8]. Об'ємно-довільна орієнтація характеризується рівноймовірним і необмеженим (вільним та хаотичним) розподілом коротких армуючих волокон у всьому обсязі бетону (у тривимірному просторі). Чим менше розміри поперечного перерізу виробів, тим більшою мірою обмежені можливості вільної орієнтації армуючих волокон [8]. Аналіз показує, що ефект стиснення орієнтації волокон проявляється в основному в тих випадках, коли відповідні розміри виробів перевищують довжину армуючих волокон не більше ніж у 5 разів [7, 8]. За більш значних розмірах поперечного перерізу виробів ефект стиснення помітно знижується, параметри орієнтації волокон у бетонній матриці в цьому випадку наближаються до параметрів плоско- або об'ємно-довільного армування.

За своїм характером дисперсне армування може здійснюватися одним видом фібр або сумішшю різних фібр (різної довжини та різного складу).

Значний інтерес представляє застосування дисперсної арматури для традиційно армованих залізобетонних конструкцій, у яких частина стрижневої арматури замінюється на фіброву (комбіноване армування).

Цілком очевидно, що технологічні методи виготовлення таких конструкцій залежать значною мірою від виду армуючих, що використовуються для них матеріалів.

Діапазон діаметрів армуючих елементів, що використовуються для зміцнення фібробетону, досить великий. Якщо, наприклад, порядок величини діаметрів традиційної арматури в залізобетоні прийняти рівним 1, то для дротів, що застосовуються в армоцементі, він становитиме 10^{-1} для тонких сталевих фібр - 10^{-2}, для скляних та базальтових волокон - 10^{-3} см [8]. У зв'язку з цим важливе значення мають дослідження з виявлення оптимальних співвідношень між геометричними характеристиками армуючих елементів та

розмірами елементів структури різних видів бетонних матриць: крупно- та дрібнозернистих бетонів, цементно-піщаних розчинів, цементного каменю Різними авторами допускається існування різних рівнів ефективного дисперсного армування, і завдання полягає в визначення критеріїв, які можна було б прийняти за основу виявлення меж цих рівнів [6-8, 10, 12]. Диспергування передбачає істотне збільшення поверхні розділу між дисперсною фазою та дисперсійним середовищем. Для визначення ефективних кордонів дисперсності армування бетонів також можуть служити відповідні зміни фізичних і насамперед механічних характеристик бетонної матриці (міцність, тріщиностійкість, ударна в'язкість та ін.), що виявляються внаслідок суттєвого зменшення величини діаметрів армуючих елементів та збільшення ступеня їхнього розосередження в обсязі фібробетону.

Дослідження показують, що оптимальні рівні дисперсного розподілу армуючих елементів в об’ємі бетону повинні бути тісно пов’язані з параметрами структури бетону [8].

Водночас, як зазначає [10-11], з низки питань дисперсного армування бетонів намітилися певні розбіжності. При застосуванні сталефібробетону одні дослідники вважають найбільш ефективної фібру, діаметр якої не перевищує 0,7 мм, тоді як інші застосовують більші сталеві волокна. Немає єдиної думки щодо оцінки впливу дисперсного армування на міцність бетону при стисканні та осьовому розтягування. Розходяться погляди фахівців та з питань перспективи використання низькомодульних, у тому числі полімерних волокон у важких бетонах [10].

Використання мінеральних, зокрема базальтових волокон, дисперсного армування фібробетонів є актуальним у зв'язку з високими фізико-механічними властивостями одиничних базальтових волокон і більше низькою щільністю цих волокон порівняно із сталевими. Проте механізм дії мінеральних базальтових волокон на структуроутворення фібробетонів досить складний, і багато дослідників відзначають різні ефекти та рівні армування при використанні базальтових волокон, отриманих різними способами [2, 9].

Загалом можна відзначити, що базальтові волокна внаслідок їх хімічної спорідненості з цементом, необхідно захистити від негативного впливу лужного середовища для збереження ефекту дисперсного армування фібробетонів.

Проведений аналіз літературних джерел, присвячених питанням теоретичних основ дисперсного армування, корозійної стійкості базальтового волокна в лужних середовищах, дозволив встановити, що високі фізико-механічні характеристики матеріалу переважно визначаються спільною роботою волокна із цементною матрицею, а також залежать від складу бетону (В/Ц, Ц/П, довжини, діаметра та кількості волокна, крупності заповнювача і т.д.) та технології виготовлення, виду та активності застосовуваного цементу, виду та вмісту фібри у складі бетону, способу розподілу фібри в об'ємі бетонної суміші, стійкості волокна до середовища цементу, що гідратується, виду та кількості пластифікуючих і кремнеземсодержащих добавок [2, 15, 16].

Автори [25, 26] запропонували принцип підвищення ефективності дрібнозернистого цементобетону, мікроармованого базальтовою фіброю, полягає у підвищенні лугостійкості базальтового волокна шляхом його термічної обробки при 500 ^{o}C. В результаті виявлено характер залежності властивостей цементобетону від способу введення термообробленого волокна та виду пластифікатора. Найбільш ефективним є попереднє розпушування волокна у воді замішування в присутності нафталін-формальдегідного суперпластифікатора з подальшим введенням суспензії у формувальну суміш.

Адсорбція пластифікатора на поверхні фібри призводить до гідрофілізації її поверхні, що сприяє рівномірному розподілу волокна по обсягу суміші та, як наслідок, підвищенню міцності бетону. Використання нафталін-формальдегідної добавки (СП-1 виробництва Поліпласт) дозволяє збільшити міцність при стисканні на 10 % та при вигині на 21 % порівняно з складами на основі полікарбоксилатного пластифікатора (SikaViscoCrete 125 Powder).

В роботі [26] обґрунтовано доцільність термічної обробки базальтового волокна при температурі 500 °С з подальшим охолодженням повітряному середовищі при кімнатній температурі для підвищення його лужного стійкість. Запропоновано феноменологічну модель модифікації базальтового волокна при термічній обробці, заснована на переході Fe^{2+} до Fe^{3+} в піроксенової фази скла в окисних умовах. Те, що відбувається при цьому зміна координаційного оточення Fe^{VI} у Fe^{IV} ініціює утворення зв'язків між $(Si_2O_6)^{-4}$ ланцюгами та їх трансформацію в каркасний структурний тип $[(Fe^{+3},Si_2)O_6]^{-1}$ з утворенням залізовмісних плагіоклазових фаз.

Збільшення кількості кислотних бренстедівських центрів у два рази та інтенсивності смуг поглинання місткових зв'язків Si-O-Si в області хвильових чисел 1200 $см^{-1}$, що відповідають каркасним структурним фрагментів (Q^4), відбувається за рахунок зменшення кількості ланцюжкових фрагментів (Q^2) і свідчить про підвищення ступеня полімеризації аніонного компонента при термообробці. Ці процеси призводять до ущільненню структури фібри та сприяють підвищенню її лугостійкості, що підтверджується морфоструктурними особливостями поверхні термообробленого базальтового волокна, витриманого у цементному розчині.

Експериментальним та розрахунковим методами оптимізовано гранулометричний склад тонкозернистого кварцового заповнювача, що складається з чотирьох фракцій (1,25…0,63; 0,63…0,315; 0,315…0,14; 0,14…0,063), що має найбільшу об'ємну щільність (1810 $кг/м^3$) і мінімальну порожнечу 31,6 %. Тонкозернистий бетон на заповнювачі оптимального гранулометричного складу та немодифікованого цементу перевищує бетон на вихідному нефракціонованому піску за міцністю на стиск у 1,5 рази, на вигин - в 1,9 рази [23].

Відомо, що для отримання стабільних фізико-механічних показників при армуванні бетону БВ необхідно, щоб воно було рівномірно розподілено обсягом всієї суміші [2, 27]. Рівномірне розподіл базальтового волокна у

традиційних змішувачах і без застосування спеціальних способів неможливе. В роботі [2] встановлено оптимальний спосіб введення базальтового волокна в модифіковане цементне вяжуче шляхом короткочасного (50-60с) змішування всіх компонентів (цементу, суперпластифікатора, мікрокремнезему та волокна) в млина, що забезпечує не тільки рівномірний розподіл волокна в композиційному в'яжучому, а й його механоактивацію.

Відпрацьована технологія приготування дрібнозернистої бетонної суміші з базальтовим волокном при використанні швидкісного турбулентного змішувача із вертикальним перемішуванням.

Встановлено оптимальна послідовність введення компонентів суміші та режими перемішування, при яких досягаються рівномірне та однорідне розподіл волокна за обсягом цементно-піщаної матриці [24,27]. На межі цементного каменю та базальтового волокна, що знаходиться в аморфному стані, проходить хемосорбційна взаємодія з появою додаткових новоутворень, що належать до низькоосновних гідросилікатам кальцію.

В роботі [28] з використанням високомодульних базальтових волокон різного типу отримано дисперсно-армований швидкотвердіючий будівельний бетон з підвищеними характеристиками міцності.

Вченими узагальнено досвід застосування базальтового волокна у будівельній галузі. Наведено дослідження фізико-механічних та корозійних властивостей базальтового волокна, отриманого за допомогою різних технологій. Визначено стійкі перспективи розвитку та застосування базальтових волокон [28], застосування яких ефективно, в тому числа для виробництва пінобетону [29].

Аналізуючи різні підходи до вирішення проблеми безпеки базальтового волокна від дії лужного середовища, можна виділити основні напрямки (рис. 1.1), які описуються у дослідженнях авторів [4-7].

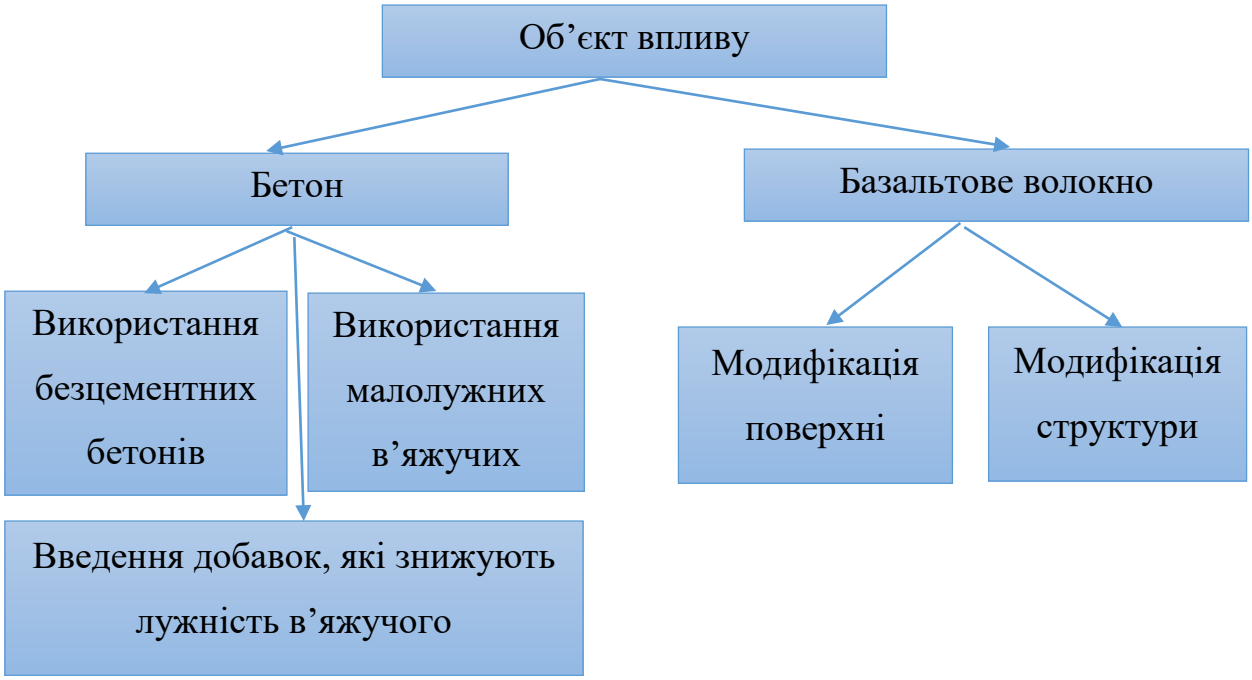


Рисунок 1.1 – Класифікація способів захисту базальтового волокна від впливу лужного середовища [7]

Відповідно до даної класифікації, об’єктами впливу можуть бути як окремо волокно, так і сам фібробетон, при цьому доцільність застосування того чи іншого способу захисту від впливу лужного середовища визначається техніко-економічним обґрунтуванням виробництва базальтофібробетону.

Спосіб підвищення лугостійкості базальтового волокна шляхом введення добавок до складу бетону, як було описано вище, досить широко висвітлюється останнім часом, однак, як зазначають автори [7], при використанні добавок складним є вивчити та спрогнозувати механізм впливу добавки на бетон. У разі застосування мікророзмірних добавок кремнезему актуальним є забезпечення необхідних характеристик лужностійкості базальтового волокна та собівартості кінцевого продукту в залежності від виду та дозування добавки.

Аналіз стану досліджень свідчить про відсутність даних про одержанні дрібнозернистих дисперсно-армованих високоміцних бетонів з застосуванням нанодисперсних добавок, введення яких у невеликому кількість призведе до поліпшення властивостей БФБ.

1.2 Сировинні матеріали для одержання фібробетону

1.2.1 Класифікація та види фібри для виробництва фібробетону

В літературі [4, 11, 21] даються характеристика та класифікація фібри для виробництва фібробетону. При цьому запропоновано класифікацію фібри, що виробляється і застосовується по її фізико-механічним і геометричним характеристикам з урахуванням досягається ефекту підвищення комплексу будівельно-технічних характеристик фібробетону, технологічності приготування та укладання фібробетонної суміші, та розглянута специфіка спільної роботи фібри та бетону-матриці. Класифікація фібри за жорсткістю і характеристиками міцності представлена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Види фібр, що використовуються для отримання фібробетону

Фібра (волокно)	Щільність, г/см^3	Міцність на розтяг Rf, МПа х10^3	Модуль пружності Ef, МПа х10^3	Подовження при розриві, %
Металева				
Сталева	7,8	0,5…1,50	190…210	2…6
Неметалічна високомодульна				
Асбестова	2,6	0,9…3,1	68…70	0,6…1
Скляна	2,6	1,8…3,9	70…80	1,5…3,5
Базальтова	2,6	1,6…3,2	100…130	1,4…3,6
Арамідна	1,4	2,9…3,5	75…110	1,4
Вуглецева	2	2,5…4	200…700	1,0…1,6
Карбонова	1,63	1,2…4,0	280…380	2,0…2,2
Полімерна низькомодульна				
Поліамідна	0,90	0,72…0,9	1,9…5	5…20
Поліпропіленова	0,90	0,4…0,77	3,5…8	10…25
Нейлонова	1,1	0,77 - 0,84	4,2…4,5	16…20
Віскозна	1,20	0,66…0,7	5,6…5,8	14…16

Найважливішою характеристикою фібри є її жорсткість, характеризується модулем пружності Ef. За величиною модуля пружності всю вироблену фібру доцільно класифікувати за двома групами. До першій групі відноситься високомодульна фібра з Ef = (70…250)·10^3 МПа, що включає сталеву та неметалеві види фібри на основі базальтових, азбестових та скляних волокон, а також такі специфічні модифікації, що знайшли в останні роки застосування у виробництві фіброармованих пластиків (ФАП), тканинних рулонних матеріалів, композитних стрічок, як вуглецеве, арамідне, карбонове волокна з Ef = (200...700)·10^3 МПа, застосовувані для посилення та ремонту будівельних конструкцій, в першу чергу черга залізобетонних. Остання група волокон, що має поєднання високої жорсткості та міцності на розтягування (до 3,5…4·10^3 МПа), значно більш раціональна при використанні у вигляді виробів з одного або двоспрямованим розміщенням волокон, а не як хаотично розподіленої обсягом фібри.

Високомодульна фібра є одночасно високоміцною, і вона здатна забезпечити значне зміцнення фібробетону по відношенню до вихідному бетону-матриці при значному підвищенні тріщиностійкості (по утворенню та ширині розкриття тріщин) як за рахунок високого співвідношення модулів пружності фібри та бетону Ef /Eb~7…30, і за рахунок високого співвідношення їх міцностей (RfjU/RbjU = 10...100 для міцності бетону на стиснення, Rf,u/Rbt,u~100-1000 для міцності на розтяг). Фібробетон на основі високомодульної фібри забезпечує також підвищену ударну стійкість, морозостійкість, водонепроникність, стирання.

Друга за жорсткістю група - низькомодульна фібра виготовляється на полімерної основі. Вона має модуль пружності (2...10)·10^3 МПа, що нижче жорсткості фібри першої групи приблизно на два десяткові порядки. Ця фібра надає мінімальний позитивний вплив на статичну міцність, але забезпечує значною мірою зниження усадкового розтріскування, знижує усадку, підвищує ударну в'язкість та морозостійкість бетону, зокрема неавтоклавного пінобетону, що забезпечує водоутримуючу здатність бетонної суміші [10-13].

Для фібрового армування склофібробетонних конструкцій приймається фібра у вигляді відрізків скловолокна, як правило, довжиною від 10 мм до 60 мм, що виготовляється шляхом рубки: ровінгу з лугостійкого (цементостійкого) скловолокна, що випускається за ДСТУ Б В.2.6-2-95; ровінгу з алюмоборосилікатного (нелугостійкого) скловолокна за ДСТУ 19170-2003.

Довжина фібри приймається в залежності від розмірів та армування конструкцій, виду технологічного обладнання з приготування та укладання склофібробетонної суміші. Для армування дрібнозернистого бетону на ПЦ використовується фібра із лугостійкого скловолокна. Фібра з нелугостійкого (алюмоборосилікатного) скловолокна може використовуватися у випадках армування бетону (матриці) на основі глиноземистого цементу, портландцементу з добавкою гіпсу або мікрокремнезему на обмежений термін служби за відповідного обгрунтування.

Використання фібри з алюмоборосилікатного (нелугостійкого) скловолокна для армування склофібробетону на ПЦ допускається в якості фіброві арматури, що розраховується на сприйняття технологічних навантажень при роботі бетону конструкцій у ранньому віці в строк до одного місяця.

1.2.2 Використання в'яжучих речовин із дисперсним армуванням базальтовими волокнами

Як в’яжучі для приготування дрібнозернистого бетону базальтофібробетонних конструкцій слід застосовувати портландцемент та глиноземистий цемент марок не нижче М400, а також добавки мікрокремнезему за ТУ 7-249533; ТУ 7-249533-02; ТУ 2-249533-03 або в’яжуче низькою водопотреби (ВНВ) за ТУ 21-26-20. Призначення

конкретного виду цементу пов'язано з видом фібри, що використовується, досягненням найбільш раціонального її використання у фібробетоні та забезпеченням максимальної міцності та довговічності фібробетонних конструкцій.

Середовище портландцементу, що гідратується, є активним лужним середовищем (pH = 13 і більше). Це визначає вплив такого середовища на армуючі волокна. Продукти гідратації портландцементу надійно оберігають від корозії металеву арматуру, але виявляються досить агресивними по відношенню до будь-яких видів мінеральних (скляних, базальтових) волокон. З хімічної точки зору, основним компонентом рідкої фази твердіє портландцементу, що визначає в основному її вплив на армуючі волокна, є гідроксид кальцію, активно взаємодіє з компонентами базальтового волокна.

При вирішенні питань застосування ПЦ для дисперсно-армованих бетонів важливе значення має визначення оптимальних співвідношень між фазами аліту в цементному в'яжучому та беліті [8, 29]. Підвищений зміст аліту в ПЦ зазвичай є позитивним фактором з погляду захисту від корозії металевої арматури та відповідно сталевих фібр. Водночас час зниження вмісту аліту та підвищення кількості белітової фази в ПЦ зменшує, як правило, інтенсивність агресивного впливу середовища гідратації цементу по відношенню до скляних волокон.

Дослідження, пов'язані з розробкою оптимальних складів білитових портландцементів для склоармованих композицій, були виконані в лабораторії будівельних матеріалів кафедри промислового та цивільного будівництва, ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ. Такий цемент отримували із сировинної суміші на основі вапняково-базальтових гірських порід.

Перспективним є спеціальний склад сульфатованого портландцементу, в якому були відсутні традиційні клінкерні мінерали C_3S та C_3A, а основними мінералами були сульфосілікат кальцію $2(C_2S) \cdot CaS0_4$; сульфоалюмінат кальцію $3(CA) \cdot CaS0_4$ та беліт. Важливо, що вільний вапна в продуктах гідратації такого цементу не виявлено, значення pH цементу, що гідратується,

складають 9-10, т. е. вони, як видно, нижче за порівняно з pH стандартного портландцементу і близьким до значень pH глиноземистого цементу.

