

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

Кровяков Сергій Олексійович



УДК 691.327.32

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ
ДЛЯ ТОНКОСТІННИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД**

05.23.05 – будівельні матеріали і вироби

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській державній академії будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор **Мішутін Андрій Володимирович**, Одеська державна академія будівництва та архітектури, завідувач кафедри автомобільних доріг і аеродромів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Дворкін Леонід Йосипович**, Національний університет водного господарства та природокористування, завідувач кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства;

доктор технічних наук, професор **Сердюк Василь Романович**, Вінницький національний технічний університет, професор кафедри будівництва, міського господарства та архітектури;

доктор технічних наук, професор **Шейніч Леонід Олександрович**, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», завідувач відділу технології виготовлення залізобетонних конструкцій.

Захист відбудеться «07» травня 2019 р. о 10⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.085.01 при Одеській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської державної академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

Автореферат розісланий «02» квітня 2019 р.

В.о. вченого секретаря спеціалізованої вченої ради, д.т.н., професор



Суханов В.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Більшість бетонних і залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд виготовляється з важкого бетону, але як показує світовий досвід, легкі бетони на пористих заповнювачах є ефективними для цілого ряду споруд, зокрема тонкостінних. Основною перевагою легких бетонів є зниження ваги конструкцій при забезпеченні їх високої стійкості до різноспрямованих навантажень. Особливо перспективні легкі бетони та конструкції на їх основі для залізобетонних плавучих споруд. Використання бетонів на пористих заповнювачах дозволяє підвищити вантажопідйомність плавучих споруд та покращити комфортність перебування людей та умови роботи технологічного обладнання в їх приміщеннях. Міжнародною федерацією бетону і залізобетону (*fib*) були сформульовані рекомендації щодо повного переходу на високоміцний легкий бетон при виготовленні конструкцій плавучих залізобетонних платформ. Разом з тим, важкі експлуатаційні умови, в яких знаходяться бетони тонкостінних гідротехнічних споруд, обумовлюють комплекс вимог щодо забезпечення довговічності легких бетонів. Україна є однією з небагатьох країн світу, яка володіє технологією залізобетонного суднобудування, і задача підвищення якості та довговічності легких бетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд є актуальною.

Найбільш перспективними методами вирішення даного завдання є застосування раціональних рецептурних і технологічних методів, спрямованих на утворення структури з переважно замкнутою пористістю, зокрема у контактній зоні заповнювача в цементно-піщаній матриці. При цьому необхідно враховувати наявну вітчизняну сировинну базу в'язучих і заповнювачів. Актуальними залишаються завдання підвищення ефективності застосування дисперсної арматури в бетонах на пористих заповнювачах та довговічності легких декоративних бетонів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі автомобільних доріг і аеродромів Одеської державної академії будівництва та архітектури в рамках держбюджетних тем «Підвищення довговічності модифікованих бетонів для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд» (№ держреєстрації 0116U003195), «Розробка та впровадження сучасних технологій при будівництві автомобільних доріг, водопропускних споруд та аеродромів» (№ держреєстрації 0111U001249), держбюджетної теми Держагентства з водних ресурсів «Розробка регламенту з обстеження та оцінки технічного стану бетонних та залізобетонних гідротехнічних споруд меліорації» (№ держреєстрації 0108U005468) та в рамках госпдоговірної теми «Розробка сумішей суднобудівних бетонів і ефективних хімдобавок для використання на Херсонському державному заводі «Паллада» під час будівництва композитних та залізобетонних плавучих споруд» (№ держреєстрації 0107U4000808).

Метою роботи є розвиток теоретичних основ і створення практичних методів отримання легких бетонів на пористих заповнювачах із заданими

експлуатаційними властивостями та підвищеною довговічністю для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих, за рахунок управління структурою шляхом застосування модифікаторів і здійснення операцій, спрямованих на покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці.