Глиноземний цемент. Обсяги промислового виробництва та застосування у будівництві глиноземистого цементу нижче, ніж портландцементу. Згідно з літературними даними, затверділий глиноземистий цемент є більш стійким до багатьох агресивних середовищ, а також більше інертним у хімічному відношенні та менш агресивним до всіх видів мінеральних волокон, ніж звичайний портландцемент. Тому застосування глиноземистого цементу може виявитися у ряді випадків технічно виправданим та економічно обґрунтованим, наприклад при реконструкції, відновлювальні роботи і т.д. Значення pH середовища, що гідратується глиноземистого цементу змінюються не більше 9,5…11, так як вони нижчі, ніж у стандартних портландцементів. При отриманні дисперсно-армованих композицій на основі глиноземистого цементу важливо враховувати, що міцність бетону на цьому в’яжучому з часом у певних умовах може змінюватись як у бік підвищення, так і помітного зниження. Велике значення мають температурні умови, за яких здійснюється процес гідратації цементу.

Гіпсові в'яжучі. Сталева арматура у гіпсових виробах піддається інтенсивної корозії В основному це пов’язано з нейтральністю середовища твердіння гіпсового каменю (pH = 6,5-8). Разом з тим, середовище гідратації гіпсових в'яжучих виявляється практично інертною до всіх видів мінеральних волокон. Тому вони є ефективним армуючим матеріалом для гіпсових виробів Для дисперсно армованих конструкцій доцільно використовувати будівельний та високоміцний (технічний) види гіпсу. У зв’язку з недостатньою водостійкістю виробів на основі гіпсу важливого значення набувають роботи, спрямовані на підвищення водостійкості дисперсноармованих гіпсових конструкцій, що дозволить значно розширити сферу їх застосування [8].

Новим напрямком у технології отримання дисперсно-армованих бетонів є використання наноструктурованих в’яжучих. Відомі розроблені склади та способи отримання нових безклінкерних типів в’яжучих –

наноструктурованих в’яжучих (НВ). В роботах [16, 13, 14] експериментально підтверджено та обґрунтовано ефективність використання фібри при отриманні пористих бетонів неавтоклавного твердіння на основі НВ силікатного складу з урахуванням негідратаційного типу його твердіння.

В роботі було проаналізовано різні в’яжучі, які використовуються для виробництва дисперсного залізобетону (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – В’яжучі для дисперсного армування бетонів мінеральними волокнами

Вид в’яжучого	pH	Примітка
Портландцемент	13	Найбільш поширений і доступний вид в’яжучого, необхідно використовувати різні прийоми та добавки для захисту волокна від корозії
Глиноземистий цемент	9…10	Менш агресивний, ніж ПЦ, але дорожчий і менший доступний вид в’яжучого
Гіпсові в'яжучі	6,5…8	Практично не призводить до корозії мінеральних волокон, однак вироби з гіпсових в’яжучих мають низьку водостійкість
Наноструктуровані в’яжучі силікатного складу	7…10	Комплексний механізм взаємодії НВ та базальтової волокна, застосовується для фібропенобетону. Базальтове волокно бере участь у процесі структуроутворення системи

Таким чином, узагальнюючи дані щодо використання різних в’яжучих речовин, можна зробити висновок, що при використанні звичайного портландцементу важливим є застосування різних способів захисту волокна від дії його лужного середовища.

1.2.3 Використання модифікуючих добавок для виробництва фібробетону

Використання хімічних добавок у складі фібробетонних сумішей рекомендується для досягнення певних значень рухливості та зручноукладальності суміші, виходячи з вимог конкретного виду технології. Хімічні добавки повинні відповідати вимогам відповідних стандартів та технічних умов.

Починаючи з 70-80-х років XX століття у технології бетону стали використовуватися деякі з ультрадисперсних видів кремнезему SiO_2. Застосування таких кремнеземів, що розподіляються в бетонній суміші у вигляді частинок, розміри яких дрібніше зерен цементу, і які вступають у взаємодію з $Ca(OH)_2$, є шлях до отримання дуже щільних і міцних матеріалів [8]. Найбільш вивченим та поширеним на практиці представником ультрадисперсних кремнеземів є мікрокремнезем, що утворюється попутно в результаті конденсації з газової фази при виплавці кремнієвих сплавів (феросиліція, силікохрому, силікомарганця). Мікрокремнезем (МК) є відходом виробництва, який виходить в результаті окислення в газовій фазі монооксиду кремнію SiO, що утворюється при виплавці кремнієвмісних сплавів в електродугових печах, конденсації з газової фази мікрочастинок SiO_2 та їх уловлювання з пічних газів у рукавних фільтрах. У первісному (неущільненому) стані МК складається із сферичних частинок (~ 100 нм), об'єднаних у ланцюжки та кластери, числом від декількох одиниць до кількох сотень одиниць, ізольовані частинки зустрічаються дуже рідко.

Розмір кластерів знаходиться в межах від 300 нм до 1 мкм та більше. Утворення кластерів відбувається в результаті злипання окремих крапель SiO_2, що утворилися при конденсації з газової фази, та подальшого охолодження.

Широке застосування МК у цементних бетонах на певному етапі стримувалося їх відносно високою вартістю, однак цей фактор став менш

значущим і натомість подорожчання всіх компонентів бетонної суміші. Крім того, в останні роки значно збільшився інтерес до високоміцних бетонів, виробництві яких МК одна із основних компонентів складу [12].

Позитивний вплив МК на структуру та фізико-механічні характеристики бетону обумовлено двома причинами: пуццоланічної активністю МК, і навіть високої дисперсністю його частинок. У неущільненому стан частинки МК в 50…100 разів дрібніший від зерен цементу; питома поверхня МК становить 13000-25000 м ²/кг. Кремнезем у такому вигляді здатний вступати в реакцію з гідроксидом кальцію, що вивільняється в процесі гідратації силікатних фаз цементу, з утворенням низькоосновних гідросилікатів кальцію із співвідношенням CaO/SiO_2 - 0,9…1,3:

$$C_3S\ (C_2S) + H2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + Ca(OH)_2$$

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H$$

В роботах [2, 21-23] з метою розробки особливо високострокового тонкозернистого базальтофібробетону досліджено хімічну взаємодію базальтових волокон з продуктами гідратації портландцементу шляхом 3-х літньої витримки та кип'ятіння в насиченому розчині гідрату окису кальцію.

Встановлено, що міцність на розрив моноволокна після еквівалентної 10 рокам експозиції в розчині $Ca(OH)_2$ знижується на 8 %, а його армуючий вплив на цементний камінь – на 10 % нижче, ніж вихідного волокна.

Крім того, встановлено, що введення в цементне в'яжуче тонкодисперсних мінеральних добавок – мікрокремнезему МК-85 та Силінома-ДБС, активності яких у десятки разів вищі за активність базальтового волокна, дозволяє знизити агресивний вплив вапна на базальтове волокно і запобігти його ослабленню в матриці цементного каменю. Заміна портландцементу ПЦ500ДО на композиційне в'яжуче з базальтовим волокном (БВ) збільшує міцність бетону на фракціонованому заповнювачі при стисканні в 1,5 рази, при згинанні – у 2,2 рази [2]. Розроблено оптимальний склад композиційного цементного в'яжучого з коротким (до 9 мм) та тонким (10 мкм) базальтовим волокном (5 % від маси цементу), гіперпластифікатором

Melflux 2651 (2%) та мікрокремнеземом МК-85 (10 %).

Нормативна (28 добова) міцність на стиск становить 184 МПа, а при вигину 27 МПа, що в 1,5 та 3,5 рази, відповідно, вище міцності вихідного портландцементного каменю.

Як відомо, введення модифікатора МБ 10-01 дозволяє отримувати однорідніщу суміш, сприяє зниженню водовмісту суміші та зменшенню енергоємності приготування сумішей. Включений до складу зазначеного модифікатора суперпластифікатор, робить суміш рухомою та зручноукладається, а його тонкодисперсна мінеральна частина збільшує в'язкість і дозволяє покращити якість розподілу волокна. Аналіз стану базальтового волокна під мікроскопом зі збільшенням в 700, 2000 раз, витягнутого із суміші складів 1 і 3 дозволив встановити, що використання модифікатора МБ 10-01 знижує кількість дефектів на його поверхні після перемішування.

1.3 Використання ультрадисперсних добавок у технології виробництва фібробетонів

В останні роки, для модифікації бетонів різного складу та призначення використовуються ультрадисперсні та нанорозмірні добавки.

Застосування нанорозмірних добавок у технології виробництва базальтофібробетонів є перспективним, оскільки в порівнянні відомими та широко вивченими мікророзмірними добавками інтервал дозування нанорозмірних добавок на один або кілька порядків нижче при забезпеченні покращених або порівнянних фізико-механічних показників.

Досить багато досліджень проводиться щодо визначення можливості використання вуглецевих нанотрубок (УНТ) у цементних бетонах. Група авторів, для отримання базальтофібробетонів висунула гіпотезу про

доцільності використання УНТ для підвищення стійкості волокна в лужному середовищі [4-6]. Як зазначається у дослідженнях при введенні УНТ відбуваються значні зміни в зоні контакту цементу та базальтового волокна, що призводить до поліпшення зчеплення волокна та цементного каменю та відповідно покращення властивостей композитів [5].

З огляду на те, що при використанні базальтових волокон необхідно забезпечити збереження волокна в лужному середовищі цікавим видається використання нанорозмірних кремнеземсодержащих добавок.

Як відомо, між пористістю та міцністю цементного каменю існує зворотна залежність, і теоретично максимальна міцність цементного каменю може бути досягнута при нульовій капілярній пористості [4]. Фактично, сучасні тенденції розвитку технології бетону спрямовані на одержання бетону з капілярною пористістю, близькою до нуля.

Одна з умов, необхідних для цього, полягає в тому, щоб у ньому були збалансовані фракції не тільки дрібного та великого заповнювача, але щоб всі тверді компоненти бетонної суміші являли собою безперервний ряд всьому діапазоні розмірів частинок – від найдрібніших нанодисперсних компонентів до великих шматків щебеню. Ключове значення при цьому мають ультрадисперсні кремнеземовмісні наповнювачі з частинками різних розмірів.

Менш вивчені стосовно цементної технології ультрадисперсні кремнеземи - нанокремнеземи (НК). Ці матеріали мають ще більшу дисперсністю проти МК.

В останні роки вчені різних країн ведуть дослідження в галузі отримання та застосування ультрадисперсних матеріалів [1, 15, 16].

Відомо, що зменшення розмірів структурних елементів (зерен, частинок, кристалітів) нижче деякої порогової величини призводить до значного зміни властивостей всього композиту, до складу якого входять такі частинки.

Поведінка наночастинок та механізм їх дії на такі комплексні матеріали, як цемент, повинні бути докладно вивчені, щоб повною мірою використовувати ефект від їх введення до складу в’язких речовин та бетонів.

Додавання НК у цементне тісто та бетон має різні ефекти дії. У літературі можна знайти багато обговорень щодо механізму дії ПК. Можна виділити два основні можливі механізми, при введенні ПК в цемент чи бетон. Перший – розмірний ефект, тобто залежно від природи частинок, ПК може бути використаний як наповнювач, і другий - підвищення пуцоланової активності кластерних сполук. На рисунку 1.2 показаний розмірний інтервал та питома поверхня складових бетону, складена вченими, що дозволяють визначити області використання матеріалів для нанобетону [15].

Як зазначають ряд дослідників [15], механізм дії нанокремнезему пов'язаний в першу чергу з його високою питомою поверхнею, що володіє підвищеною активністю по відношенню до продуктів гідратації портландцементу. Частки нанокремнезему виступають як центри кристалізації для осадження гідросилікатного гелю.

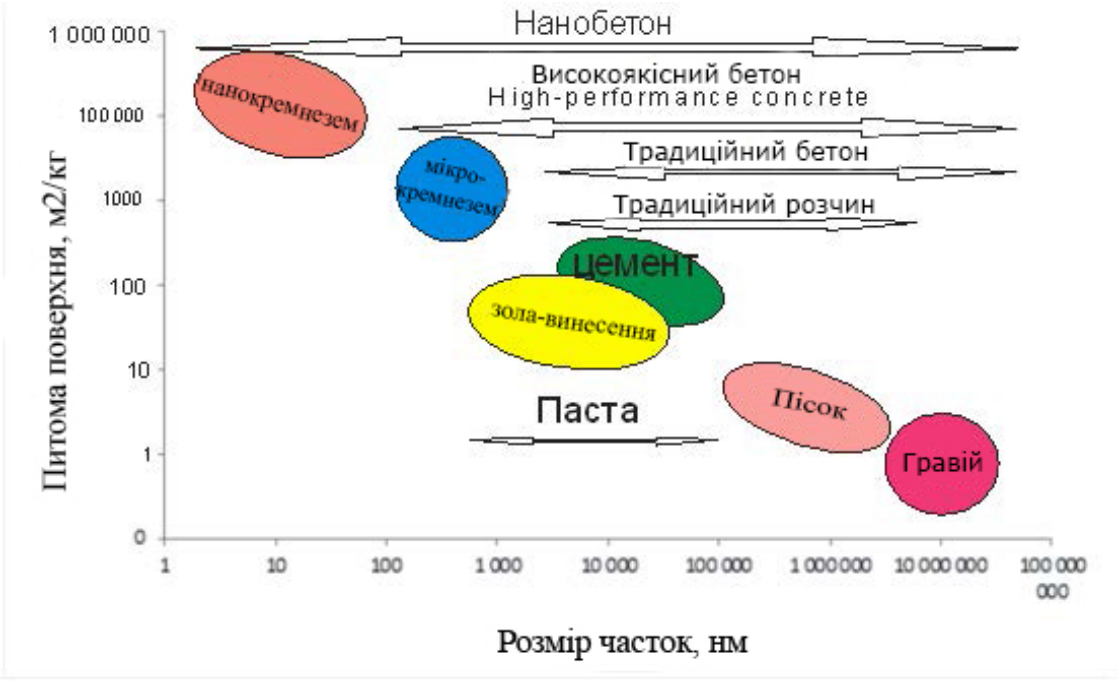


Рисунок 1.2 – Розмірний інтервал та питома поверхня складових бетону

Отримання нанокремнезему можливе з використанням різних методів, розроблених кількома авторами [14-17]. До основних методами, що використовуються для синтезу ПК, є: золь-гель метод, електродуговий метод, біологічний метод, метод осадження та альтернативний метод.

Нанокремнезем може бути отриманий з біовідходів, таких як зола лушпиння рису.

Якщо першим кроком на шляху створення високоякісних бетонів нового покоління стало застосування мікрокремнезему, то як наступний рівень слід розглядати введення до складу бетонних ультрадисперсних сумішей кремнеземів із ще меншим, ніж у МК, розміром первинних частинок. Інтерес до таким матеріалам, як обложений і колоїдний SiO2, в даний час неухильно зростає і знаходить конкретне практичне втілення в бетонні технології. Обложений SiO_2 у деяких випадках вводять до складу бетонів RPC спільно з мікрокремнеземом, забезпечуючи міцність при стисканні 200…800 МПа та міцність при вигині до 100 МПа [12].

Bjonrnstrom із співавторами [14] досліджували процес гідратації Ca_3SiO_5 цементу та встановили прискорені ефекти колоїдного кремнезему та роль води у процесі гідратації. У їх дослідженні було виявлено, що колоїдний кремнезем прискорює розчинення аліту C3S, тим самим надає швидке формування CSH фази.

Quercia та Brouwers [15] вивчали застосування часток НК у розчинах. Gaitero із співавторами [16] вивчили та довели вплив частинок ПК на зниження швидкості вимивання кальцію із цементного тіста. Показана можливість зниження швидкості вимивання портландиту трьома способами, такими як зниження пористості, перетворення портландиту на CSH гель за допомогою пуцоланової реакції та зміни внутрішньої структури CSH гелю, шляхом збільшення середньої довжини силікатних кіл. Було зроблено висновок, що додавання нанокремнезем може контролювати руйнування CSH внаслідок вимивання кальцію, і може збільшити загальну міцність матеріалів на основі цементу на кожній стадії. Також опубліковані дослідження показали збільшення довговічності додаванням нанокремнезему та зниження швидкості вимивання кальцію із цементного тіста [10, 11].

Непрямий метод визначення в’язкості, шляхом реологічних досліджень цементного тесту та розчинів є корисним для того, щоб прогнозувати ефект

прискорення гідратації при введенні нанокремнезему [10, 17]. В результаті було доведено, що цементне тісто і будівельний розчин додаванням нанокремнезему вимагає більше води, щоб зберегти зручноукладальність розчинів постійним, і був зроблений висновок, що нанокремнезем показує сильну тенденцію до адсорбції іонних частинок водному середовищі, а також призводить до утворення агломератів. Крім того, важливо відзначити, що необхідно використовувати диспергувальну добавку або пластифікатор зменшення ефекту агломерації. Було опубліковано та досліджено виробництво нанокремнезему з олівіну, та додавання його до бетону.

Дослідники [18, 19] опублікували, що через посилюючий ефект нанокремнезему в цементному тесті, міцність та довговічність бетону можуть бути збільшено.

Ефект збільшення фізико-механічних характеристик при введенні нанокремнезему в ПЦ був показаний у роботах [10, 15, 18]. Очевидно, що механізм дії нанокремнезему пов’язаний з високою питомою поверхнею, нанокремнезем служить центром кристалізації для осадження CSH-гелю.

Вплив нанокремнезему на водопроникність та мікроструктуру бетону досліджував Ji [29] і як показали результати, нанокремнезем може покращити мікроструктуру та знизити водопроникність затверділого бетону. Крім того, було встановлено, що через велику питому поверхню нанокремнезему, він надає бетону більш в'язкий стан, і може реагувати з кристалами Ca(OH)2, таким чином, зміцнюючи міжфазну перехідну зону (ITZ).

Li та ін [29] спостерігали вплив додавання нанокремнезему на проникність та міцність на стиск золоцементних розчинів (еко-бетон). З аналізу ртутної порометрії встановлено, що відносна проникність і розмір пор в бетоні були знижені, а також міцність на стиск золоцементних бетонів збільшилася при додаванні нанокремнезему.

Встановлено, що при введенні нанокремнезему мікроструктура бетону стає більш рівномірним і щільним.

Jo та співавтори опублікували дослідження з розробки порошкових бетонів з частинками нанокремнезему. Різні фізичні, механічні та хімічні характеристики, такі як тепловиділення, міцність на стиск та мікроструктури цементного каменю з нанокремне земом, були досліджені, дані дослідження добре узгоджуються з [17]. Було встановлено, що за використання суперпластифікаторів, можна уникати агломерації нанокремнезему в цементному тесті.

Baomin та ін. вивчали морозостійкість високофункціональних бетонів з нанокремнеземом і виявили, що нанокремнезем покращує мікроструктуру цементу і, отже, суттєво підвищує морозостійкість бетону. Крім того, було помічено, що мікроструктура та вид CSH гелю є більш однорідними, щільними та впорядкованими, ніж у бездодатковому складі.

Hosseini та ін [24] досліджували вплив нанокремнезему на мікроструктуру та механічні властивості фероцементу. Результати дозволяють зробити висновок, що цементні розчини, що містять наночастинки, мають досить високу міцність і щільну міжфазну перехідну зону, ніж звичайні розчини фероцементу, а пластичність розчинів з додаванням та без наночастинок залишається однаковим.

Вплив нанокремнезему на механічні властивості (міцність на стиск та розрив) та довговічність (водопоглинання та глибина проникнення хлоридів) бетону було вивчено в [26] і встановлено, що через пуцоланову активність нанокремнезему досягнуто чудові властивості.

Li та ін [20] досліджували, вплив додавання нанокремнезему в бетони з високим вмістом золи винесення та порівняли результати з контрольним бездодатковим бетоном.

Було встановлено, що активація пуцоланових властивостей бетону на основі золи винесення з нанокремнеземом значно зросла. У звіті про дослідження показано зменшення проникності навіть із невеликим додаванням нанокремнезему в золобетон, що також призводить до високої міцності в початкові та тривалі терміни твердіння.

Sadrmomtazi та Barzegar [27] опублікували експериментальні дослідження з впливу нанокремнезему на властивості самоущільнюючого бетону з додаванням і без додавання золи рисового лушпиння.

Результати показали поліпшення фізико-механічних властивостей бетону, що самоущільнюється з додаванням нанокремнезему. Були розглянуті ефекти заповнення пір та прискорення гідратації. Важливість суперпластифікаторів для диспергації наночастинок також було розглянуто.

Qing та ін [29] досліджували вплив додавання нанокремнезему в цементний камінь у порівнянні з мікрокремнеземом за допомогою вимірювань міцності на стиск та вигин.

Результати показали, що хоч і нано- і мікрокремнезем знаходяться в аморфному стані, але їх вплив на консистенцію та терміни схоплювання цементних паст по-різному. Нанокремнезем призводить до більш в’язкої консистенції цементної пасти та прискорює процес гідратації цементу, і підвищує міцність на стиск особливо на ранній стадії.

При збільшенні вмісту нанокремнезему, темп набору міцності збільшується, і спостерігається більша пуцоланова активність, ніж у мікрокремнезему.

Було зроблено висновок, що нанокремнезем пов’язує кристали гідроксиду кальцію (CH) і в результаті зменшує орієнтації та зменшує розмір CH кристалів поверхні розділу фаз. Важливо, що покращення на межі розділу більш ефективно з нанокремнеземом, ніж з мікрокремнезем.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика вихідних матеріалів для отримання базальтофібробетону

В проведених дослідженнях для отримання дрібнозернистого базальтофібробетону були використані такі сировинні матеріали: портландцемент (ПЦ) ЦЕМ І 32,5 Н ДСТУ Б В.2.7-46:2010, кварц-польовошпатовий пісок з модулем крупності Мкр = 2,3, базальтове волокно на основі базальту, нанодисперсний кремнезем (НК). Хімічний, мінералогічний склад ПЦ, базальту та піску, їх основні властивості представлені в таблицях 2.1 – 2.4, гранулометричний склад піску - на рисунку 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сировинних матеріалів

Сировинні матеріали	Вміст оксидів, % за масою									
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	FeO	SO_3	ппп
Портланд-цемент	21,45	4,92	65,4	4,27	5	0,2	0,3	-	2,01	-
Пісок	74,54	13,45	2,5	1,66	0,64	3,1	3,1	-	0,15	1,66
Базальт	48,1	13,9	8,8	5,3	3,7	1,7	3,4	6,7	0,2	-

Таблиця 2.2 – Мінералогічний склад ПЦ

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
59…63	15…19	4…5	14

Таблиця 2.3 – Характеристики цементу

Найменування показника	Одиниці вимірювання	Показники
Нормальна густота цементного тесту	%	24,60
Середня міцність при стисканні у віці, доба: - 7; - 28;	МПа	 18,2 38,3
Середня міцність після пропарювання	МПа	31,7
Початок схоплювання	мін	150
Питома ефективна активність природних радіонуклідів	Бк/кг	Не більше 370

Таблиця 2.4 - Характеристики піску

Параметри	Од. вимірювання	Значення характеристики
Насипна густина	кг/м^3	1550
Справжня густина	кг/м^3	2600
Модуль крупності	–	2,3
Повний залишок на ситі 0,63	%	46
Зміст пилоподібних частинок	%	0,9
Порожнеча	%	38…40
Водопотреба	%	6,5

Пісок за зерновим складом згідно з ДСТУ Б В. 2.7-131:2007 відноситься до пісків II класу середньої крупності, за змістом мулистих, глинистих і пилуватих домішок відповідає вимогам для виробництва бетону.

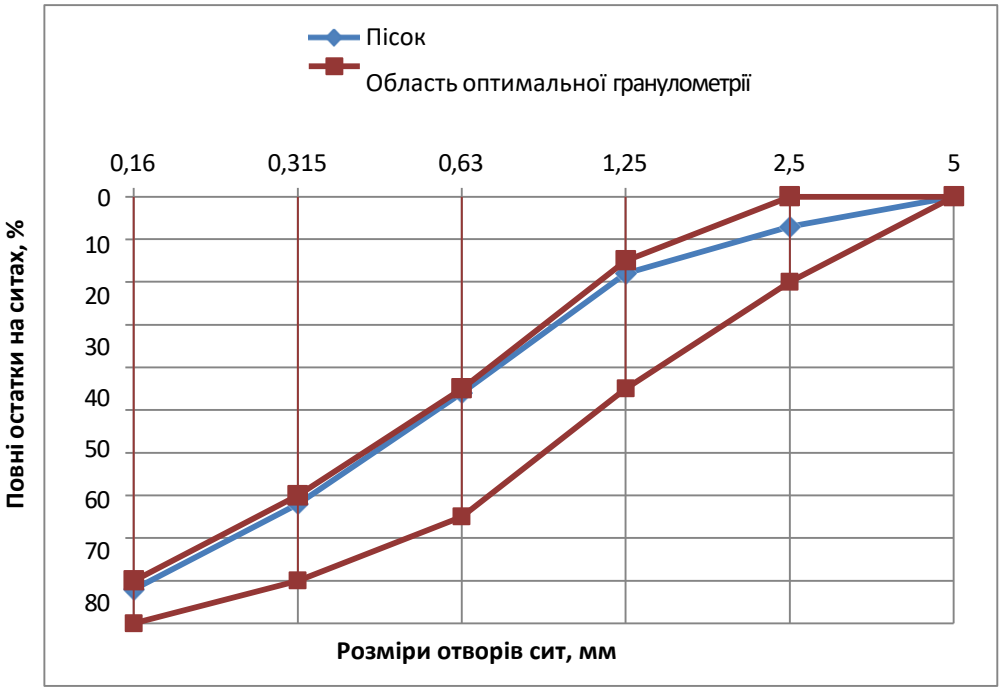


Рисунок 2.1 – Гранулометричний склад піску

Базальти складаються з кальцієвого польового шпату (основного плагіоклаза, зазвичай лабрадориту) та авгіту або іншого піроксену. Часто є олівін (олівінові базальти). Основна маса порфірових різниць містить лабрадорит, авгіт та змінну кількість вулканічного скла, яке може і відсутнє (наприклад, у долеритах – повнокристалічних базальтів) [18].

2.1.1 Спосіб отримання та характеристики базальтового волокна

Малотонажне виробництво теплоізоляційних матеріалів на місцевих сировинних ресурсів є цікавим і може забезпечувати власні потреби регіону.

Одним з перспективних напрямків при отриманні розплавів при мінераловатному виробництві є застосування електротермічного методу для плавлення вихідної сировини. На відміну від вагранного та ванного методів при електротермічному методі багатостадійність процесів замінюється одностадійністю, що дозволяє скоротити витрати на виробництво обладнання

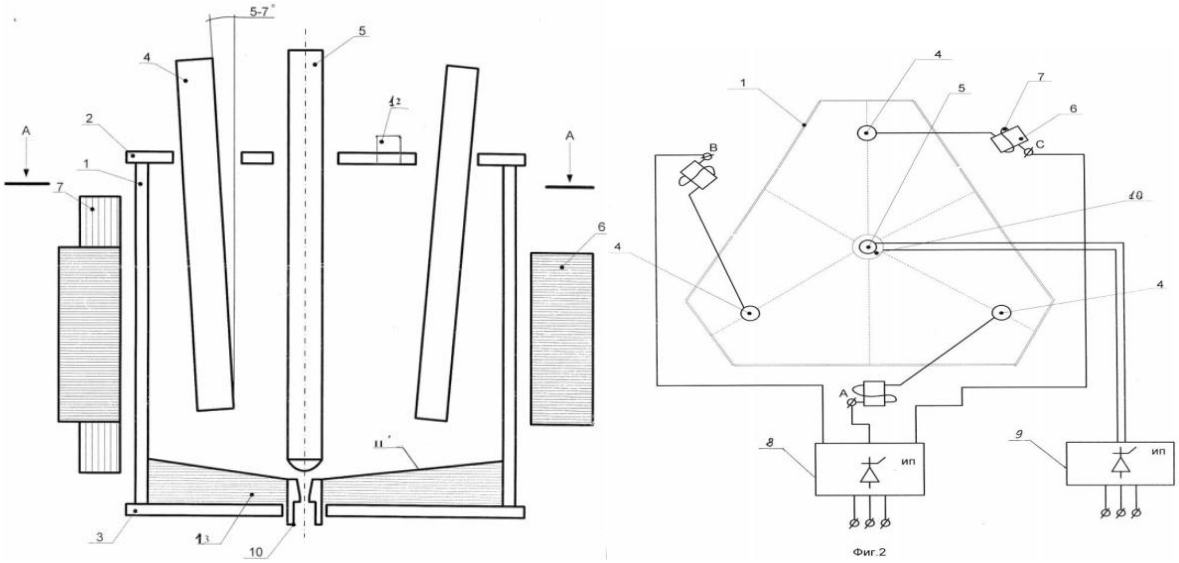
та полегшує його експлуатацію.

Основними способами утворення волокна зі струменя розплаву, що випливає з плавильного агрегату, є дутьовий, валковий та дисковий.

При дуттьовому способі формування волокон проводиться роздув вертикального струменя розплаву потоком газоподібного енергоносія (пара або стисненого повітря), який розщеплює в роздувній головці струмінь розплаву на елементарні цівки і витягує їх у волокна за проміжок часу, протягом якого в'язкість розплаву не встигає досягти критичного значення.

За змістом неволокнистих включень цей спосіб має переваги перед іншими.

Продуктивність міні-заводу становить 9200 м^3 волокнистих матеріалів рік. Технологічна лінія розроблена на основі електромагнітного плавильного агрегату (рис. 2.2).



а б

Рисунок 2.2 - Поздовжній (а) та поперечний (б) розріз електромагнітного технологічного реактора: 1 – реакційна камера; 2 - водоохолоджувана кришка; 3 – водоохолоджуване дно; 4 – стрижневі електроди (3 шт.); 5 - стрижневий замикаючий електрод; 6 – полюсний наконечник; 7 –обмотка; 8 – джерело живлення; 9 – додаткове джерело живлення для підігріву струменя; 10 - пристрій для виведення розплаву (літка); 11 - футероване днище камери; 12 – патрубок у реакційну камеру для подачі сировини; 13 – футерування

Конструктивні особливості реактора дозволили отримувати чистий розплав, вільний від оцлюдованих газів та відновлених металів, що дає можливість виробництва якіснішої продукції. Таким чином, вдалося організувати режим виплавки в один етап, що складається з комбінованого нагріву сировини. При пуску відбуваються електродуговий плазмове нагрівання та розплавлення сировинного матеріалу, а надалі, по мірі проплавлення та утворення струмопровідної чаші розплаву, відбуваються підсипка сировини та протікання струму через розплавлену алюмосилікатну масу, з її одночасним електромагнітним перемішуванням і гомогенізацією при допомоги послідовно включених серієсних електромагнітів, що значно скорочує час виходу на робочий режим та знижує енергоємність виробництва. Визначається на практиці потужність, що витрачається, необхідна для отримання розплаву об'ємною масою до 150 кг/год становить 1,1-1,3 кВт/кг (Для порівняння, витрачається потужність працюючих індукційних печей – 6 кВт/кг).

Отримані базальтові волокна мають такі характеристики (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 - Характеристики базальтового волокна

Характеристика	Значення
Середній діаметр волокон, мкм	10
Міцність на розрив, МПа	1350
Температуростійкість, °С	600
Хімічна стійкість (втрата маси), % при обробці: - H_2O - HCl - KOH	 99,6 69,3 91,5

З даних таблиці 2.5 видно, що базальтові волокна мають досить високою водостійкістю. Відомо, що за кислотостійкістю волокна умовно поділяються на три групи: розчиняються, вилуговуються і щодо стійкі. Базальтові волокна, одержані шляхом плавлення сировини при електротермічному методі

виявилися стійкими до дії кислот і лугів. Для пояснення причин високої хімічної стійкості базальтових волокон проводилося визначення модуля кислотності Мк за формулою:

$$M_K = \frac{SiO_2 + Al_2O_2}{CaO + MgO} \quad (2.1)$$

Як випливає з розрахунку, модуль кислотності для волокон, отриманих з базальту, становив Мк = 4,94.

2.1.2 Спосіб отримання та характеристики нанокремнезему

При дії прискореними електронами на тверде тіло енергія виділяється безпосередньо обсягом речовини на глибині декількох міліметрів, викликаючи іонізацію речовини та розігрів цього шару. За достатньої потужності на одиницю поверхні пучка електронів температура поверхневого шару речовини досягає температури кипіння, тобто починається випаровування речовини. Енергія прискорених електронів витрачається в основному на нагрівання та випаровування кварцового піску, випромінювання з поверхні розплавленої рідини та нагрівання повітря в реакторі [37].

Раніше, у роботах [25, 26] були проведені дослідження щодо отримання високоміцного бетону із застосуванням даного нанокремнезему.

Прискорювач електронів дозволяє при зміні технологічних параметрів отримувати ПК з різною природою поверхні, надаючи йому гідрофільні (Таркосіл-20®) та гідрофобні (Таркосіл-05®) властивості. В технології отримання модифікованого бетону НК Таркосіл-05 показав найкращі фізико-механічні показники, що пов’язано з характером його поверхні, що обумовлює утворення навколо часток гідратної плівки. Товщина гідратної плівки Таркосіл-05 менша, ніж у Таркосіл-20®, що позитивно позначається на їх розподілі в обсязі води замішування. Таркосіл-05®, що використовується в

проведених дослідженнях для підвищення корозійної стійкості базальтового волокна, що має наступні показники: середній розмір частинок – 53 нм (рис. 2.3), питома поверхня – 50,6 $м^2/г$ (за даними приладу «Сорбі-М»), ПК складається більш ніж на 99 % аморфного кремнезему, вміст домішок, мас. %: Al – 0,01, Fe – 0,01, Ti – 0,03.

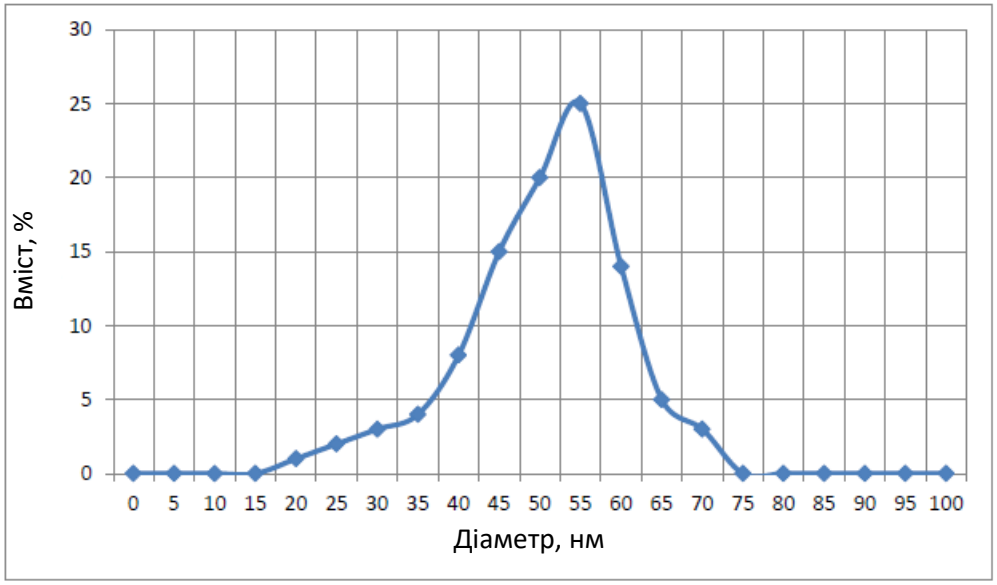


Рисунок 2.3 – Розподіл частинок НК Таркосіл®-05 за розмірами

Отриманий порошок нанокремнезему марки Такросіл був випробуваний для модифікування епоксидних смол, силіконової гуми, лакофарбових матеріалів. Досліджено вплив добавок нанорозмірного порошку діоксиду кремнію Таркосіл на міцнісні та пружні властивості (межа міцності на розтяг та модуль пружності Юнга) силоксанового каучуку.

Показано, що при зростанні концентрації нанопорошку модуль пружності зростає, а межа міцності на розтяг спочатку зростає, а потім падає.

Таким чином, проведені експерименти показали, що невеликі добавки нанорозмірного порошку діоксиду кремнію Таркосіл підвищують міцність і пружність каучуку – підвищуються його межа міцності на розтяг і модуль пружності Юнга, причому максимальна міцність досягається при концентрації порошку приблизно 9 %. Крім того, отримані результати модифікації перхлорвінілової фарби нанакремнеземом марки Таркосіл. Зносостійкість такого модифікованого покриття збільшилася більш ніж у 10 разів, без зміни

адгезії, коефіцієнта відображення у видимій області, пружних властивостей.

Дослідження ролі та значення нанорозмірного кремнезему при модифікації структури цементного каменю є важливим етапом в створення будівельних композитів нового покоління.

Слід зазначити, що механізм модифікування цементної структури каменю мікророзмірним кремнеземом різної природи досить добре вивчений, у той час як питання про механізм, міру та характер впливу нанокремнезем залишається відкритим.

В роботі порівняльні результати визначення міцності характеристик цементного каменю, модифікованого із застосуванням Таркосіл-05 та промислового пірогенного НК «HDK Wacker» показували, що з добавкою Таркосіл-05 отримані більш високі показники, як у ранні, так і більш пізні терміни твердіння. Таркосіл-05 призвело до підвищення міцності цементного каменю на 5-10% порівняно з пірогенним ПК «HDK Wacker», що обумовлено наявністю у складі Таркосіл-05 домішок Al в нанодисперсному стані. Це сприяє освіті в ранній період гідратації більшої кількості гідросульфоалюмінатів кальцію, які виступають як армуючий компонент і беруть участь у ранньому наборі міцність цементного каменю.

В дослідженнях Таркосіл-05 використовували для прискорення твердіння та підвищення міцності базальтофібробетону та покращення корозійної стійкості базальтового волокна.

2.2 Характеристика методів досліджень

Експериментальні дослідження з одержання базальтофібробетону з ПК проводили згідно з блок-схемою, представленою на рисунку 2.4.

Для оцінки ефективності використання ПК та базальтової фібри в складі цементу з отриманих в'яжучих досліджуваних складів готували зразки

розміром 20х20х20 мм. Зразки зберігалися у формах при t=20…22°С, W=90...95%, потім без форм над водою протягом 28 діб.



Рисунок 2.4 – Блок-схема експериментальних досліджень

Фізико-механічні властивості цементу визначали за ДСТУ Б EN 197-1:2015 Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197-1:2011, IDT).

Визначення дисперсності в’яжучих здійснювали на приладі ПСХ-2 методом повітропроникності через шар матеріалу.

Нормальну густоту та терміни схоплювання визначали на приладі Віка, пробу в’яжучого готували за ДСТУ Б В.2.7-187:2009.

Фізико-механічні властивості зразків визначали за ДСТУ Б EN 197-1:2015.

Зразки бетонів виготовляли в залежності від виду випробувань розмірами 4х4х160 мм. Зразки тверділи у нормальних умовах при t=20±2°С та вологості 95…98 % у гідравлічній ванні затвора.

Випробування в’яжучих та бетонів на їх основі проводилися з використанням стандартних методик, що відповідають вимогам нормативної документації України на атестованому устаткуванні.

Визначення деформативних показників базальтофібробетону призменої міцності та модуля пружності визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008.

Деформації усадки та повзучості визначали за ДСТУ Б В.2.7-216:2009, морозостійкість бетонів визначали за ДСТУ Б В.2.7-47-96.

Для отримання водної суспензії ПК, досліджень фазового складу та мікроструктури цементного каменю модифікованого ПК та базальтовим волокном використовували pH-метр «Pen type pH-009», рентгенівський дифрактометр XRD-7000 S Shimadzu, растрові електронні мікроскопи.

Багатопроменева система, оснащена електронною та іонною гарматою JIB-4501 у комплекті з безазотною системою енергодисперсійного мікроаналізу JEOL JIB-4501 дозволяє вивчати фізико-хімічні властивості речовини за допомогою електронної скануючої мікроскопії з роздільною здатністю до 5 нм, іонного травлення з низьким рівнем пошкодження речовини, системи енергодисперсійного аналізу елементного складу речовини в області дослідження, системи дифракційного аналізу параметрів кристалічної ґрати речовини.

Технічні характеристики мікроскопа JEOL JSM-6510LV:

- просторова роздільна здатність у високому вакуумі (HV) 3 нм;

- просторова роздільна здатність в низьковакуумному режимі (LV) 4 нм;

- збільшення від 5 до 300 000;

- детектори - SEI - зображення у вторинних електронах, BEIW - зображення у зворотно-розсіяних електронах;

- максимальний розмір зразка 150 мм (діаметр);

- система вакуумного відкачування - пластинчасто-роторний форвакуумний насос.