Для досягнення мети поставлені **завдання**:

- провести обстеження стану тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема з бетонів на пористих заповнювачах, проаналізувати механізми корозійного пошкодження бетонів і вплив експлуатаційного середовища на зміну структури і властивостей легких бетонів з врахуванням особливостей умов експлуатації;

- вдосконалити методи управління структурою легких бетонів за рахунок обробки пористого заповнювача для забезпечення необхідного рівня фізико-механічних властивостей і довговічності матеріалу шляхом покращення сумісної роботи заповнювача і матриці;

- встановити закономірності вологісних деформацій штучного пористого заповнювача, зокрема з гідрофобізованою поверхнею, в умовах твердіння легкобетонної суміші;

- вдосконалити рецептурні методи управління структурою легких бетонів для підвищення їх довговічності при проектуванні складів бетонних сумішей, дослідити вплив модифікаторів, дисперсної арматури та обробки пористого заповнювача цементною суспензією на структуру та властивості бетонів;

- встановити можливість використання залізоокисних порошкових пігментів для поліпшення декоративних властивостей легких бетонів при забезпеченні їх довговічності;

- проаналізувати вплив гідрофобної обробки поверхні пористого гравію в комплексі з використанням рецептурних методів управління структурою на довговічність, фізико-механічні та експлуатаційні властивості суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів;

- запропонувати методи підвищення міцності і довговічності бетонів на вапняковому щебені у конструкціях гідротехнічних споруд;

- встановити можливість застосування пористих пісків для зниження середньої густини легких бетонів тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд при забезпеченні довговічності даних матеріалів;

- розробити технологію виробництва модифікованих суднобудівних керамзитобетонів с заданою міцністю та підвищеною водонепроникністю, морозостійкістю і корозійною стійкістю, провести промислову реалізацію результатів досліджень та розробити відповідні нормативні документи.

Об'єкт досліджень – структура і властивості модифікованих легких бетонів і фібробетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд.

Предмет досліджень – закономірності, які описують взаємозв'язок між складом модифікованого бетону і фібробетону на пористих заповнювачах і

параметрами його структури, фізико-механічними властивостями і довговічністю.

Методи дослідження. Дослідження виконані з широким використанням методів оптимального планування експериментів і застосуванням багатofакторного математичного моделювання властивостей модифікованих бетонів. Фізико-механічні характеристики бетонів і бетонних сумішей, а також параметри порової структури бетону визначалися відповідно до діючих нормативних документів на повіреному обладнанні. Застосовано мікроскопічний і рентгенофазовий аналіз структури бетону, аналіз технологічної пошкодженості композитів та цифровий аналіз кольорової гами легких декоративних бетонів. Теплопровідність керамзитобетонів визначалася на спеціальній установці. Використано методи комп'ютерного матеріалознавства для отримання раціональних складів модифікованих бетонів і фібробетонів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- розвинуто теоретичні основи підвищення довговічності легких бетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд за рахунок введення комплексних модифікаторів, які містять пластифікатор і кольматуючу добавку або мікрокремнезем та знижують проникність розчинної частини бетону, одночасно зі застосуванням технологічних методів, спрямованих на покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці;

- розвинуто уявлення про механізм проникнення вологи через бетони на пористих заповнювачах, виявлено загальні закономірності формування та зміни структури даних бетонів у процесі експлуатації в конструкціях тонкостінних гідротехнічних споруд;

- обґрунтовано вибір рецептурних і технологічних методів, спрямованих на отримання структури, що забезпечує підвищення довговічності легких бетонів для конструкцій тонкостінних гідротехнічних споруд, уточнені уявлення про механізми дії модифікаторів на структуру і властивості бетонів на різних типах пористих заповнювачів;

- доведена можливість покращення механічних властивостей і підвищення довговічності легкого бетону за рахунок гідрофобної обробки поверхні пористого гравію, яка знижує вологісні деформації заповнювача при структуроутворенні і експлуатації композиту;