Порошковий дифрактометр Shimadzu XRD 7000S призначений для рентгенографічного дослідження полікристалічних речовин.

Характеристики дифрактометр Shimadzu XRD 7000S:

- тип гоніометра: вертикальний θ-θ;

- радіус гоніометра: 200…275 мм;

- тип детектора: сцинтиляційний;

- діапазон кутів 2θ: від -12 до 164º;

- мінімальний крок 2θ: 0,0002 º.

Для ефективного розподілу базальтової фібри (БФ) до складу цементу і бетону використовували такі способи:

- ударно-стираючий (турбулентний змішувач);

- стиральний (стрижневий віброистирувач).

Вибір способів змішування та подрібнення був обумовлений особливостями характеру подрібнення у млинах різних конструкцій.

Реалізація зазначених способів розподілу БФ проводилася в помольних агрегатах (таблиці 2.6; 2.7).

Таблиця 2.6 - Основні технічні характеристики вібростирача BI-4x350

Найменування	Значення
Величина вихідного матеріалу, не більше, мм	3…5
Кількість помольних склянок, шт.	4
Ємність однієї помольної склянки, $см^3$	350
Корисна ємність однієї помольної склянки, см	240
Частота коливань, Гц	24
Встановлена потужність, кВт	0,75
Маса балбери, що меле, г	870
Маса виробу у зборі, кг	78
Габаритні розміри, мм: довжина ширина висота	 1220 540 500

Таблиця 2.7 - Технічні характеристики турбулентного змішувача С2.0

№ п/п	Параметри, одиниці виміру	Значення
1	Повний об'єм чаші, $дм^3$	2,6
2	Частота обертання чаші (при частоті живильного двигун напруги 50 Гц), об/хв	42
3	Межі зміни частоти живильного двигуна напруги (з кроком 10 Гц), Гц *	40...70
4	Частота обертання ведучого валу, об/хв*	34/42/50/59
5	Потужність електродвигуна, кВт	0,18
6	Напруга живлення, В	220

Для оптимізації складів базальтофіброцементних композицій був заплановано композиційний план експериментів. Рівняння регресії для трифакторного експерименту має такий вигляд (математична модель другого порядку):

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_{11}x_1^2+b_{22}x_2^2+b_{33}x_3^2+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+b_{23}x_2x_3 \quad (2.2)$$

де x_1, x_2, x_3 – значення факторів; b_0 - вільний член, рівний виходу при $x_i=0$; b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти регресії складових факторів, що вказують на вплив того чи іншого фактора на досліджуваний прогрес; b_{11}, b_{22}, b_{33} - квадратичні коефіцієнти регресії складових факторів, що вказують вплив того чи іншого чинника на досліджуваний прогрес; b_{12}, b_{13}, b_{23} - коефіцієнти регресії при творах факторів, що свідчать про наявність подвійної взаємодії між факторами.

Досліди для визначення коефіцієнтів регресії проходили за суворим планом. Для кожного фактора, що досліджується в експерименті, було обрано рівні: умовний нульовий рівень – 0, нижній рівень – -1 верхній рівень – +1 та крок варіювання факторів.

Відповідно до методики експерименту проведено статистичну перевірка значимості коефіцієнтів та придатності отриманого рівняння для описи досліджуваних залежностей.

Статистична обробка результатів експерименту проведена засобами редактора MS Excel.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЧОВИННИХ СКЛАДІВ БАЗАЛЬТОФІБРОЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ

3.1 Вплив вмісту нанокремнезему та базальтового волокна на фізико-механічні властивості цементного каменю

Рівномірність розподілу Таркосіл®-05 в об’ємі води замішування має ключове значення для стабільності фіброцементних властивостей композицій. В даний час часто застосовують спільну обробку ультразвуком та поверхнево-активною речовиною. При дії ультразвуку на дисперсну систему виникають сили, які, як правило, сприяють руйнуванню великих агрегатів та об’єднанню невеликих груп частинок.

Раніше у роботах щодо визначення ефективного способу розподілу наночастинок було проведено нагрівання наночастинок з водою замішування до температури 50...60 °С, яке є більш ефективним порівняно з ультразвуковою обробкою [34-36]. У дисперсній системі встановлюється седиментаційно-дифузійна рівновага, яка з підвищенням температури сприяє не тільки диспергуванню агрегатів, а й вирівнюванню концентрації частинок з усього обсягу води.

Розглядалися два способи введення ПК у воду замішування: ультразвукова обробка води з нанодисперсною добавкою та поступове нагрівання води до температури 40...80 °С. Для диспергування агломерату НК способом ультразвуковоъ обробки був використаний ультразвуковий диспергатор «СТ400А СТ-Brand». Результати досліджень щодо визначення оптимального часу обробки води з Таркосіл-05® представлені на рисунках 3.1...3.4.

Оцінка ефективного способу рівномірного розподілу добавки НК проводилася за показником питомої електропровідності та водневого

показника pH модифікованої води, визначеної на приладах - кондуктометр «HM Digital Aquapro», pH-метр «Pen type pH-009».

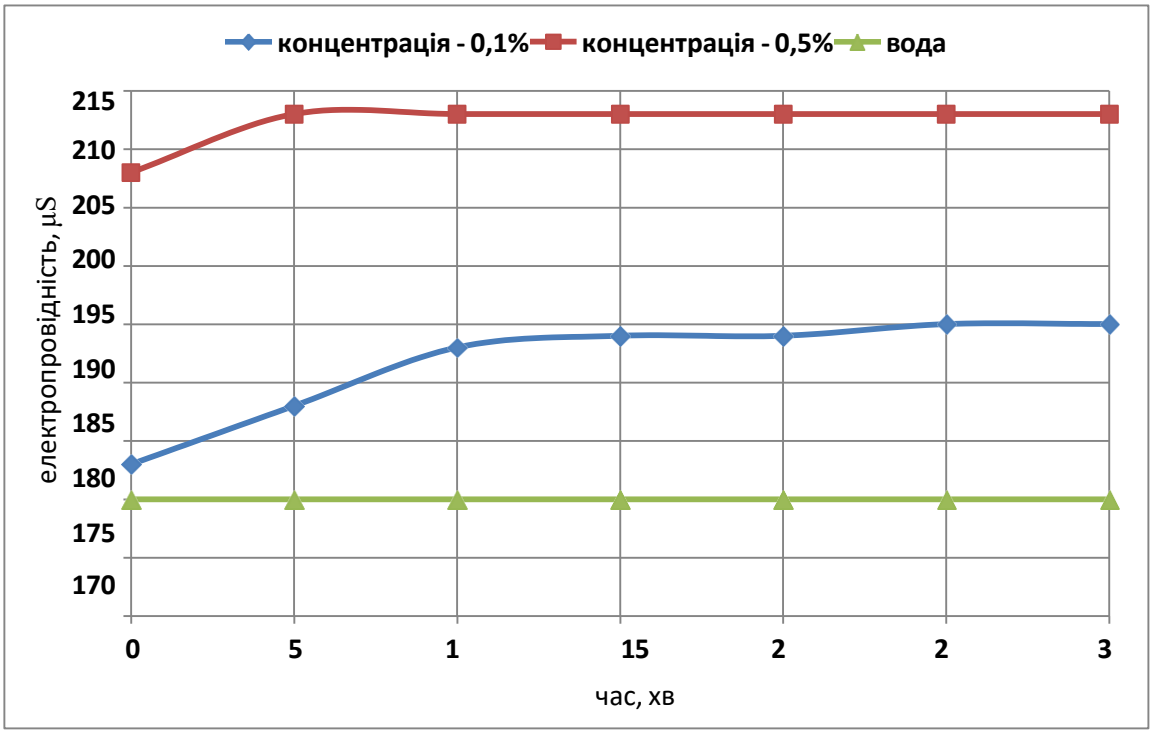


Рисунок 3.1 - Вплив часу ультразвукової обробки на зміну питомої електропровідності модифікованої води

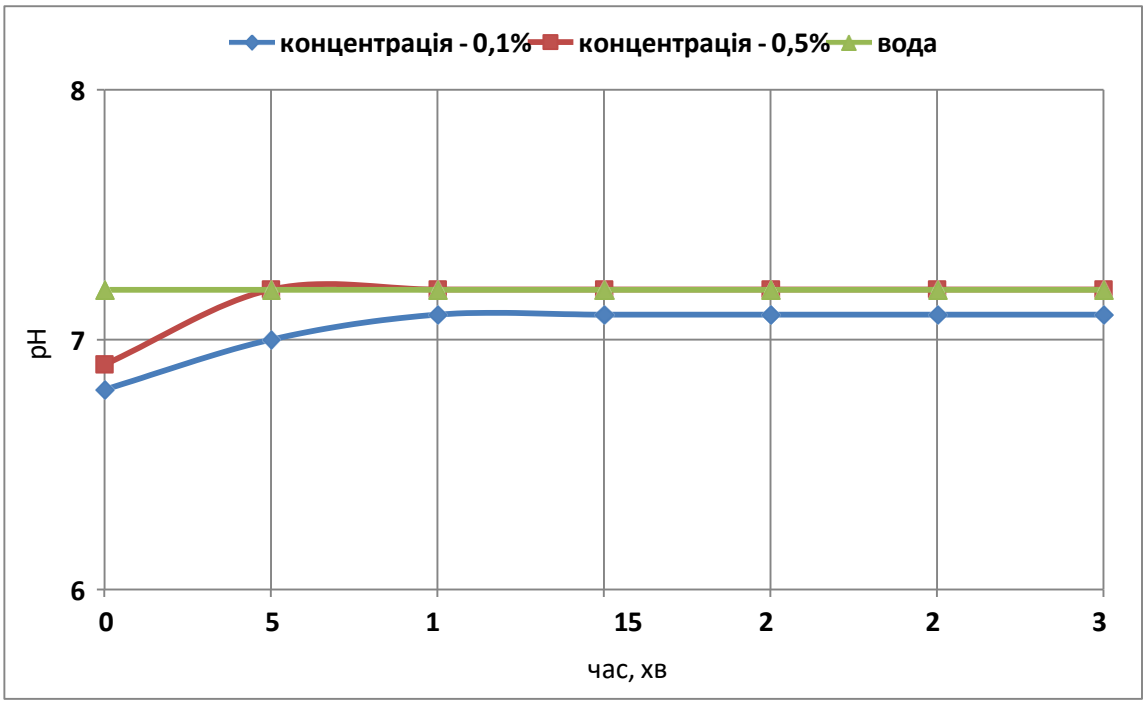


Рисунок 3.2 – Вплив часу ультразвукової обробки на зміну pH модифікованої води

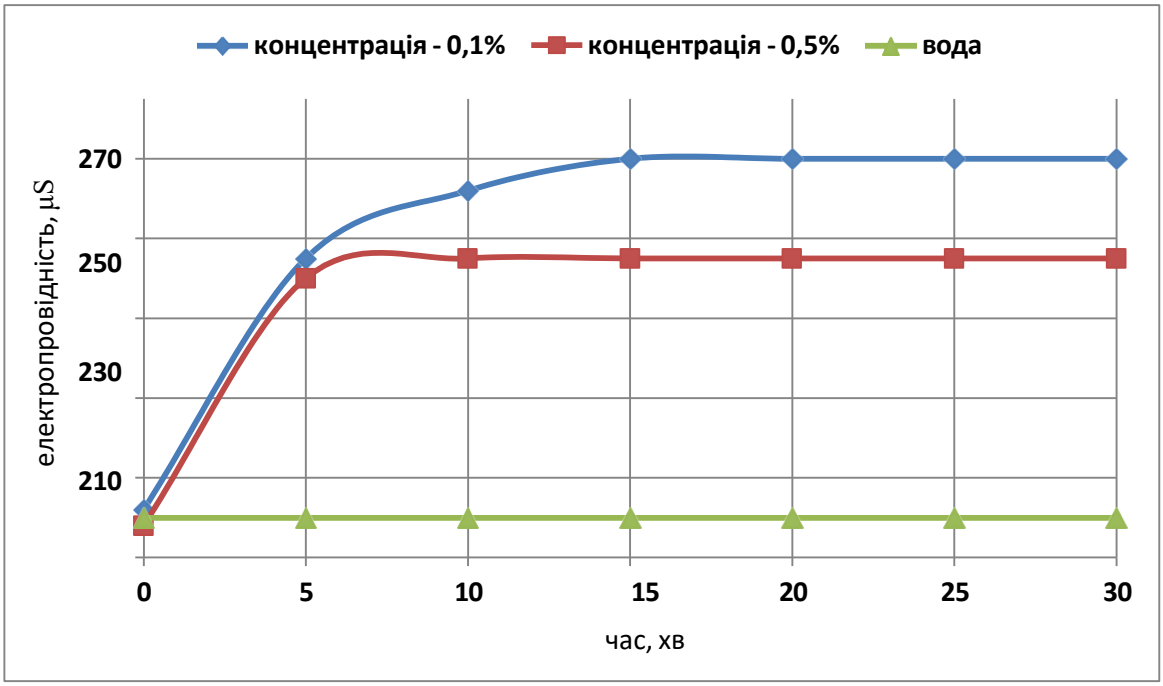


Рисунок 3.3 – Вплив часу нагрівання (60 °С) на зміну питомої електропровідності модифікованої води

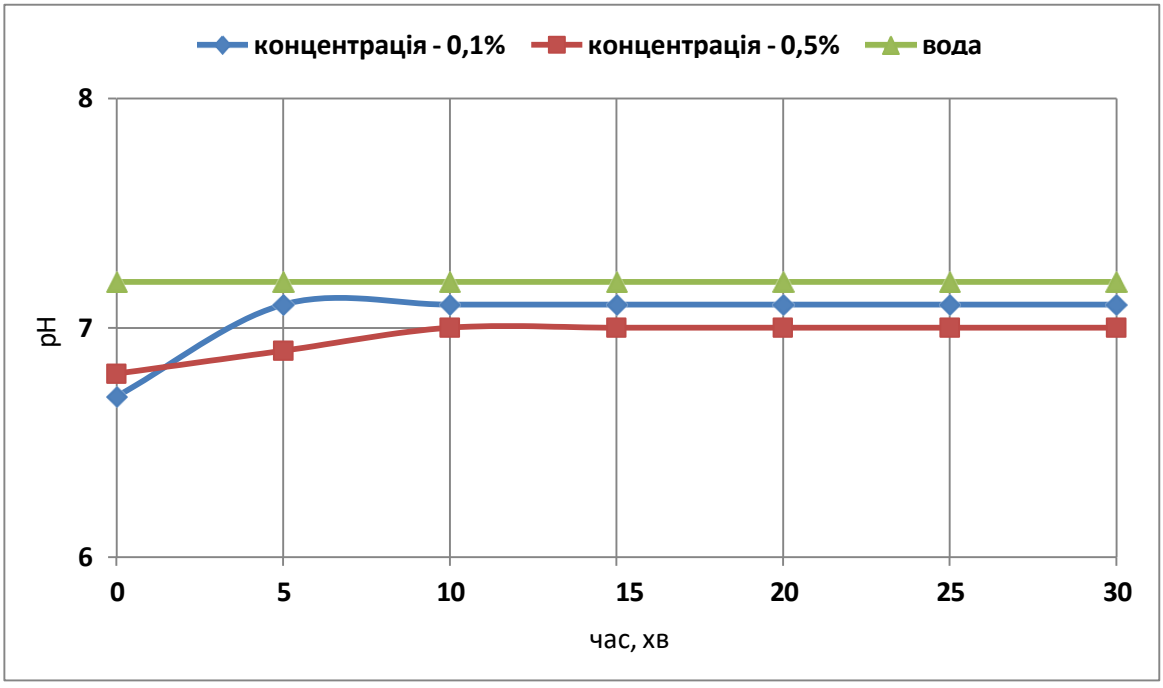


Рисунок 3.4 – Вплив часу нагрівання (60 °С) на зміну pH модифікованої води

Аналіз результатів показує, що як при ультразвуковій обробці, так і при нагріванні в інтервалі часу 5...10 хв відбувається найбільше зміна показників модифікованої води. Оскільки надалі відбувається вирівнювання показників на певний рівень, можна зробитивисновок, що 5...10 хв достатньо для

рівномірного розподілу ПК в обсязі води.

Оптимальний спосіб і час розподілу ПК у воді замішування оцінювали за показниками міцності ПЦ з добавкою ПК у кількості 0,5 % від маси цементу. Результати визначення характеристик міцності ПЦ представлені на рисунку 3.5.

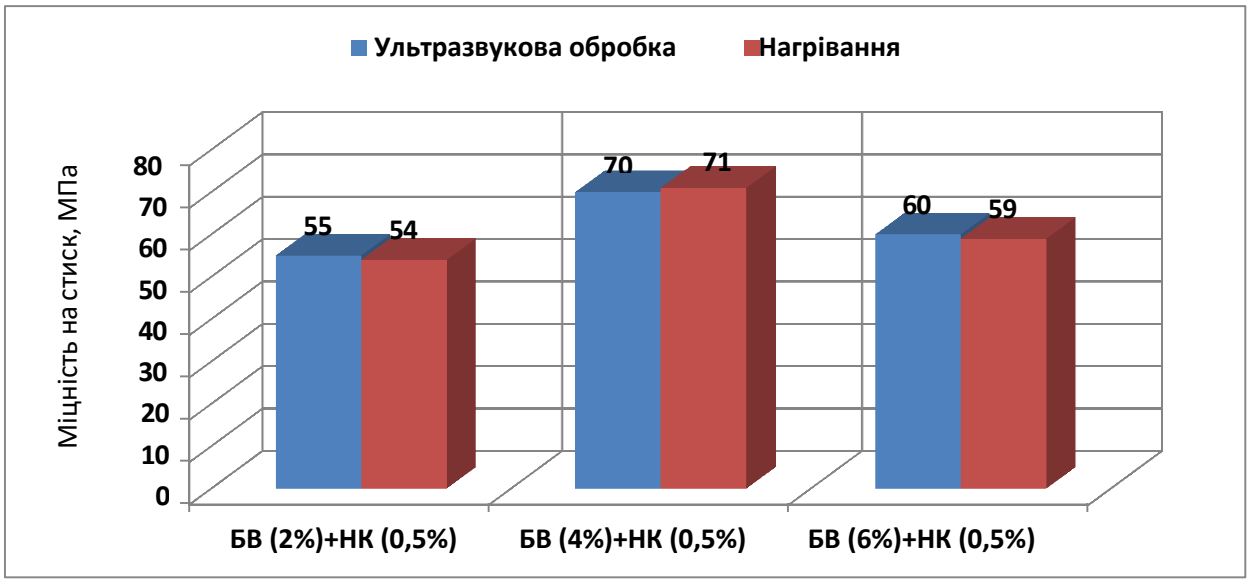


Рисунок 3.5 – Порівняння способу розподілу нанокремнезему

Аналіз результатів показує, що, як у випадку ультразвукової обробки, так і у разі нагрівання води міцність при стисканні модифікованого цементного каменю можна порівняти. Разом з тим, розподіл наночастинок за допомогою нагрівання є більш ефективним у порівнянні з ультразвуковою обробкою, тому що в дисперсній системі встановлюється седиментаційно-дифузійна рівновага, яка з підвищенням температури сприяє не тільки диспергуванню агрегатів, а й вирівнюванню концентрації частинок з усього обсягу води. Це підтверджується результатами досліджень, коли при нагріванні забезпечується диспергування наночастинок. При тепловому впливі енергії теплового руху молекул середовища-носія має бути достатньо для подолання сил поверхневого взаємодії між частинками в агрегаті.

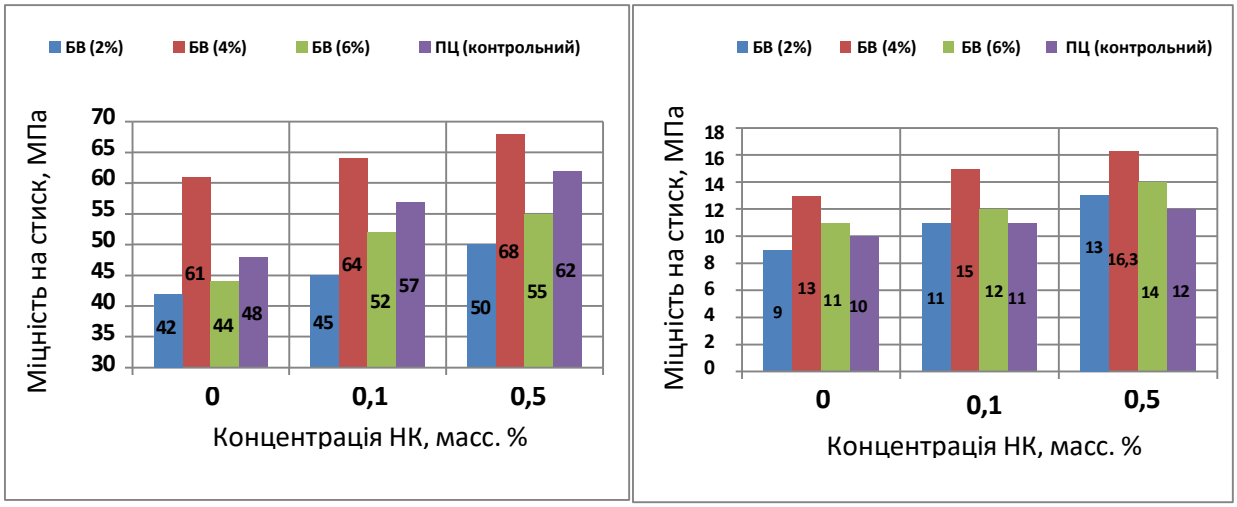
Крім того, нагрівання води є перспективним, оскільки дозволяє знизити витрати при розробці та організації технологічного процесу введення нанодисперсних модифікаторів у бетонну суміш.

Залежно від виду волокон, що використовуються (сталева, мінеральна, синтетична), призначення волокнистої арматури (робоча, конструктивно-технологічна), виду конструкції (тонкостінні, згинальні, ударостійкі, огороджувальні) оптимальне вміст волокна у складі бетону може варіюватися в межах 1...6 % [10].

Кремнезем, що вводиться разом із волокном, активно впливає на процеси гідратації портландцементу та зв'язує портландит. Залежно від ступеня аморфності та розміру кремнезему механізм його дії та оптимальна дозування можуть змінюватись.

Для мікрокремнезему та матеріалів подібних йому оптимальний вміст становить 8...10 %. Механізм дії нанорозмірного кремнезему, що володіє набагато більш розвиненою питомою поверхнею та високим ступенем аморфності, є комплексним. НК інтенсифікує процеси гідратації цементу, за рахунок того, що продукти гідратації утворюються на поверхні його частинок, виступає в ролі центрів кристалізації гідратних новоутворень. Інтервал дозування ПК значно нижче, крім того його надлишок буде негативно позначатися на швидкості перебігу реакцій гідратації.

Проведено дослідження з оптимізації складу ПЦ з базальтовим волокном і нанокремнеземом при різному їх відсотковому змісті (Рис. 3.6). При формуванні витрата води залишалася постійною, В/Ц-відношення дорівнює 0,25, при цьому змінювалася пластичність цементного тесту в межах 6...9 мм.



а б

Рисунок 3.6 - Вплив концентрації НК та вмісту базальтового волокна на міцність при стисканні (а) та згинанні (б) цементного каменю

Межі рівнів дисперсного армування, за яких забезпечується виключення можливості крихкої руйнації композиту для базальтових волокон, що становить 2...6 мас. композицій дозволяє відзначити, що введення БВ призводить до підвищення міцності на 20 % порівняно з контрольним складом.

БВ та ПК призводить до збільшення міцності на 33 % при оптимальному вмісті БВ – 4 %, ПК - 0,1 %. Поліпшення фіброцементних властивостей композицій відбувається завдяки комплексному впливу базальтового волокна та нанокремнезему, присутніх у системі.

Аналіз тепловиділення цементних паст (рис. 3.7), визначений колориметричним методом показує, що при введенні базальтового волокна і нанокремнезему відбувається збільшення температури гідратації на 5…7 %, при цьому спостерігається характерний пік у перші хвилини гідратації у модифікованого складу, обумовлений механізмом дії нанокремнезему. Присутність ПК змінює концентрацію іонів Ca^{2+} у рідкій фазі цементної пасти вже в перші хвилини гідратації та інтенсифікує процес гідратації. Відомо, що мінеральне волокно може характеризуватись адсорбцією води на поверхні, проте цей процес досить тривалий і не має істотного впливу на кількість вільнозв'язаної води в перші години гідратації. Це помітно надалі, при

протіканні індукційного періоду (0,5 до 4,5 год), коли контрольний складу пік уповільнення швидкості гідратації більш виражений, ніж у модифікованого складу. Наступний етап гідратації характеризується більш високою швидкістю перебігу реакцій гідратації у модифікованого складу, при цьому максимальна температура гідратації вища на 3…5 град.

Одночасна присутність мінерального волокна та нанокремнезему призводить до прискореному утворенню гідросилікатів кальцію, що позначається на збільшення фізико-механічних характеристик фіброцементних композицій.

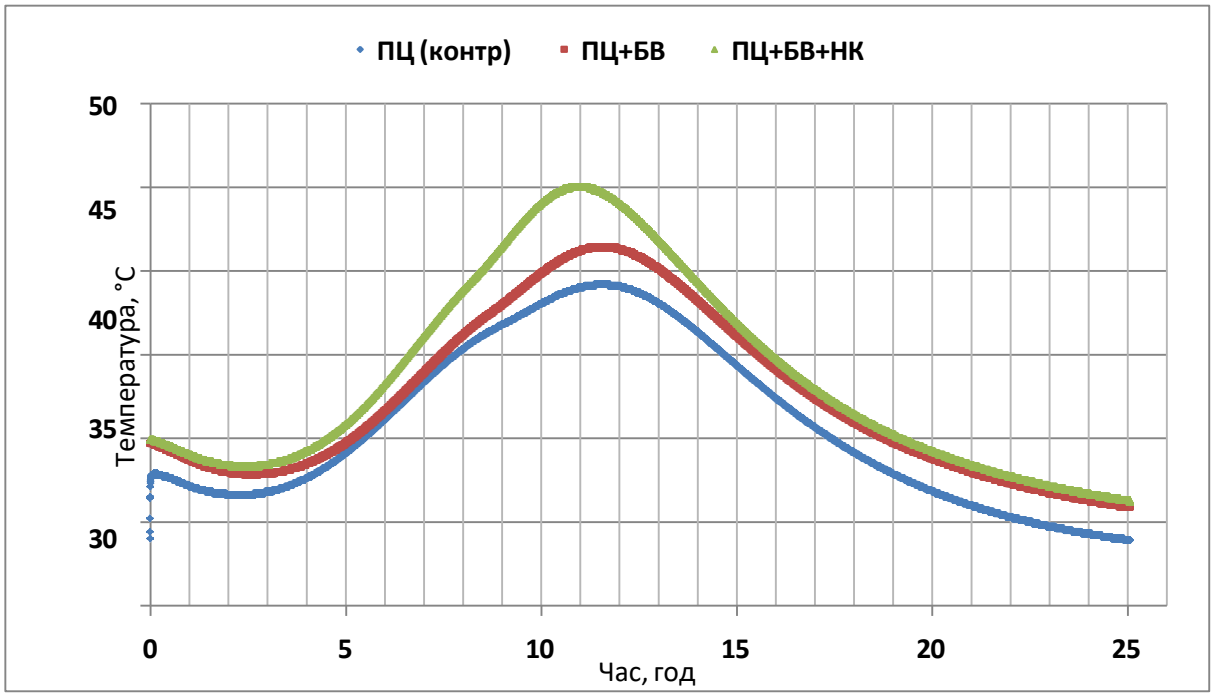


Рисунок 3.7 – Виділення цементу: 1 – ПЦ (контрольний), 2 – ПЦ + базальтове волокно, 3 - ПЦ + базальтове волокно + Таркосіл®-05

В початковий період гідратації при дотику частинок цементу з водою на контактній поверхні починають йти реакції розчинення безводних мінералів клінкеру. В результаті відбувається насичення води замішування та контактної зони іонами Ca^{2+}, OH^- та іншими. Швидке насичення водного розчину іонами Ca^{2+} відбувається за рахунок гідролізу клінкерного мінералу аліту C_3S, що супроводжується виділенням $Ca(OH)_2$.

ПК активно впливає на гідратацію ПЦ: його присутність змінює концентрацію іонів Ca^{2+} та в рідкій фазі цементної пасти вже в перші хвилини гідратації. Утворення продуктів гідратації в ранній період відбувається за участі поверхні нанодисперсних частинок та поверхню цемент них зеренвиявляється меншою мірою блокована.

3.2 Дослідження реологічних характеристик фіброцементних композицій при введенні базальтового волокна та нанокремнезему

Останнім часом деякі дослідження присвячені вивченню реологічних характеристик цементних паст при введенні до нього нанокремнезему. Докладне вивчення цього питання дозволяє розкрити більш повною мірою механізм дії нанокремнезему на цементну систему.

В дослідженні групи авторів під керівництвом Senff зазначається, що введення ультратонких частинок, до яких належать частинки нанорозмірного кремнезему, призводить до підвищення в'язкості цементних паст та розчинів.

Присутність нанорозмірних частинок знижує кількість вільнозв’язаної води. Крім того, введення нанокремнезему призводить до скорочення термінів схоплювання цементних паст.

Quercia з співавторами досліджували вплив різних видів нанокремнезему на рухливість цементних паст [15]. Були проведені дослідження шару води адсорбованого на поверхні частинок кремнезему та проведено розрахунок його товщини залежно від виду кремнезему.

В роботі досліджувався вплив БВ та ПК на зміну реологічних та технологічних властивостей ПЦ та базальтофібробетону. Введення БВ та ПК до складу ПЦ змінює технологічні та реологічні властивості цементного тесту та терміни його схоплювання (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Властивості фіброцементних паст з БВ та ПК

Показник	Од. вим.	Без домішок	БВ	БВ+НК
Нормальна густина	%	25	27	26
Початок схоплювання Кінець схоплювання	хв хв	145 245	120 210	130 225
Рухливість розчину по розпливу конуса	мм	135	125	130

Очевидно, що тонкодисперсні наночастинки збільшують в'язкість рідкої фази, одночасно підвищуючи стійкість суміші до розшарування та покращуючи зручноукладальність системи. Зміна рухливості під час введення базальтового волокна пов'язано з тим, що дисперсне армування призводить до невеликого зниження рухливості. Водночас застосування нанодисперсного кремнезему призводить до незначного підвищення рухливості, яке пов'язано з тим, що частинки ПК, подібно до ПАР, мають здатність адсорбуватися на поверхні цементних зерен та брати участь в утворенні просторових коагуляційних структур. Наночастинки добавок орієнтуються так, що гідроксильні полярні групи звернені до гідратується поверхні зерна цементу, а вуглеводневі радикали – до води. На поверхні добавки Таркосіл-05 є вуглеводневі радикали і, як відомо, коагуляційні зв'язки між метильними групами слабші.

Тим самим полегшується взаємне переміщення зерен цементу, що сприяє кращої рухливості суміші. Дослідження термінів схоплювання під час введення БВ і ПК показує, що відбувається скорочення часу початку та кінця схоплювання ПЦ. Для пояснення процесів, що відбуваються в незатверділій системі при дисперсному армуванні базальтовими волокнами було визначено показники динамічної в'язкості на ротаційному віскозиметрі Fungilab.

Оскільки ряд авторів зазначає, що частки нанокремнезему, має велику питому поверхню беруть активну участь у процесі гідратації вже в перші хвилини, і утворення продуктів гідратації відбувається на поверхні частинок кремнезему, то це сприяє тому, що поверхня зерен цементу меншою мірою

залишається «блокованою» і бере активну участь у процесах гідратації. У зв'язку з цим дослідження реологічних характеристик цементних паст на початковому етапі гідратації цементу є цікавим і дозволить у повній мірі розкрити процеси, що відбуваються в цементній системі при веденні нанокремнезему.

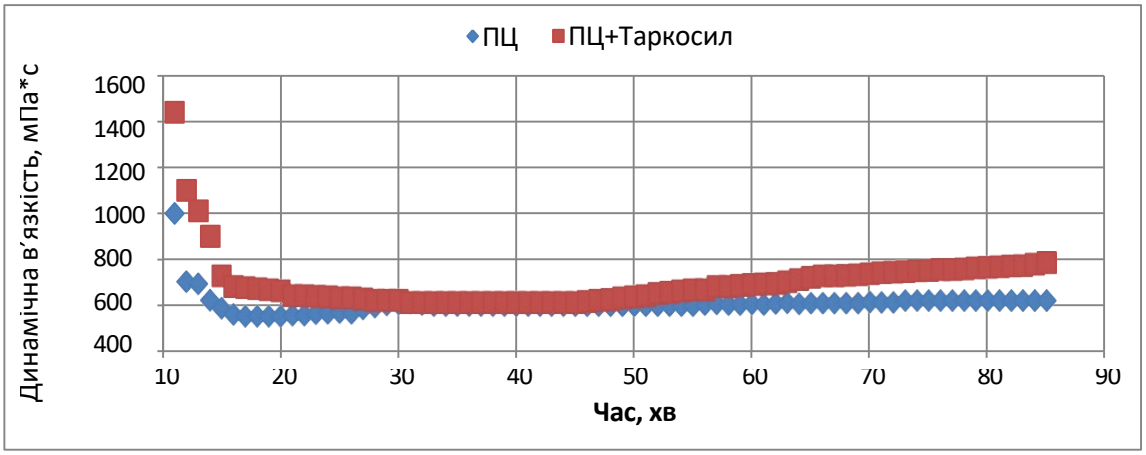
Для визначення реологічних властивостей цементних паст, що містять нанопорошок Таркосіл-05, склади цементних паст змішували з водою та суспензією води та нанокремнезему протягом 5 хв. Перед випробуванням реологічних характеристик усі склади цементних паст були витримані 5 хв., після чого на ротаційному віскозиметрі було визначено динамічну в’язкість (рис. 3.8).

Відсутність на кривих в’язкості різких перепадів показників в’язкості свідчить про рівномірний розподіл волокна у складі цементних паст. Введення базальтового волокна в цемент, зсуваючи криві в’язкості вниз, трохи знижує в’язкість цементного тесту в інтервалі часу 10…20 хв.

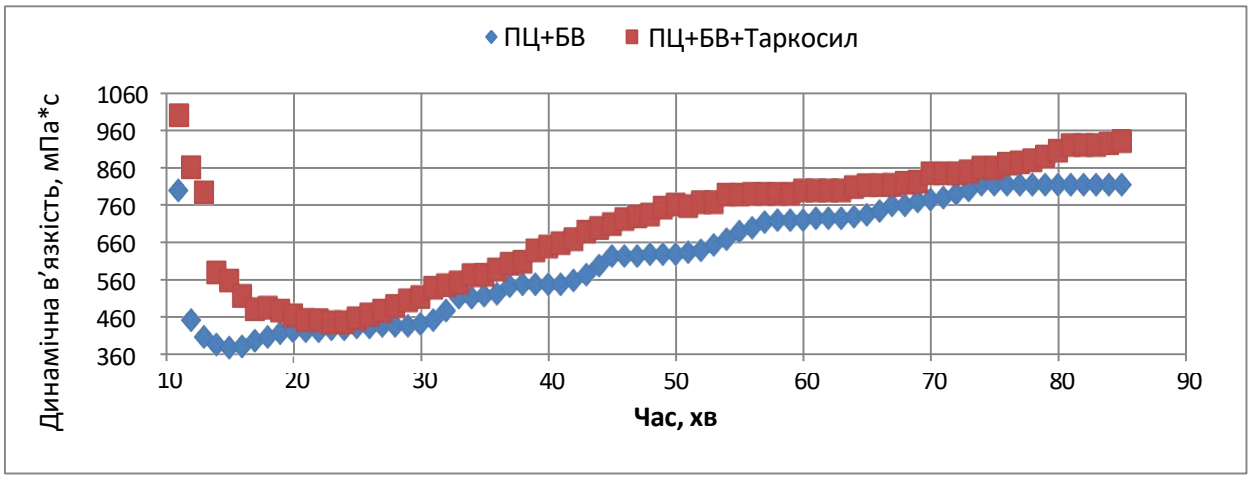
Характерно, що в’язкість зруйнованої структури цементного тіста з волокнами нижче рівня вихідної цементної пасти, щоправда, при великих напругах зсуву. Надалі наростання в’язкості цементних паст з базальтовим волокном відбувається інтенсивніше, ніж у вихідної цементної пасти.

Введення нанокремнезему Таркосіл-05, як і у випадку з вихідною цементної пасти, що призводить до більш високих показників в’язкості.

Присутність нанорозмірних частинок знижує кількість вільнозв’язаної води, що скорочує терміни схоплювання цементних паст, оскільки нанокремнезем активно взаємодіючи з частинками цементу, призводить до прискореного гідролізу цементних мінералів та утворення нових сполук. Проведені дослідження реології цементних паст у початковий період гідратації підтверджують припущення про механізм впливу нанокремнезему на цементну систему, покращуючи основні фізико-механічні показники фіброцементних композитів.



а



б

Рисунок 3.8 – Динамічна в'язкість систем: а) "ПЦ", "ПЦ+Таркосіл-05", б) "ПЦ + базальтове волокно", "ПЦ + базальтове волокно + Таркосіл-05"

3.3 Оптимізація складів фіброцементних композицій за допомогою методу математичного планування експерименту

Знаходження оптимального рівня армування та кількості нанорозмірного кремнезему, параметрів розподілу нанокремнезему у воді замішування є досить трудомістким через комплексний механізм дії модифікуючих добавок, що вводяться. Для оптимізації температури розподілу ПК у воді замішування та складу (кількості добавки) фіброцементних

композицій використано метод композиційного планування експерименту. Були прийняті такі фактори: кількість базальтового волокна (x_1), кількість Таркосіл®-05 (x_2), температура нагріву води (x_3), варіюються в межах: x_1 = 2…6 %, x_2 = 0,01…0,1 %, x_3 = 40…80 °С.

Таблиця 3.2 - Основні характеристики плану експерименту

Фактори експерименту	Позначення фактору	Нижній рівень	Нульовий рівень	Верхній рівень	Крок варіювання
Кількість базальтового волокна, %	X_1	2	4	6	2
Кількість Таркосіл-05, %	X_2	0,01	0,055	0,1	0,045
Температура при розподілі Таркосіл-05, °С	X_3	40	60	80	20

Як вихідний параметр, на які впливають фактори експерименту, було обрано межу міцності при стисканні (Y) у віці 28 діб (рис. 3.9).

Після виконання плану експерименту, була проведена статистична обробка за допомогою редактора Microsoft Excel.

Встановлення рівняння регресії та побудова графічних залежностей проводили з використанням пакета прикладних програм Maple 9 оцінки значимості коефіцієнтів рівняння регресії набуває вигляду:

$$Y = 72.8 - 0.37x_1 + 3.63x_2 - 0.62x_3 - 6.28x_1^2 + 3.21x_2^2 - 24.3x_3^2 - 0.25x_1x_2 - 0.88x_1x_3 - 0.63x_2x_3. \quad (3.1)$$

Встановлено, що оптимальне вміст базальтового волокна лежить в межах 4…5 %, та при варіюванні кількості нанодисперсної добавки від 0,01 до 0,1% міцність на стиск збільшується на 20…25 %.