- виявлено вплив концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії, яка використовується для гідрофобної обробки поверхні керамзитового гравію, на фізико-механічні властивості керамзитобетону в різних умовах експлуатації;

- доведено позитивний вплив технологічного прийому обробки пористих заповнювачів цементною суспензією в початковій стадії перемішування суміші на їх роботу в цементно-піщаній матриці легких бетонів;

- виявлено ефективність застосування дисперсного армування для бетонів на різних видах пористих заповнювачів;

- показана можливість зниження середньої густини легких бетонів для тонкостінних споруд без погіршення їх довговічності за рахунок використання гранульованого піноскла в якості дрібного заповнювача;

- встановлена можливість поліпшення декоративних властивостей легких суднобудівних бетонів за рахунок використання залізоокисних порошкових пігментів при забезпеченні необхідної довговічності матеріалу.

Практичне значення отриманих результатів:

- вдосконалено методику досліджень конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема з бетонів на пористих заповнювачах, розроблено неруйнівний метод визначення однорідності бетону в конструкціях, в основу якого покладено принцип порівняння технологічної та експлуатаційної пошкодженості бетону в різних частинах конструкції (патент України №02897) та спосіб прискореного визначення морозостійкості бетону по зміні його пошкодженості при заморожуванні і відтаюванні (патент України №20590);

- запропоновано новий метод дослідження корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі води-середовища;

- запропоновані оптимальні технологічні методи виготовлення легких бетонів підвищеної довговічності, зокрема з гідрофобною обробкою поверхні керамзитового гравію та з обробкою пористого заповнювача цементною суспензією;

- експериментально підтверджена ефективність запропонованих рецептурних методів управління структурою бетонів на пористих заповнювачах для підвищення довговічності легких бетонів тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд;

- з використанням методів експериментально-статистичного моделювання визначені раціональні склади бетонів на пористих заповнювачах для різних типів тонкостінних конструкцій, в тому числі оптимальні склади суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів з підвищеною довговічністю та покращеними фізико-механічними властивостями;

- розроблено склади декоративних легких бетонів підвищеної довговічності для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних;

- розроблено та затверджено технологічний регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків (Херсонський державний завод «Паллада», 2014 р.);

- розроблено та знаходиться на стадії погодження проект Державного стандарту України «Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування», який складається з двох частин: Бетон суднобудівний важкий і Бетон суднобудівний легкий;

- результати роботи впроваджені на об'єктах гідротехнічного будівництва та в навчальному процесі в Одеській академії будівництва та архітектури, зокрема при підготовці здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні робочої гіпотези, мети і постановці завдань досліджень; інтерпретації отриманих експериментальних даних; отриманні комплексу експериментально-статистичних моделей, що описують вплив складу і технології приготування на структурні параметри і властивості легких бетонів; розробці раціональних складів легких бетонів підвищеної довговічності і ефективних технологічних прийомів їх приготування. Усі основні результати дисертаційної роботи одержані самостійно. Нормативні документи і рекомендації розроблялися у співавторстві з науковим консультантом А.В. Мішутіним. Запропоновані автором методи управління структурою і властивостями бетонів на пористих заповнювачах були використані в дослідженнях, що були проведені сумісно з А.В. Мішутіним, Л.В. Дудник, О.В. Піщевим, В.Л. Богуцьким, А.В. Даніленко, А.О. Полторапавловим та С.М. Петричко.

Особистий внесок автора в роботах, що надруковані в співавторстві, полягає в наступному:

- обґрунтуванні та оцінці ефективності рецептурних і технологічних методів підвищення довговічності бетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд [2,5-7,15,22,26,28-30,44];
- визначенні впливу модифікаторів на структуру, властивості та довговічність бетонів на пористих заповнювачах [3,9,10,18,20,21,27,31,39,40,45];
- аналізі зміни структурних показників, які впливають на довговічність легких бетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд [13,19,25,36,41];
- визначенні впливу пористих заповнювачів на процеси структуроутворення та властивості легких бетонів [4,11,12,16,17,23,24,35,38,43];
- виборі раціональних складів модифікованих бетонів з підвищеною довговічністю [14,34,42];
- аналізі властивостей декоративних легких бетонів [8,37];
- виконанні патентного пошуку, опрацюванні запропонованих методів визначення властивостей бетону на практиці [32,33].