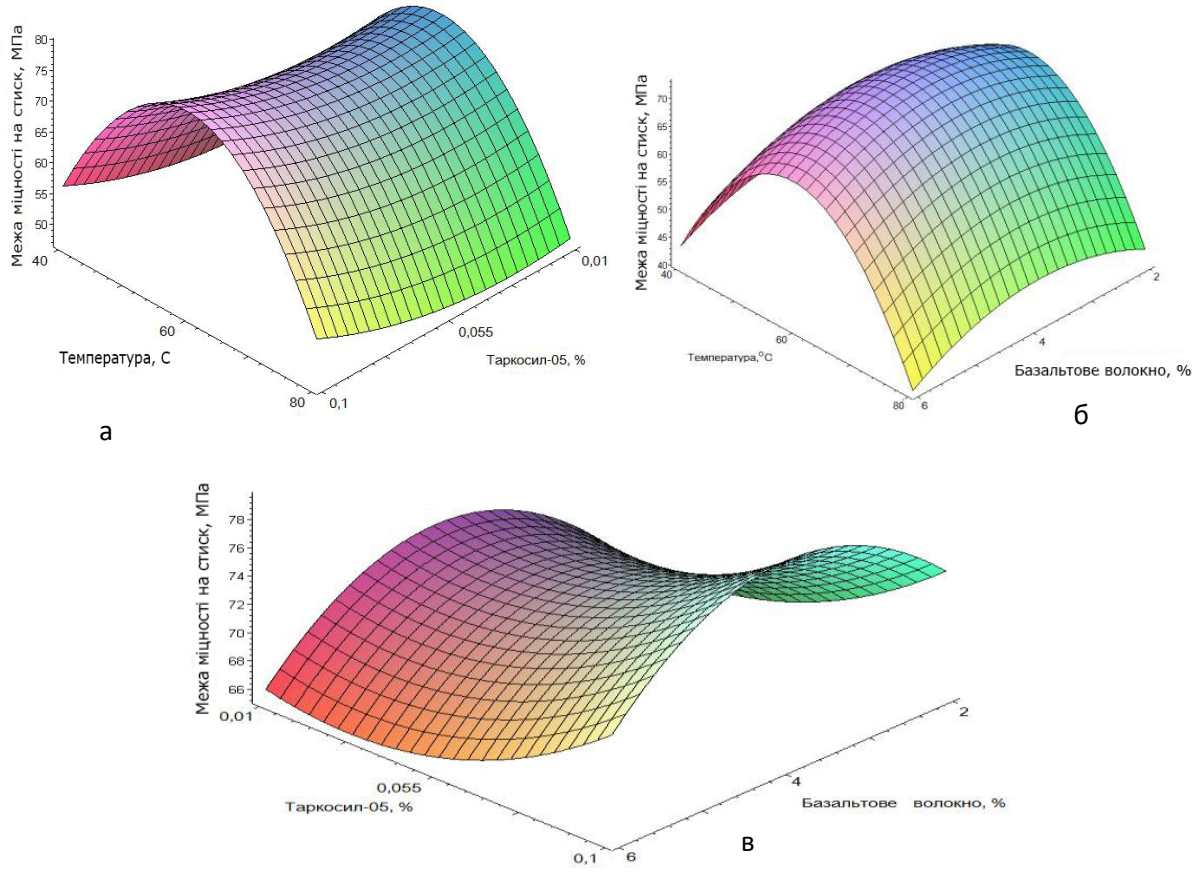


Рисунок 3.9 - Залежність міцності при стисканні портландцементу віком 28 діб від факторів, що варіюються: а – при вмісті базальтового волокна 4 %, б – при вмісті добавки 0,055 %, в - при температурі 60 °С

Оптимальна температура, при якій відбувається найбільш рівномірний розподіл наночастинок, лежить у межах 55…65 °С. Оптимум температури нагрівання обумовлений тим, що всередині об'єму води при температурі, що перевищує 60 °С, починають протікати конкуруючі процеси, що сприяють повторній агрегації частинок Таркосіл®-05. Температура нижче оптимального інтервалу є недостатньою для початку перебігу дифузійних процесів вирівнювання та дезагрегації наночастинок. У подальших дослідженнях під час оптимізації складу фібробетону витрата ПК становила 0,1 %, БВ – 4 %.

3.4 Визначення ефективного способу розподілу базальтового волокна складі фіброцементних композицій

Для отримання стабільних фізико-механічних показників при армуванні бетону БВ необхідно, щоб воно було рівномірно розподілене в обсязі всієї суміші [22, 23]. Рівномірний розподіл базальтового волокна в традиційних змішувачах і застосування спеціальних способів неможливо.

Тут можливі різні варіанти: постадійне введення волокна до складу бетонної суміші, роздільне перемішування волокна з цементом у помольних та змішувальних агрегатах і т.д (табл. 3.4), що мають певні переваги та недоліки.

У дослідженнях розглядаються способи введення волокна з використанням турбулентного змішувача, причому волокно вводиться до складу бетонної суміші постадійно [23]. Іншим способом є попереднє змішування-помел у кульових та пружинних млинах базальтового волокна з цементом [2, 24].

Відповідно до ВСН 56-97 [19] задовільна рівномірність розподілу волокна в суміші характеризується величиною коефіцієнта мінливості (U), який знаходиться у межах від 10 до 15 %.

Таблиця 3.4 – Способи розподілу базальтового волокна

Стадія виробництва	Спосіб розподілу	Примітки
Змішування в'яжучого	Кульовий млин (використання суперпластифікатора) час змішування-помелу – 1…2 хв	Дані способи пов'язані з додаванням технологічного переділу змішування в'яжучого та фібри. Мають переваги, пов'язані з додатковою активацією в'яжучого та подрібнення фібри до оптимальних розмірів
	Пружинний млин (використання супер-пластифікатора) час змішування-помелу – 1…2 хв	

Продовження таблиці 3.4

Змішування бетонної суміші	Попереднє змішування цементу, піску та добавок (15 с) + змішування з волокном (15 с) + змішування з водою (60 с)	Технологія виробництва фібробетону не вимагає додаткового переділу та обладнання, однак для рівномірного перемішування волокна у складі бетонної суміші потрібне застосування високоефективних турбулентних змішувачів
	Попереднє змішування цементу, води та добавок (60 с) + змішування з волокном (15 с) + змішування з піском (15 с)	
	Попереднє змішування цементу, піску, води та добавок (60 с) + змішування з волокном (15 с)	

Встановлено, що характер розподілу БФ за обсягом матриці дещо різниться залежно від схеми перемішування, однак його рівномірність розподілу вбирається у U=10 %. Аналіз літератури показав [15,16,21-24], що спільний помел волокна з цементом є ефективним і визначається способом подрібнення.

В роботі для ефективного розподілу БВ у цементі для отримання базальтофіброцементу (БФЦ) були випробувані два способи розподілу з різними способами та режимами перемішування матеріалів: спільне змішування-помел цементу і волокна протягом 15…150 сек у віброістирателі (n=1440 об/хв, N=0,75 кВт) та в лабораторному турбулентному змішувачі(n=42 об/хв, N=0,18 кВт), показники яких представлені вище.

Ефективність розподілу та подрібнення волокна до оптимальних розмірів за довжиною (10…12 мм) оцінювали за часом перемішування у двох досліджуваних агрегатах (рис. 3.10). Як показують результати досліджень, оптимум за часом помелу у віброістирателя лежить в межах 0,25…0,75 хв, при якому отримано найкращі показники за міцністю. У випадку використання турбулентного змішувача оптимум часу перемішування лежить в інтервалі часу 15-25 хв. При цьому максимальна міцність при цьому способі розподілу нижче, ніж при використанні вібростирача показники міцності БФЦ при такому способі розподілу волокна на 15…20 % вище в порівнянні з показниками при розподілі волокна в турбулентний змішувач. Найкращим

виявився спосіб змішування компонентів у віброістирателі, де поєднуються інтенсивні механічні впливи та висока енергонапруженість у робочій зоні апарату (рис. 3.10).

При розподілі базальтового волокна у віброістирателі – інтенсивному помольному агрегаті - за рахунок короткочасного впливу протягом 0,5…1,5 хв відбувається незначна активація цементу, що призводить до підвищення його реакційної здатності та поліпшення фізико-механічних показників.

Інтенсивні механічні дії у поєднанні з високою енергонапруженістю у робочій зоні подрібнювача дозволили віднести стрижневий віброистирувач до ефективних апаратів для спільного перемішування-помелу ПЦ та мінерального волокна. Використовуючи аналітичний та експериментальний підходи, можна на стадії проектування наблизитися до оптимальним параметрам подрібнювачів нового покоління та режимам перемішування, активації та модифікування в'язких композицій, що дозволяє при оптимальних енерговитратах передати достатню кількість енергії оброблюваним матеріалам для підвищення їх реакційної здібності та отримання заданих властивостей.

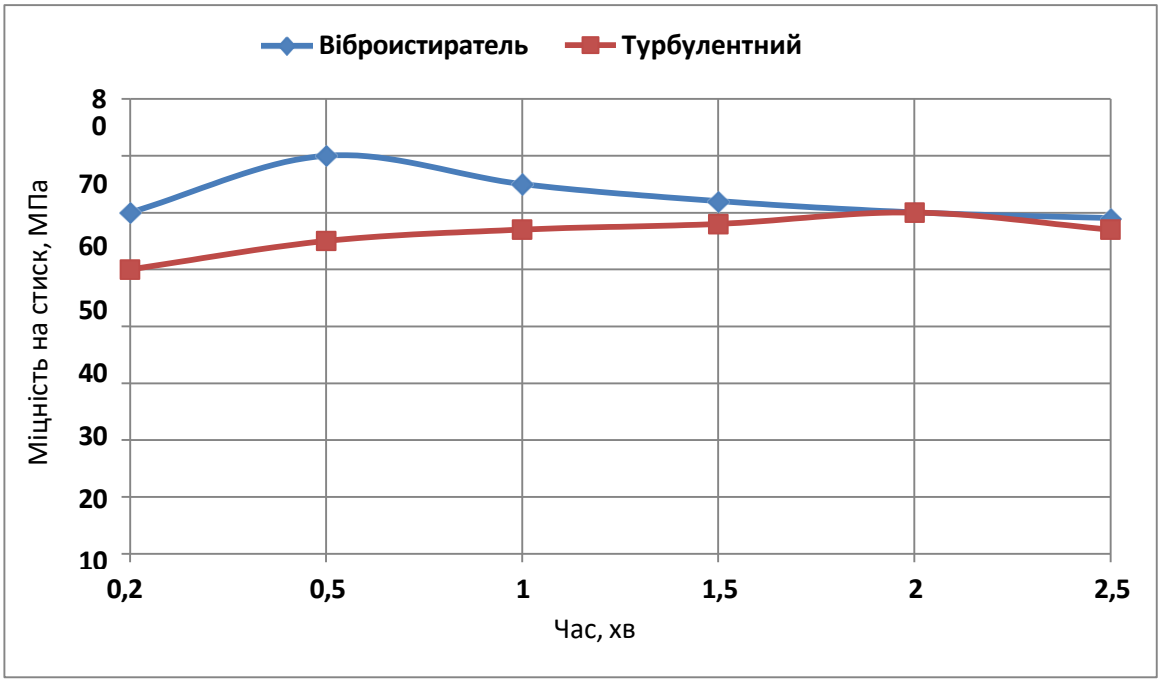


Рисунок 3.10 - Вплив часу перемішування – помелу при розподілі базальтового волокна в цементній матриці на міцність БФЦ

Базальтове волокно піддається частковому подрібненню до оптимальних для рівномірного розподілу розмірів за довжиною – 10-15 мм (рис. 3.11, а). В разі застосування турбулентного змішувача довжина волокон більша (15…25 мм, рис. 3.11, б), і вони виявляють велику схильність до утворення грудок або пучки – «їжаки».

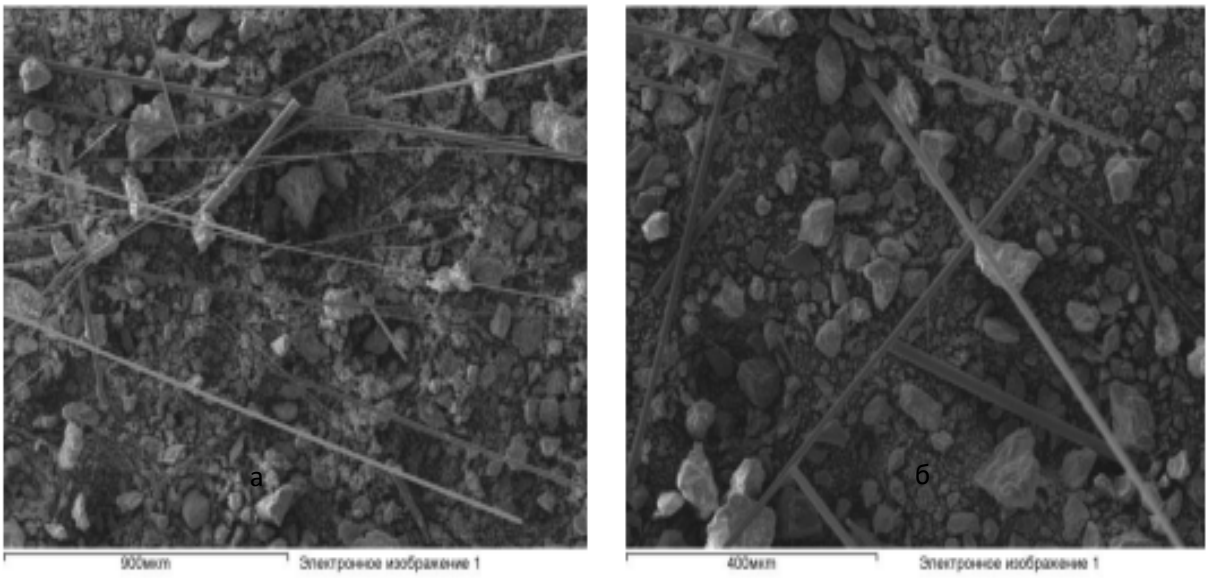


Рисунок 3.11 – Мікрознімки базальтового волокна, розподіленого у цементі з використанням: а – вібростирача, б – турбулентного змішувача

При промисловому виробництві фібробетонів необхідне інтенсивне перемішування цементу з базальтовим волокном у подрібнювачах нового покоління, таких як відцентрово-еліптичний млин ЦЕМ-7», кульовий планетарний млин «Активатор-2S», де за оптимальних енерговитрат передається достатня кількість енергії оброблюваним матеріалам для підвищення їхньої реакційної здатності та отримання заданих властивостей.

4 ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ДРІБНОЗЕРНИСТОГО БАЗАЛЬТОФІБРОБЕТОНУ З НАНОКРЕМНЕЗЕМОМ

4.1 Розробка технології виробництва дрібнозернистого базальтофібробетону з нанокремнеземом

На стадії розробки дослідного (дослідно-промислового) виробництва фібробетонних конструкцій з метою отримання оптимальних результатів слід враховувати накопичений вітчизняний та зарубіжний досвід виробництва та застосування фібробетонних будівельних конструкцій різного призначення.

Фібробетонні конструкції рекомендуються до застосування у тих випадках, коли найбільш ефективно можуть бути використані такі їх технічні переваги в порівнянні зі звичайним залізобетоном:

- підвищені показники тріщиностійкості, ударної міцності та в'язкості, зносостійкості, атмосферостійкості, морозостійкості;

- можливість використання більш ефективних конструктивних рішень у порівнянні зі звичайним армуванням, наприклад, тонкостінних конструкцій, конструкцій без стрижневої або сітчастої розподільної та поперечної арматури, тонкостінних конструкцій зі стрижневою розтягнутою арматурою, не що доводиться до опори та ін.;

- зниження трудовитрат на арматурні роботи, підвищення ступеня механізації та автоматизації виробництва конструкцій, наприклад, у збірних та монолітних тонкостінних оболонках, складках, ребристих плитах покриттів та перекриттів, шаруватих стінових панелях, збірних колонах, балках, палях, монолітних днищах ємнісних споруд, незнімної опалубки, дорожніх та аеродромних покриттях, монолітних та збірних підлогах промислових та громадських будівель, елементах оздоблення фасадів та ін.;

- можливість застосування нових, більш продуктивних прийомів формування армованих конструкцій, наприклад, пневмонабризг, метод загибелі свіжовідформованих листових виробів, роликове формування, екструзія та ін.

Виробництво фібробетонних конструкцій в заводських умовах організується за технологією попереднього перемішування фібробетонної суміші з наступним ущільненням прийомами вібрування, роликового формування, центрифугування.

За результатами досліджень розроблено технологічну схему виробництва БФБ з базальтовою фіброю, отриманою відцентрово-дуттєвим способом, і нанокремнеземом. Загальна технологічна схема заводського виробництва базальтофібробетону наведено рисунку 4.1.

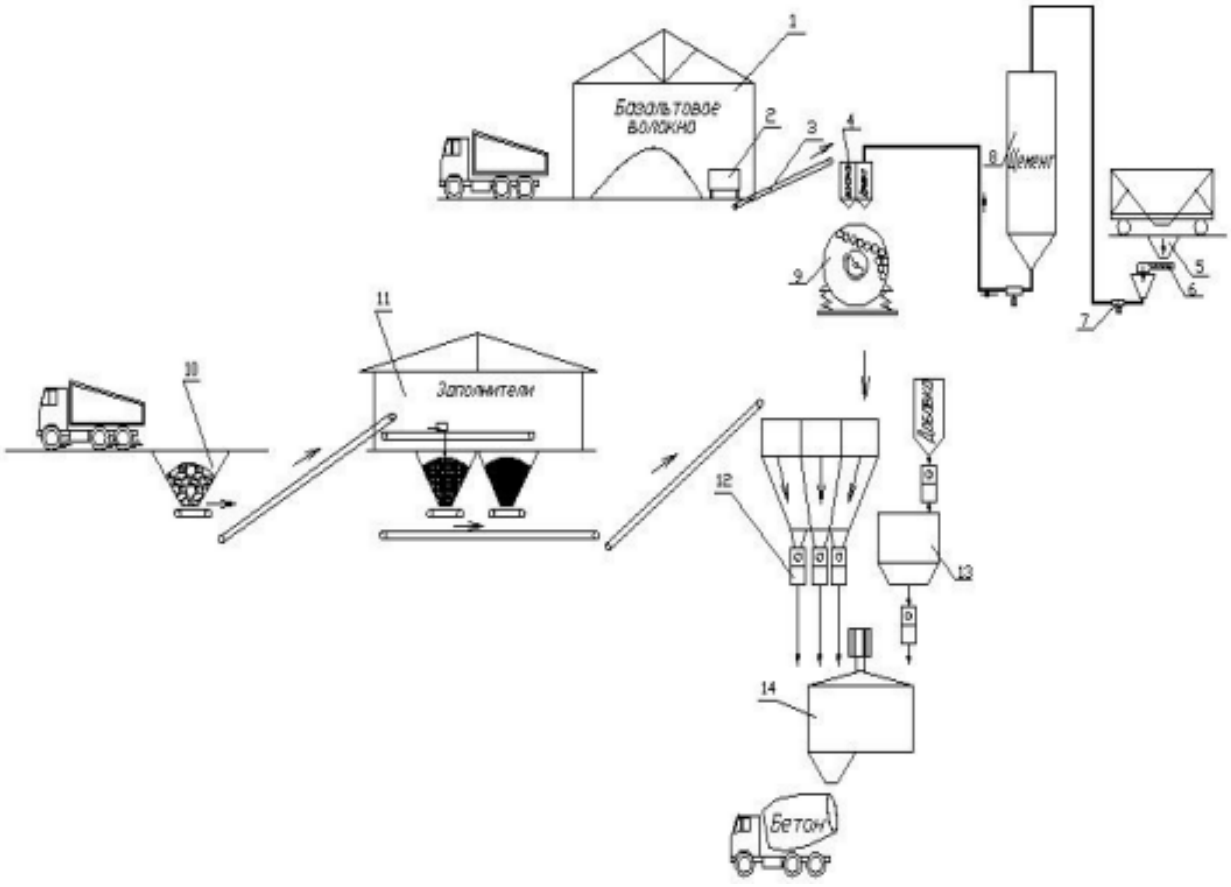


Рисунок 4.1 - Технологічна схема виробництва базальтофібробетону

Технологія виробництва базальтофібробетону із застосуванням НК включає в себе наступні операції: змішування-помел базальтового волокна з портландцементом у вібраційному млині, приготування розчину НК з водою замішування, дозування компонентів бетонної суміші, змішування компонентів у змішувачі примусової дії, видача готової базальтофібробетонної суміші.

Базальтове волокно попередньо розрізається на короткі відрізки (30…50 мм) за допомогою різального пристрою (2) і подається до приймального бункеру (4) перед завантаженням у вібраційний млин (9).

Цемент надходить залізничним та автомобільним транспортом. З приймального бункера (5) за допомогою шнека (6) і пневмонасоса (7) надходить в силос (8). Цемент надходить у вібраційний млин за допомогою пневмонасосу (7), де спільно з базальтовим волокном проходить стадію короткочасного змішування-помелу (1…2 хв) до оптимальної довжини базальтового волокна (10…15 мм). Готова суміш цементу та базальтового волокна подається у видатковий бункер перед бетонозмішувачем (14).

Заповнювачі бетону надходять автомобільним транспортом та розвантажуються у приймальні бункера (10). Заповнювачі: із приймального бункера стрічковим живильником і системою стрічкових конвеєрів надходять рівномірно видаткові бункери. Витратні бункери оснащені датчиками верхнього та нижнього рівня заповнення матеріалом, що забезпечує оперативність інформації про початку та завершення процесу завантаження. Усі віддозовані компоненти подаються в бетонозмішувач (14). Готова базальтофібробетонна суміш подається через люк шиберного затвора, в бетоновоз, що знаходиться під ним.