У дисертації не використовувалися матеріали кандидатської дисертації.

Апробація дисертаційної роботи. Основні положення і результати досліджень, виконаних в дисертаційній роботі, були представлені на наступних міжнародних, всеукраїнських і регіональних конференціях та семінарах: науково-технічних семінарах «Структура, властивості та склад бетону» (м. Рівне, 2013, 2015 роки), міжнародних науково-технічних конференціях «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (м. Одеса, 2015-2018 роки), міжнародних конференціях «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 2015, 2017 роки), міжнародних науково-технічних семінарах «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (м. Одеса, 2016-2018 роки), конференціях професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (м. Одеса, 2015-2018 роки), міжнародній науково-практичній конференції «Бетони, цементи і добавки для бетонів в сучасному будівництві: актуальні питання виробництва і застосування» (м. Київ, 2015 р.), міжнародних конференціях «Структуроутворення, міцність і

руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій» (м. Одеса, 2016, 2018 роки), науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси» (м. Одеса, 2016, 2018 роки), міжнародній конференції «Сучасні методи і технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг, споруд на них та управління проектами їх розвитку (м. Київ, 2016 р.), другій міжнародній конференції щодо сталого розвитку бетону ICCS16. Second International Conference on Concrete Sustainability (Іспанія, м. Мадрид, 2016 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» (м. Полтава, 2017 р.), міжнародній конференції MATRIB 2017 (materials, tribology, recycling) (Хорватія, м. Вела-Лука, 2017 р.), міжнародній конференції «Building innovations – 2018» (Азербайджан, м. Баку, 2018 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 2018 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Автомобільні дороги: безпека і надійність» (Білорусь, м. Мінськ, 2018 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані у 45 наукових працях, з яких 25 статей у фахових виданнях України (7 індексуються наукометричною базою Index Copernicus), 5 статей у наукових періодичних виданнях інших держав (2 індексуються наукометричними базами Scopus і Web of Science), 3 деклараційних патенти України, 10 тез доповідей у збірниках наукових конференцій (1 індексується наукометричною базою Web of Science), а також 2 статті, що додатково відображають результати роботи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертацію викладено на 386 сторінках, у тому числі 303 сторінки основної частини, складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел (352 найменування) та додатків на 18 сторінках, містить 79 рисунків і 29 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, показаний зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета та задачі досліджень, наведені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, а також результати апробації та дані про публікації.

У **першому розділі** роботи проаналізовано досвід використання бетонів на пористих заповнювачах в гідротехнічному будівництві, а також результати досліджень, присвячених особливостям складу, структури, властивостям і довговічності даних бетонів.

Завдяки певним перевагам легкі конструкційні бетони досить широко використовуються у гідротехнічному будівництві, зокрема у тонкостінних конструкціях плавучих споруд, тунелів і мостів. При цьому якщо у цивільному будівництві використання бетонів на пористих заповнювачах знизилося завдяки поширенню ефективних ніздрюватих бетонів, то в галузі залізобетонного суднобудування легкі бетони на пористих заповнювачах залишаються

безальтернативними. Чинний ОСТ5.9880-85 дозволяє використання в якості легких суднобудівних бетонів виключно керамзитобетонів та обмежує їх середню густину діапазоном 1600-2000 кг/м³ у повітряно-сухому стані. Для плавучих споруд зменшення маси конструкцій дозволяє підвищити вантажопідйомність. Ефективність легких суднобудівних бетонів доведена майже сторічним досвідом їх застосування. Суднобудівний бетон на пористих заповнювачах також є одним з найбільш перспективних матеріалів для створення плавучих споруд великих розмірів, призначених для освоєння ресурсів континентальних шельфів, що підтверджено Міжнародною федерацією бетону і залізобетону (*fib*). Легкий бетон все частіше використовується при будівництві плавучих газо- і нафтовидобувних платформ. Україна є однією з небагатьох країн світу, яка володіє технологією залізобетонного суднобудування, при цьому в нашій країні накопичено певний досвід застосування суднобудівного керамзитобетону.

Властивості легкого бетону багато в чому визначаються структурою і властивостями застосованого заповнювача, при цьому навіть незначні коливання якості заповнювача впливають на властивості бетону. Відповідно для виробництва конструктивного легкого бетону підходять не всі пористі заповнювачі і найчастіше вони представлені різними типами пористого керамічного гравію і щебеню, рідше – природними пористими заповнювачами. Структура і властивості бетонів на пористих заповнювачах досліджені в роботах L. Berntsson, S. Chandra, J. L. Clarke, Г.А. Бужевича, В.М. Вирового, Л.Й. Дворкіна, В.Г. Довжіка, В.А. Дорфа, А.І. Іванова, В.І. Кондращенко, О.А. Кучеренко, М.І. Макрідіна, І.М. Максимової, Л.П. Орендліхер, О.Б. Пірадова, М.О. Попова, К.К. Пушкарьової, М.З. Сімонова, В.Г. Суханова, В.Р. Фаликмана, Л.О. Шейніча та інших вчених. В результаті цих досліджень показані значні можливості модифікування структури і покращення властивостей легких бетонів на сучасному етапі розвитку їх технології. Зокрема для конструкційних легких бетонів з метою підвищення їх міцності при забезпеченні необхідної густини експериментально доведена ефективність методів, які переважно аналогічні відомим методам для важких бетонів: застосування високомарочних цементів і міцних заповнювачів, ефективних модифікаторів, проектування складів з низьким В/Ц тощо.

Для бетонів на пористих заповнювачах застосовуються майже всі відомі хімічні добавки, зокрема всі типи пластифікаторів. Більшого ефекту при вирішенні задач покращення властивостей легкого бетону і розширення спектру його функціональних можливостей дозволяють досягнути комплексні модифікатори. Значний внесок у теорію й практику модифікування бетонів, зокрема на пористих заповнювачах, зробили: І.Н. Ахвердов, В.Г. Батраков, Ю.М. Баженов, Г.І. Горчаков, І.М. Грушко, А.В. Мішутін, А.А. Плугін, А.М. Плугін, О.М. Пшінько, В.Б. Ратінов, Т.І. Розенберг, М.А. Саницький, А.Є. Шейкін та інші вчені.

Значне місце в дослідженнях багатьох вчених знайшли питання довговічності легких бетонів. Доведено, що управлінням структурою бетонів на