На рисунку 4.2 представлена схема підготовки розчину добавки Таркосіл-05®

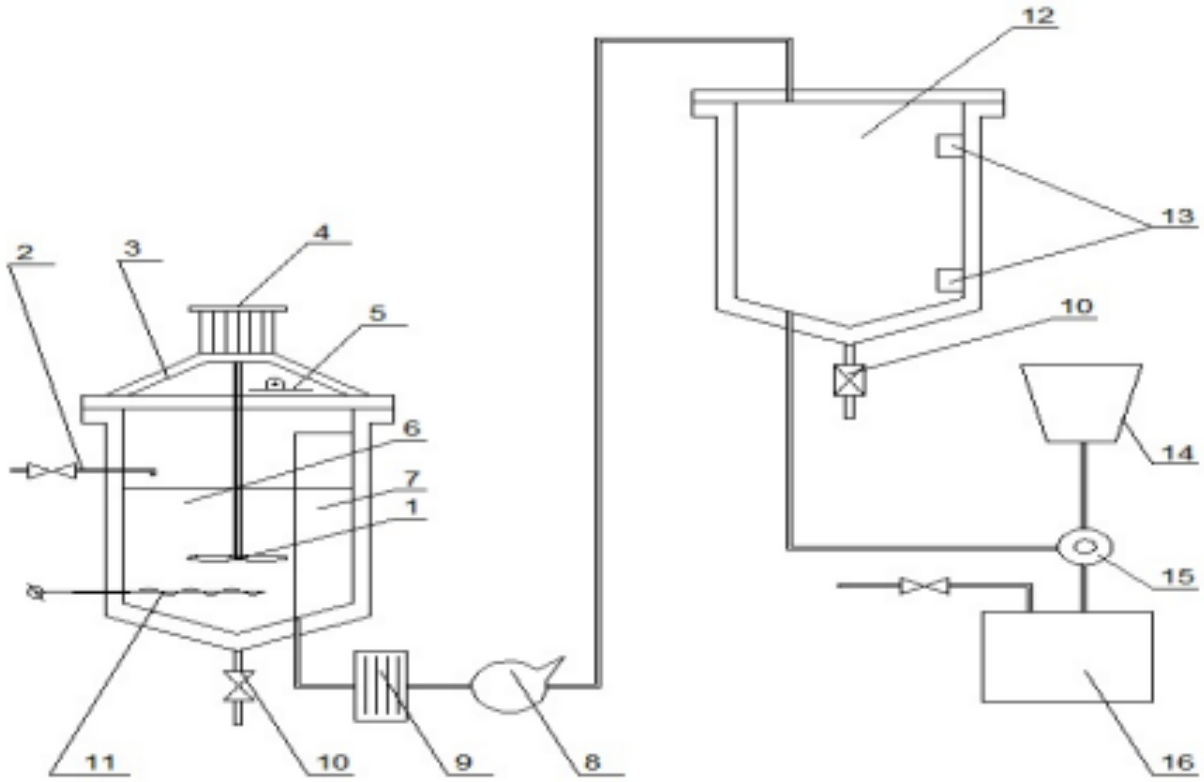


Рисунок 4.2 – Схема установки для приготування водних розчинів добавки Таркосіл-05®

Добавка розчиняється в підготовчій ємності 6, забезпеченої пристроєм 11 для підігріву розчину до 50…70 °С. Добавку вводять через люк 5 кошик 7. Розчин перемішується механічною мішалкою 1, забезпеченої електродвигуном 4, який закріплений на кришці 3. Подають воду через трубку 2. Приготовлений розчин перекачується відцентровим насосом 8 через фільтр 9 витратну ємність 12, забезпечену датчиком рівня 13. З витратної ємності розчин через гідророзподільник 15 направляється в об'ємний дозатор 14. Відмірена доза подається в дозатор 16. а звідти разом із водою замішування – в бетонозмішувач. Для зливу залишків розчину та промивання ємності є трубка 10.

В міру приготування розчини добавок надходять у видаткові ємності, а звідти через дозатори прямують до бетонозмішувача з водою замішування.

Необхідні кількості розчинів вводяться в бетонну суміш за допомогою об'ємних, вагових дозаторів або насоса-дозатора. Виробництво плитних та тонкостінних конструкцій з базальтофібробетону може бути організовано за

технологією роликового формування, принципова схема якої наведено рисунку 4.3.

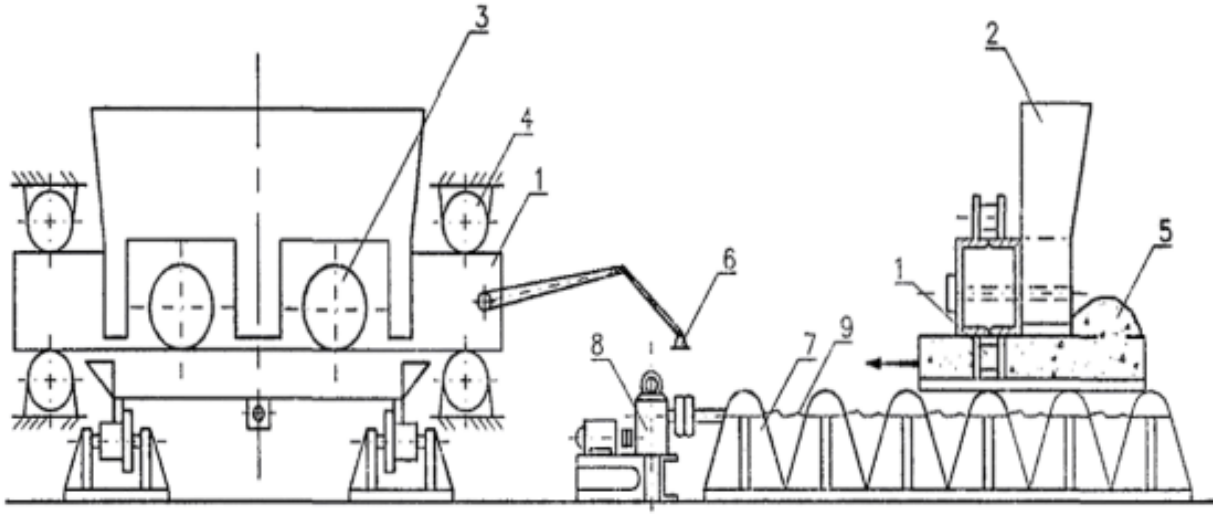


Рисунок 4.3 - Конструктивна схема пристроїв роликового формування

Перелік необхідного обладнання під час виробництва базальтофібробетонних конструкцій, що використовується на стадіях виготовлення фібри, її дозування, введення в бетонну суміш, а також подачі та укладання наведено в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 - Перелік технологічного обладнання для виготовлення та укладання базальтофібробетонних сумішей

№ зп	Найменування робочих процесів та операцій	Тип обладнання
1.	Виготовлення фібри	Верстат для рубання базальтової фібри
2.	Дозування та введення фібри в суміш, що готується	Дозатор фібри щілинної ДФЩ-600-250 продуктивністю 20...150 кг/хв.
3.	Змішування-помел базальтової фібри з цементом	Вібраційний млин
4.	Приготування базальто-фібробетонної суміші	Бетонозмішувачі: - примусової дії; - гравітаційної дії; - автобетонозмішувачі.

Продовження таблиці 4.1

5.	Подача базальтофібробетонної суміші до місцю укладання	- за допомогою крана в цебрах, бункерах; - вібролотки; - стрічкові конвеєри; - бетононасоси;
6.	Ущільнення базальто-фібробетонних сумішей при їх укладанні в конструкцію	Вібратори: - глибинні; - начіпні; - майданчикові; - стаціонарні вібромайданчики

Контроль якості фібробетону, бетонної та фібробетонної сумішей, бетону-матриці, вихідних матеріалів повинен здійснюватися заводський або будівельною лабораторією відповідно до вимог ДСТУ. Визначення експлуатаційної надійності (міцності, тріщиностійкості, жорсткості і т.д.) конструкцій з фібробетону визначається так само, як і виробів зі звичайного залізобетону за ДСТУ або ТУ на цей виріб. Періодичність контролю міцності фібробетону виготовлених конструкцій встановлюється ДСТУ або ТУ на відповідні вироби.

Система контролю міцності фібробетону включає:

- приймальний контроль якості вихідних матеріалів;

- контроль фіброзмісту та однорідності розподілу фібр матриці;

- контроль ступеня ущільнення фібробетону;

- контроль середньої величини та коефіцієнта варіації межі міцності фібробетону при розтягуванні;

- контроль середньої величини міцності матеріалу матриці при стисканні.

Кожна нова партія фібри, що надійшла на виробництво, перевіряється на відповідність паспортним даним заводу-виробника та додатково випробовується у бетонах поточного виробничого складу.

Базальтова фібра випробовується в дрібнозернистих бетонних виробничих складах при температурах 60…80 °С ізотермічного витримування протягом 8 годин. Міцність бетону в першому випадку не повинна

відрізнятися від виробничої більш ніж на ±10 %, а зниження міцності в другий випадок у порівнянні з першим не повинно перевищувати 20 %.

На технологічних лініях слід організувати систематичний контроль рівномірності розподілу фібри у бетонній суміші. Методика контролю базальтової фібри, згідно з ВСН 56-97 може бути нижче наступної.

З різних ділянок конструкції, що виготовляється, відбирається не менше 10 проб бетонної суміші масою приблизно 200…300 г. Об'єм проби залежить від розмірів фібр, ступеня насичення ними суміші та визначається за формулою:

$$V_{np} = 50 \cdot \frac{\mathrm{lf} \cdot \mathrm{d2f}}{\mu \mathrm{f}}, \text{ см}^3 \qquad (4.1)$$

де: μ_f – коефіцієнт армування за обсягом;

l_f – довжина фібри;

d^2_f – діаметр фібри.

Далі після попереднього зважування проби суміш міститься на систему сит із осередком 5 і 2,5 мм і промивається водою. Після промивання скловолокно, що залишилося на верхньому ситі з коміркою 5 мм, витягується вручну (невелика частина волокон може при промиванні пройти через сито 5 мм, у цьому у разі воно збирається з нижнього сита), висушується і зважується.

Визначається об'ємний вміст базальтового волокна в пробах (%) за формулою:

$$\mu_f = \frac{100 q_{fi} \cdot \gamma_{fb}}{q_{fb} \cdot \gamma_f}, \qquad (4.2)$$

де: q_{fb} - навішування бетонної суміші;

qfi - маса фібри в навішуванні;

γ_{fb} - об'ємна маса бетонної суміші;

γ_f - об'ємна маса фібри.

Визначається середній об'ємний вміст базальтового волокна в кожної з відібраних проб:

$$\mu_{fcp} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \mu_{fi}}{n} \quad (4.3)$$

Підраховується коефіцієнт мінливості (V) вмісту базальтового волокна в бетонній суміші:

$$V = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\mu_{fcp} - \mu_{fi})^2}{n-1}}}{\mu_{fcp}} \quad (4.4)$$

При величині V < 10 % рівномірність базальтового розподілу волокна в бетонній суміші слід вважати високою. Задовільна рівномірність розподілу волокна в суміші характеризується величиною V в межах від 10 до 15 %.

При формуванні виробів якість ущільнення суміші характеризується коефіцієнтом ущільнення, що є відношенням фактичної об'ємної маси ущільненої суміші до теоретично розрахованого значення об'ємної маси. Величина цього коефіцієнта має бути не менше 0,94…0,96.

Фактичну об'ємну масу суміші слід визначати у мірній посудині ємністю не менше 1 л, жорстко закріпленому на лабораторному вібромайданчику. Орієнтовний час ущільнення дорівнює З·Ж, де: Ж - жорсткість суміші.

Контроль фібробетону на стирання, ударну в'язкість, в'язкість руйнування і т.д. провадиться в тих випадках, коли вони передбачені відповідними стандартами чи ТУ.

Визначення міцності фібробетону та бетону-матриці може здійснюватися шляхом використання:

- руйнівних методів випробувань виготовлених контрольних зразків згідно з ГОСТ 10180;

- неруйнівних методів випробувань згідно з ДСТУ.

Контроль міцності фібробетону на стиск та розтягування проводиться відповідно до вказівок ДСТУ.

4.2 Статичний, динамічний та конструктивний розрахунки несучих залізобетонних елементів адміністративно-громадської 12-ти поверхової будівлі у м. Житомир

4.2.1 Характеристика будівлі та архітектурно-конструктивне рішення

Об'єкт: «Адміністративно-громадська 12-ти поверхова будівля» у місті Житомир.

Таблиця 4.2 - Архітектурно-конструктивне рішення

1.1.1 Район та майданчик будівництва	м. Житомир
1.1.2 Архітектурно-будівельне рішення	Адміністративно-громадська 12-ти поверхова будівля
1.1.3 Рівень відповідальності будівлі	II (нормальний)
1.1.4 Ступінь вогнестійкості будівлі	II категорія
1.1.5 Ґрунтові умови	Суглинок твердий коричневий потужність шару 1 м; Пісок дрібний, середньої густини, насичений водою, коричневий – потужність шару 3,2 м; Пісок дрібний, середньої щільності, насичений водою, коричневий – 4,3 м; Пісок пилуватий, середньої щільності, насичений водою, сірувато-зелений – 1,8 м; Галечниковий ґрунт із піщаним заповнювачем до 20 %, дрібний пісок, сірий – 5,2 м; Піщаник низький міцності дрібнозернистий сірий сильновивітрілий - 0,8 м.
1.1.6 Сейсмічність майданчика	8 балів

Продовження таблиці 4.2

Конструктивне рішення		
Найменування	Варіанти конструктивних рішень	
	Проєктний варіант	Варіант з використанням базальтофібробетону
1.1.1 Тип несучого кістяка	Система поздовжніх та поперечних несучих монолітних залізобетонних стін, t =200 мм	Система поздовжніх та поперечних несучих монолітних залізобетонних стін, t =180 мм
1.1.2 Фундаменти	Монолітна залізобетонна плита, t =700 мм	Монолітна залізобетонна плита, t =500 мм
1.1.3 Конструкції покриття та перекриття	Монолітна залізобетонна плита товщиною 200 мм	Монолітна залізобетонна плита товщиною 200 мм
1.1.4 Зовнішні стіни	Монолітна залізобетонна стіна товщиною 200 мм і система навісного вентильованого фасаду «Краспан»	Монолітна залізобетонна стіна товщиною 180 мм і система навісного вентильованого фасаду «Краспан»
1.1.5.Дах	Верхній шар покрівельного килиму Техноеласт ЕКП - 4,2 мм; Нижній шар покрівельного килиму Уніфлекс ВЕНТ ЕПВ – 2,8 мм; Обґрунтування праймером бітумним ТехноНІКОЛЬ - менше 1,0 мм; Стяжка з ЦПР М150, армована мет. сіткою 5Вр1 100х100 – 40 мм; Ухиляючий шар з керамзиту – товщина від 30 – до проєктної (і 1.5 – 2.5 %); Теплоізоляція – пінополістирол ТЕХНОНІКОЛЬ 30 250…200 мм. Пароізоляція - модифікований бітумний матеріал Бікроеласт ТПП - 2,5 мм. Покрівля -з\б плита – 200 мм.	

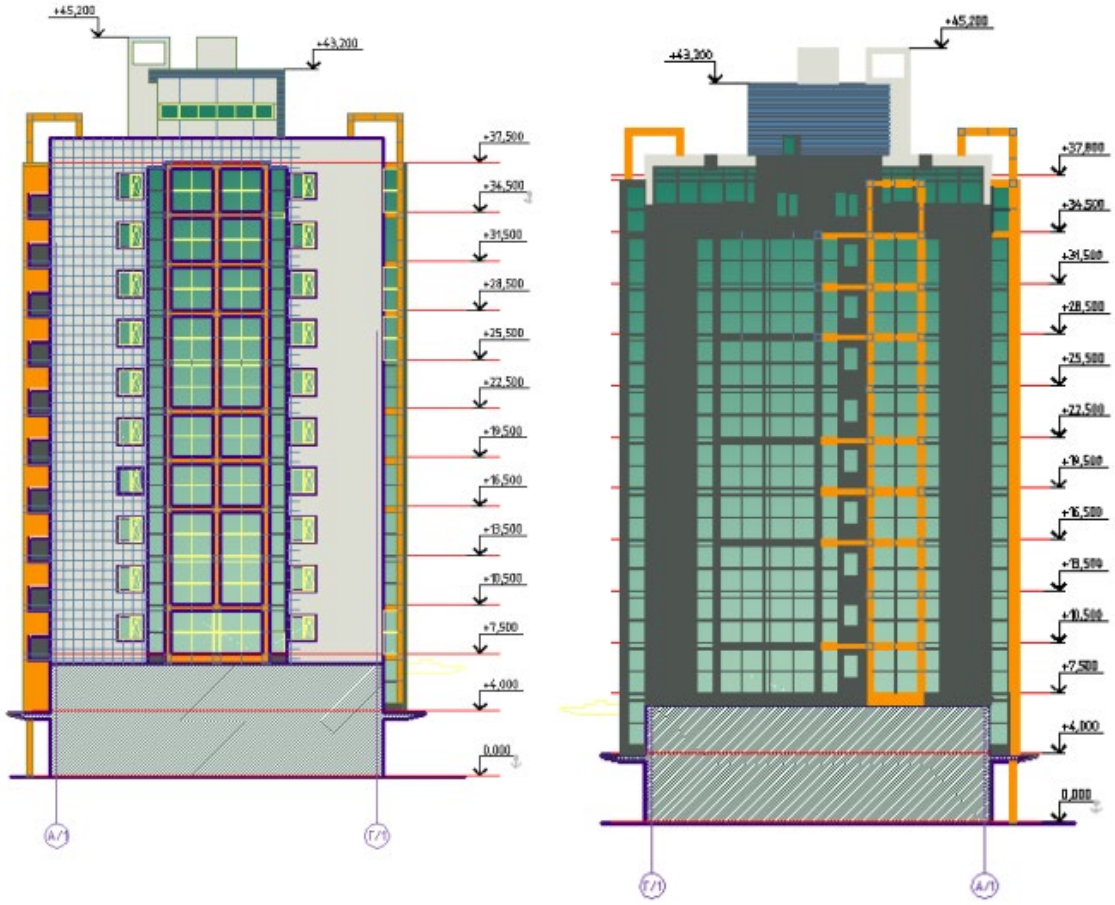


Рисунок 4.4 - Фасад будівлі в осях А/1-Г/1 та Г/1-А-1

Відповідно до проектного рішення було розглянуто прямокутне в плані 12-ти поверховий житловий будинок.

Кліматичні фактори та їх нормовані рівні:

- сніговий район – II, нормативна вага покриття – 1,2 кН/м^2;
- вітровий район – III, нормативне значення вітрового тиску -0,38 кПа;
- середня швидкість вітру за три найхолодніші місяці року – 2 м/с;
- розрахункова температура найхолодніших діб із забезпеченістю 0,92 - мінус 18 ^{o}C;
- кліматичний район – 1 В;
- зона вологості – суха;
- нормативна глибина промерзання відкритого ґрунту - 2,8 м;
- ступінь агресивності зовнішнього повітряного середовища експлуатації - неагресивна;
- розрахункова сейсмічність району будівництва за картою А – 8 балів.

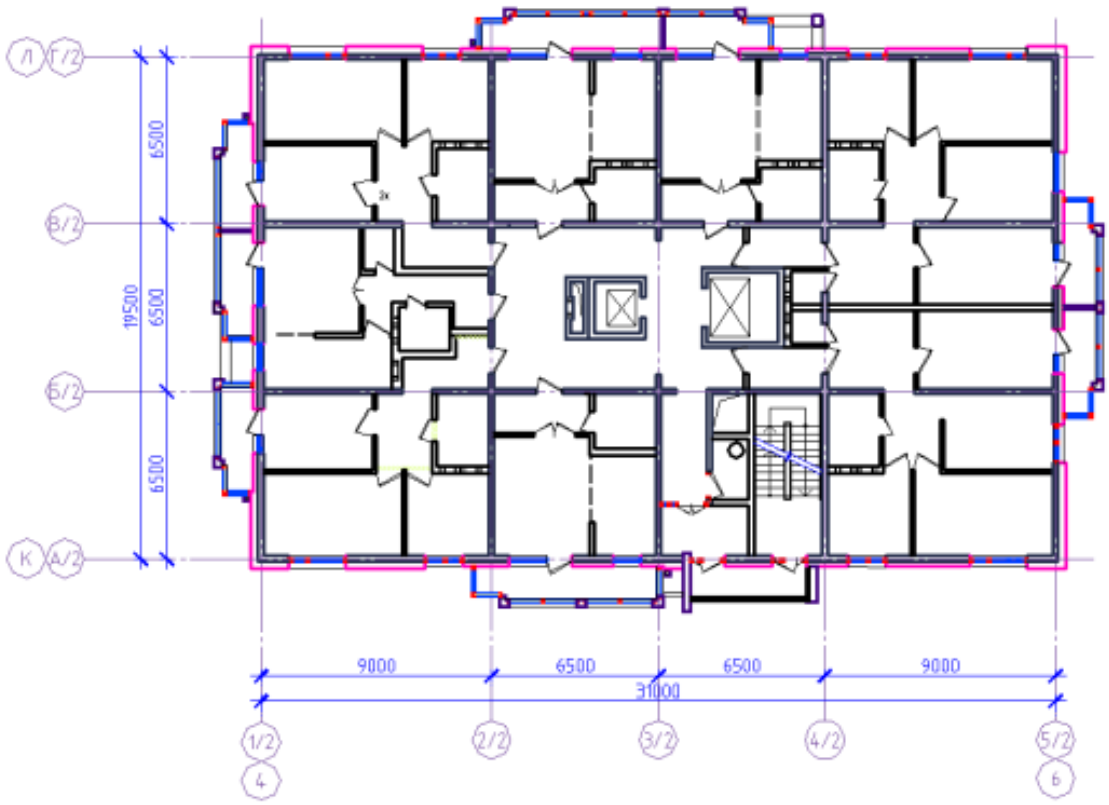


Рисунок 4.5 - План типового поверху

4.4.2 Проєктне рішення

Адміністративно-громадська будівля є 12-ти поверховою будівлею з монолітними залізобетонними несучими поздовжніми та поперечними стінами та монолітним залізобетонним перекриттям.