пористих заповнювачах можна забезпечити достатньо високі показники властивостей даних матеріалів, що визначають їх довговічність в конструкціях. Разом з тим ця проблема залишається актуальною. Особливо це стосується бетонів для тонкостінних споруд, які піддаються комплексній агресивній дії оточуючого середовища. На бетон тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд одночасно і нерівномірно впливають різні експлуатаційно-кліматичні чинники (хімічний вплив солей води, зокрема морської, гідростатичний тиск, заморожування і відтаювання, зміна температури, зволоження та висушування, динамічний вплив води й льоду), які викликають корозійні процеси всіх типів. В.Л. Чернявський пропонував розрізняти два основних типи корозійних процесів в бетоні, при цьому розглядав це як розвиток класифікації В.М. Москвіна. Перший тип реалізується за схемою видалення компонентів твердої фази зі структури бетону, другий тип – за схемою накопичення твердих продуктів в структурі бетону. Також відділяється «змішаний» тип корозії, пов'язаний зі спільним протіканням в бетоні корозійних процесів перших двох типів. Фільтрація води крізь конструкцію викликає зміни в структурі бетону: проходить корозійне винесення розчинених компонентів цементного каменю, але одночасно активується гідратація реліктів в'язучого. Також в наслідок фільтрації може відбуватися накопичення солей, продуктів корозії цементного каменю та «пізньої» гідратації цементу в капілярах і порах. Останнє здатне виступати як позитивним, так і руйнуючим чинником. При забезпеченні високої водонепроникності бетону значно уповільнюється дія всіх процесів, пов'язаних з фільтрацією. При цьому для бетонів на пористих заповнювачах, непроникність має забезпечуватися з врахуванням впливу заповнювачів на капілярно-порову структуру контактної зони та матеріалу в цілому. При одночасній дії заморожування і відтаювання не менш важливою з позиції довговічності є морозостійкість бетону. Дослідженням проникності та морозостійкості бетонів, зокрема на пористих заповнювачах, присвячені роботи С.М. Алексєєва, В.І. Бабушкіна, Ю.М. Бутта, Г.П. Вербецького, Г.І. Горчакова, Г.Добролюбова, Л.Й. Дворкіна, О.Л. Дворкіна, Ф.М. Іванова, В.А. Мішутіна, В.М. Москвіна, А.М. Невілля, А.А. Пługіна, А.М. Пługіна, А.М. Подвального, Н.К. Розенталя, В.В. Стольникова, Н.М. Толипіної, В.Л. Чернявського, Ю.В. Чеховського, А.Є. Шейкіна, С.В. Шестоперова та інших вчених.

В бетонах на пористих заповнювачах капілярно-пористу структуру має не тільки цементний камінь, а й заповнювач. На відміну від важких бетонів, значний вплив на структуру легких бетонів оказує процес міграції води як в заповнювач, так і з нього. Л.П. Орендліхер вказувала, що подібні процеси протікають по закону маятника, а пориста структура заповнювача є причиною складного масообміну, що проходить у бетонній суміші з моменту її змішування з водою і продовжуються тривалий час при твердінні бетону і експлуатації конструкції. Ці процеси в різній мірі впливають на структуру під час приготування, укладання, ущільнення суміші та при твердінні бетону. Тобто задача підвищення довговічності бетону має вирішуватися з врахуванням всього спектру дій корозійного середовища на його структуру: в капілярах,

порах та внутрішніх поверхнях розділу. При цьому окрему увагу слід приділяти контактній зоні заповнювача.

Функціональне призначення гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних, обумовлює певні особливості умов експлуатації бетону в тонкостінних конструкціях, основні з яких визначаються наявністю трьох суттєво відмінних зон впливу експлуатаційного середовища: підводної, надводної, та зони змінного рівня води. Для даних зон різними є гідростатичний тиск, вологість і температура середовища експлуатації, що утворює умови для існування перманентного нерівноважного стану бетону по висоті та перетину тонкостінної конструкції, а також до існування динамічних впливів на конструкцію. Нерівноважний стан передбачає протікання процесу безперервної адаптації матеріалу до умов експлуатації, в першу чергу в зоні змінного рівня води. Формування структури легких бетонів відбувається шляхом взаємодії двох капілярно-пористих середовищ – заповнювача і цементно-піщаної матриці. Внаслідок такої взаємодії протікають процеси обміну вологи та пов'язані з ними процеси об'ємних деформацій, величина і кінетика яких визначається капілярною пористістю. Для зниження несприятливого впливу внутрішнього обміну вологи на процеси структуроутворення та експлуатації легкого бетону стоїть задача зменшення масообміну між пористим заповнювачем і цементно-піщаною матрицею як при твердінні, так і при експлуатації матеріалу. Це має знизити величину вологісних деформацій і забезпечити покращення сумісної роботи заповнювача і матриці. Але навіть при мінімальних вологісних деформаціях заповнювача на початковій та експлуатаційній деформації, а також адаптивні властивості бетону впливає капілярно-порова структура цементно-піщаної матриці. Відповідно важливою задачею є організація структури, яка здатна забезпечити мінімальне поглинання і проникнення вологи з одночасним зниженням вологісних деформацій. З врахуванням умов експлуатації бетону на пористих заповнювачах в тонкостінних спорудах і сучасних теоретичних уявлень про вплив структури легких бетонів на його властивості сформульовано *робочу гіпотезу дисертації*, яка полягає в наступному. Підвищення фізико-механічних характеристик бетону на пористих заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд, що визначають його довговічність, може бути досягнуто шляхом регулювання взаємодії між цементно-піщаною матрицею та заповнювачем в процесі структуроутворення і експлуатації бетону, спрямованого на покращення їх сумісної роботи, зокрема за рахунок зниження вологісних деформацій заповнювача. При цьому має забезпечуватися низька проникність як матриці, так і заповнювача при його роботі в даній матриці. Задача вирішується шляхом створення структури зі зниженою капілярною пористістю цементно-піщаної матриці, зокрема в контактній зоні заповнювача. Ефективний вплив на структуру легких бетонів може бути здійснений за рахунок застосування таких рецептурних методів, як введення модифікаторів різного типу і дисперсного армування, а також технологічних методів оброки