Габаритні розміри будівлі: довжина 31,0 м, ширина 19,5м.

Висота поверхів: підвал - 3,6 м, 1-й поверх - 3,5 м, 2-11 поверхи - 3,0 м, 12-й поверх - 3,3 м.

Адміністративно-громадська будівля обладнана ліфтами.

Будівля запроєктована поздовжньо-поперечними монолітними залізобетонними стінами.

В підвальному поверсі розташовані: тепловий пункт, водомірний вузол,

електрощитова, сан. вузол та кімната прибирального інвентарю. 12-й поверх є технічним, на якому розташоване машинне приміщення, вентиляційна камера та інші технічні приміщення.

Будівля має II клас відповідальності та II-й ступінь вогнестійкості. Коефіцієнт надійності за призначенням дорівнює 0,95.

Фундаменти – монолітна плита 700 мм.

Стіни підвалу – монолітні залізобетонні товщиною 200 мм.

Стіни – монолітні залізобетонні товщиною 200 мм.

Перекриття – монолітні залізобетонні товщиною 200 мм.

Усі конструкції виконуються з бетону В25. Робоча арматура класу А400, поперечна та сполучна арматура класу А240. Технічні рішення зовнішніх стін розроблені відповідно до нормативних документів.

По всіх зовнішніх стінах запроектований навісний вентильований фасад системи «Краспан». Навісний фасад включає шар ефективного утеплювача.

Перегородки з цегли. Перегородки оштукатурюються на всю висоту по сітці з 2-х сторін. Сходи – індивідуальні, монолітні. Огородження сходів, майданчиків, драбин - металеві, індивідуальні.

Стіни шахт ліфтів запроектовано монолітними залізобетонними завтовшки 200 мм. Обов’язковою умовою здійснення монтажних робіт є постійний геодезичний контроль за дотриманням проєктних рішень та висотних позначок. Покрівля м’яка.

4.2.3 Характеристика розрахункової моделі

Принципи формування розрахункової моделі та методи розрахунку. Оцінка міцності, жорсткості та сейсмостійкості будівлі виконана із застосуванням багатоваріантної просторової моделі. Основний метод розрахунку – метод переміщення у кінцево-елементній (КЕ) реалізації [18].

Геометрична схема моделі сформована у вигляді комбінації КЕ різного типу з максимальним наближенням до конструктивного рішення будівлі.

Розрахункова статистична модель (РСМ) та розрахункова динамічна модель (РДМ) прийняті повністю збігаються з топології та геометрії.

Пластичними КЕ моделювалися: монолітний залізобетонний фундамент, стіни та плити перекриття.

Стрижневими КЕ моделювалися: збірні залізобетонні ригелі, металеві стійки та балки.

Реалізація методів розрахунку: статичний, динамічний та конструктивний розрахунок виконано з використанням пакету САПР.

Жорсткісні характеристики та умови примикання КЕ. Геометричні розміри перерізу КЕ прийнято за проектним рішенням.

Жорсткісні характеристики (модулі пружності та деформацій, модулі зсуву, коефіцієнти Пуассона та ін.), а також об'ємні ваги матеріалів стрижневих та пластинчастих КЕ призначені за даними проектного рішення.

Розрахункові властивості матеріалів. Коефіцієнти надійності та розрахункові опори конструкційних матеріалів прийняті для класів та марок: бетону та арматури - по [14, 18].

Навантаження та впливу. Склад та величини врахованих у розрахунковій моделі навантажень і впливів, а також коефіцієнти надійності за навантаженням γ_f (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 – Навантаження та завантаження розрахункової моделі

№ з/п	Найменування завантаження	Вид та склад навантажень	Нормативне значення
1.	Постійні (без бокового додавання ґрунту)	від власної ваги несучих та огороджувальних конструкцій, підлог, засипок, утеплювача, покрівлі	[141] по табл. 2
2.	Бічні тиски ґрунту	тиск ґрунту на зовнішні стіни нижче відм. -0,000м	по [141,143]

Продовження таблиці 4.3

3.	Тимчасові	Тимчасові навантаження на перекриття	всі навантаження за та за табл. 2
4.	снігова	снігова на дах	0,84 кПа для II снігового району
5.	вітер по X+	середня складова вітрового навантаження по напрямкам вісей координат	за для III вітрового району
6.	вітер по X-		
7.	вітер по Y+		
8.	вітер по Y-		
9.	сейсміка вздовж	сейсмічні навантаження	за при сейсмічності 8 балів
10.	сейсмік упоперек		

Навантаження від власної ваги змодельованих конструкцій формувалися в автоматичному режимі [19] та об’ємній вазі матеріалів.

Пульсаційна складова вітрового навантаження не враховувалася, оскільки динамічний ефект значно менший, ніж від сейсмічної.

Сейсмічні навантаження визначено за таких умов:

- розрахункова сейсмічність - 8 балів;

- метод розрахунку - спектральний;

- категорія ґрунтів за сейсмічними властивостями – II.

Поєднання та комбінації навантажень. Розрахункові поєднання навантажень визначено із застосуванням алгоритму [19] з умови знаходження найбільш невигідних комбінацій зусиль та напруг для кожного розрахункового перерізу КЕ змодельованих конструкцій.

Тимчасові навантаження на перекриття враховувалися як об’єднані короткочасні, сейсмічні - як знакозмінні взаємовиключні, вітрові - як короткочасні взаємовиключні.

Під час аналізу напружено-деформованого стану будівлі розглянуто комбінації завантаження (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Комбінації завантажень розрахункової моделі

поєднання навантажень	№ комбінацій	склад комбінацій
основні	1	L1*1+ L2*1
	2	L1*1+L2*1+L3*0.9
	3	L1*1+L2*1+L3*0.9+L4*0.9
	4	L1*1+L2*1+L3*0.9+L4*0.9 +L5*0.9
	5	L1*1+L2*1+L3*0.9+L4*0.9 +L6*0.9
	6	L1*1+L2*1+L3*0.9+L4*0.9 +L7*0.9
	7	L1*1+L2*1+L3*0.9+L4*0.9 +L8*0.9
спеціальні	8	L1*0,9+L2*0,9+L3*0.5+L4*0.5+L5*0.5+L9*1
	9	L1*0,9+L2*0,9+L3*0.5+L4*0.5+L6*0.5+L9*1
	10	L1*0,9+L2*0,9+L3*0.5+L4*0.5+L7*0.5+L9*1
	11	L1*0,9+L2*0,9+L3*0.5+L4*0.5+L8*0.5+L9*1
	12	L1*0,9+L2*0,9+L3*0.5+L4*0.5+L5*0.5+L10*1
	13	L1*0,9+L2*0,9+L3*0.5+L4*0.5+L6*0.5+L10*1
	14	L1*0,9+L2*0,9+L3*0.5+L4*0.5+L7*0.5+L10*1
	15	L1*0,9+L2*0,9+L3*0.5+L4*0.5+L8*0.5+L10*1
Примітки – L1x0,9 означає номер завантаження в таблиці 1 і коефіцієнт його облік в комбінації		

Конструктивні розрахунки несучих залізобетонних елементів виконані за об’єднаним діапазоном розрахункових поєднань зусиль (напруги) всіх варіантів розрахункової моделі будівлі.

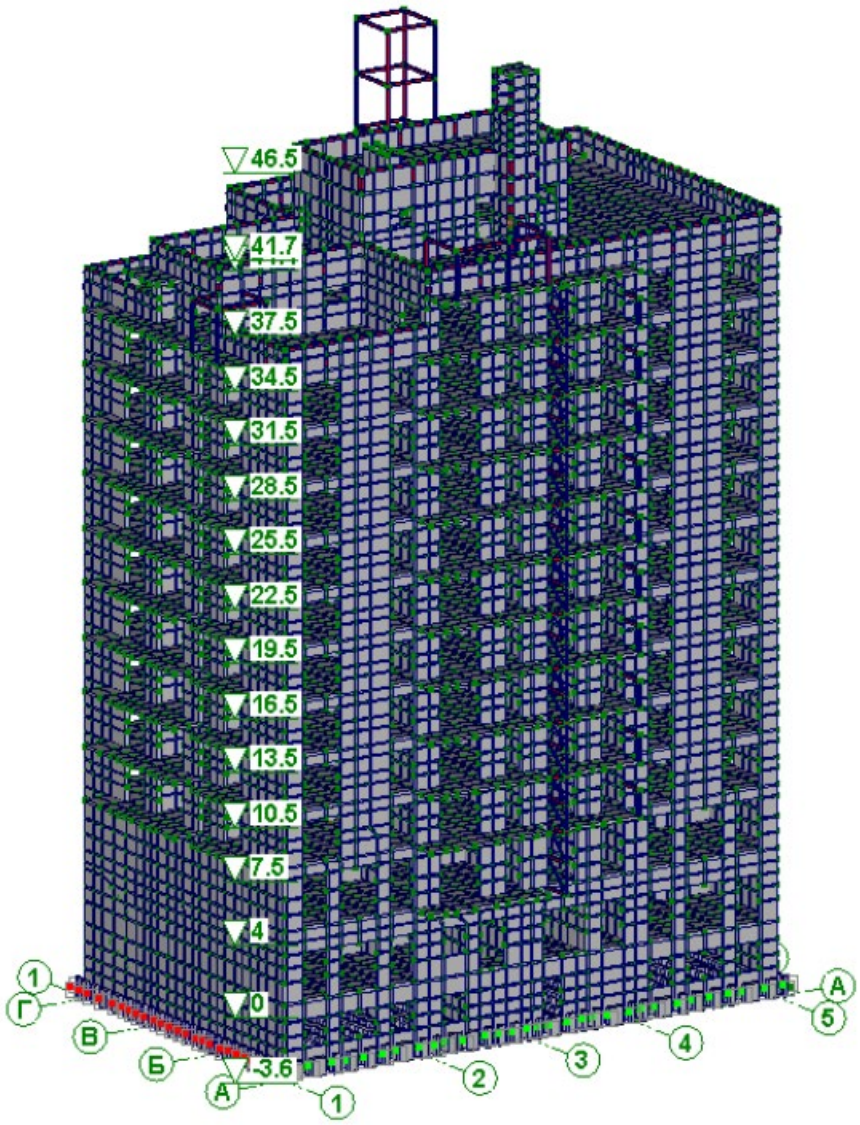


Рисунок 4.6 - Розрахункова оцінка працездатності конструкцій будівлі

Для оцінки реального економічного ефекту застосування дрібнозернистого базальтофібробетону з нанокремнеземом замість звичайного бетону виконано розрахунок витрат на зведення 12-ти поверхової адміністративно-громадської будівлі загальною площею 7250 м^2 з монолітними залізобетонними стінами та перекриттями та фундаменті у вигляді монолітної залізобетонної плити. Проектом основними конструкційним матеріалом прийнято бетон класу В 25. В результаті розрахунків за рахунок застосування високоміцного дрібнозернистого базальтофібробетону з нанокремнеземом класу В 45 обґрунтовано зменшення перерізів елементів: фундаментної плити (товщини) на 28,6 %, стін та

перекриттів на 10%. При цьому зменшені та розрахункові перерізи робочої арматури: у фундаментній плиті – на 8,3 %, у стінах та перекриттях – на 30,5 %. Об’єм бетону фундаментної плити зменшено на 120 м^3, арматури – на 9,0 т. Витрата матеріалу на влаштування типового поверху також зменшений: бетон – на 23 м^3, арматури – на 7,5 т.

Загалом на будівлю обґрунтовано зниження обсягів основних конструкційних матеріалів на 12 поверхів, цокольний поверх та фундамент: бетону - на 419 м^3, арматури - на 106,5 тонн.

Економії за рахунок зниження витрати бетону не досягнуто, оскільки вартість бетону вихідного варіанту В 25 та досліджуваного матеріалу - дрібнозернистого базальтофібробетону з нанокремнеземом 45 практично можна порівняти. При цьому за рахунок економії арматури та арматурних виробів економія прямих витрат може становити 3,76 млн. грн.

Крім того, за рахунок реального та значного зниження обсягів основних конструкційних матеріалів (бетон 419 м^3, арматура 106,5 тонн) знижуються витрати на транспортні витрати на 135,828 тис.грн., заготівельно-складські витрати на 57,048 тис.грн. Локальні кошторисні розрахунки показують також зниження трудовитрат на 3771,74 чол.час, що впливає скорочення термінів будівництва. Таким чином, загальна економія за рахунок застосування дрібнозернистого базальтофібробетону класу 45 замість бетону класу 25 складає 5570654,92 грн. (11 %) при зведенні несучого кістяка будівлі.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Доведено принципову можливість отримання високоміцного базальтофібробетону з використанням базальтового волокна, отриманого відцентрово-дуттьовим способом.

2. Аналіз тепловиділення цементних паст показує, що при введення базальтового волокна та нанокремнезему відбувається збільшення температури гідратації на 5…7 % волокна та нанокремнезему призводить до прискореної освіти гідросилікатів кальцію, що позначається на збільшенні фізикомеханічних характеристик фіброцементних композицій.

3. Доведено збільшення корозійної стійкості базальтового волокна середовищі цементу, що гідратується, за рахунок введення в цементну матрицю нанодисперсного кремнезему гідратації цементу, тим самим запобігаючи лужній корозії базальтове волокно в бетоні.

4. Встановлено вплив довжини та змісту базальтового волокна на технологічні та фізико-механічні властивості базальтофіброцементу.

5. Визначено оптимальний спосіб рівномірного розподілу базальтового волокна в цементній матриці, що полягає в спільному подрібнення компонентів в енергонапруженому апараті – віброістирателю протягом 0,5…1,5 хв.

6. Розроблено склади дрібнозернистого бетону, армованого коротким (до 13 мм) та тонким волокном у кількості 4 % від маси цементу.

7. Доведено, що собівартість базальтофібробетону нижча собівартості звичайного бетону загалом на 5…10 %. Економічний ефект досягається за рахунок зниження витрати цементу у складі бетону, покращення фізико-технічних характеристик та збільшення терміну служби бетону.

8. Здійснено розрахунок несучих залізобетонних елементів адміністративно-громадського 12-ти поверхового будинку в м. Іркутськ. При зменшенні розмірів перерізів конструкцій з базальтофібробетону працездатність та несуча здатність конструкцій забезпечуються.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3021-95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення. [Чинний від 01-01-1996]. Вид. офіц. Київ : Київський науково-дослідний інститут радіовимірювальної апаратури, 1996. 75 с.

2. ДСТУ Б В.2.7-112-2002. Будівельні матеріали. Цементи. Загальні технічні умови. [Чинний від 01-07-2002]. Вид. офіц. Київ : Концерн «Укрцемент», 2002. 43 с.

3. ДСТУ Б В.2.7-232:2010 Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. [Чинний від 01-01-2011]. Вид. офіц. Київ : ДП «Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів», 2011. 31 с.

4. ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. [Чинний від 01-01-1996]. Вид. офіц. Київ : Науково-дослідний інститут в'яжучих речовин і матеріалів ім. В.Д. Глуховського Київського національного університету будівництва і архітектури, 1996. 35 с.

5. ДСТУ Б В.2.7-210:2010 Будівельні матеріали. Пісок з відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови як дрібному заповнювачу. [Чинний від 01-08-2011]. Вид. офіц. Київ : ДП «Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів» (НДІБМВ), 2011. 26 с.

6. ДСТУ Б В.2.7-71-98. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. [Чинний від 01-01-1999]. Вид. офіц. Київ : Науково-дослідний і проектно-вишукувальний інститут з проблем видобутку, транспорту та переробки мінеральної сировини в промисловості будівельних матеріалів, 1999. 29 с.

7. ДСТУ Б В.2.7-114-2002 Будівельні матеріали. Суміші бетонні.

Методи випробувань. [Чинний від 01-07-2002]. Вид. офіц. Київ : Науково-дослідний і проектно-вишукувальний інститут з проблем видобутку, транспорту та переробки мінеральної сировини в промисловості будівельних матеріалів, 2002. 32 с.

8. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 01-09-2010]. Вид. офіц. Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2009. 43 с.

9. ДСТУ Б В.2.7-237:2010 Будівельні матеріали. Камені бетонні і залізобетонні бортові. Технічні умови. [Чинний від 01-07-2011]. Вид. офіц. Київ : Науково-технічний комітет «Будстандарт», 2011. 45 с.

10. S. Sakka and H. Kosuko, Handbook of sol-gel science and technology, Volume I: Solgel Processing, *Kluwer Academic Publisher*, New York, USA, pp.9-10, 2000.

11. M. Estevez, S. Vargas, V. M. Castaño, and R. Rodríguez, Silica nano-particles produced by worms through a bio-digestion process of rice husk, *J. Non-Cryst. Solids*, vol.355, pp.844–850, 2009.

12. K. Amutha, R. Ravibaskar and G. Sivakumar, Extraction, Synthesis and Characterization of Nanosilica from Rice Husk Ash, *International Journal of Nanotechnology and Applications*, Vol.4, pp. 61-66, 2010.

13. Ali Nazari, The effects of curing medium on flexural strength and water permeability of concrete incorporating TiO2 nanoparticles, *Mater. Struct*, Vol. 44, pp.773–786, 2011.

14. Hnes, L., S. Kunytskyi, and S. Medvid. "Theoretical aspects of modern engineering." International Science Group. Boston, 2020. 356 p.

15. Чеканський Б.Б., Луцюк І.В. Оптимізація складу багатокомпонентного композиційного в'яжучого. *Вісник НУ ЛП. Збірник наукових праць*. Львів, 2018. №18, С. 73-78.

16. Demchyna, B., L. Vozniuk, and M. Surmai. "Scientific foundations of solving engineering tasks and problems." 2021. Vol.19, No 1. P. 98-108.

17. Kalafat, K., L. Vakhitova, and V. Drizhd. "Technical research and development." International Science Group. Boston, 2021. 616 p.

18. Sokolovskaya, O. "Scientific foundations of modern engineering/Sokolovskaya O., Ovsiannykova L. Stetsiuk V., etc–International Science Group." Boston, 2020. 528 p.

19. ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008. Настанова щодо застосування хімічних добавок в бетонах і будівельних розчинах. [Чинний від 2010.04.01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. 17 с.

20. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. [Чинний від 2017.04.01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2017. 32 с.

21. Дворкін Л.Й. Мироненко А.В. Будівельні матеріали та вироби із застосуванням промислових відходів : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2019. 298 с.

22. Будівельне матеріалознавство : підручник / П.В. Кривенко, К.К. Пушкарьова, та ін. Київ : «Видавництво Ліра-К», 2015. 624 с.

23. Hansen, E. G., Lüdeke Freund, F. & Fichter, K. (2020). Circular Business Model Typology: Actor, Circular Strategy and Service Level. Institute for Integrated Quality. IQD Research, No. 2020-1.

24. Özbay E., Erdemir M., Durmu H. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties–A review. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 105. P. 423-434.

25. ДСТУ Б EN ISO 12572:2011 Гігротермічні характеристики будівельних матеріалів та виробів. Визначення паропроникності (EN ISO 12572: 2001, IDT). [Чинний від 2013-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 42 с.