поверхні пористого заповнювача, спрямованих на покращення його роботи в цементно-піщаній матриці в вологих умовах експлуатації.

У другому розділі описано методичні принципи проведення досліджень. Для досягнення мети і вирішення завдань була розроблена загальна послідовність проведення досліджень, яка складається з декількох пов'язаних етапів. На *першому етапі* в результаті натурних обстежень гідротехнічних споруд були встановлені основні причини руйнування бетону з врахуванням зони його розташування відносно рівня води в конструкції. На основі отриманих даних були обґрунтовані загальні вимоги до бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, які забезпечують необхідний рівень довговічності в конкретних умовах експлуатації. На *другому етапі* проведений аналіз впливу особливостей структуроутворення бетонів на пористих заповнювачах на фізико-механічні властивості, що визначають довговічність даних матеріалів. Проаналізовано вплив вологісних деформацій на сумісну роботу заповнювача і цементно-піщаної матриці. Обґрунтовано спрямованість змін структури бетонів на пористих заповнювачах для підвищення їх довговічності. На *третьому етапі* досліджувався вплив модифікаторів різного типу, кількості в'язучого, дисперсного армування, ступеню розсунення пористого заповнювача, а також технологічного прийому обробки пористого заповнювача цементною суспензією на структуру та фізико-механічні властивості керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих. На *четвертому етапі* досліджувалася довговічність та кольорова гама декоративних легких керамзитобетонів, які, зокрема, можуть бути використаними в якості суднобудівних. На *п'ятому етапі* досліджувався вплив комплексної модифікації кольматуючою і пластифікуючою добавками на структуру і властивості суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів. Також вивчалась ефективність прийому гідрофобізації поверхні керамзиту як операції, спрямованої на покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці. На *шостому етапі* досліджувалися властивості бетонів на різних типах пористих заповнювачів, зокрема гранульованому піносклі і вапняковому щебені. Також визначалась можливість застосування пористих пісків в легких бетонах тонкостінних конструкцій з метою зниження середньої густини матеріалу при забезпеченні його довговічності та необхідного рівня фізико-механічних показників. На *сьомому етапі* було проведено дослідне впровадження отриманих результатів.

Описано методику і результати натурних обстежень бетонів тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема на пористих заповнювачах, які проводилися в рамках *першого етапу роботи*. Виявлено, що найбільш значні пошкодження бетону в результаті експлуатаційних впливів спостерігаються в зоні змінного рівня води включно з зоною капілярного підсосу вологи. Також розповсюджені дефекти, пов'язані з фільтрацією води крізь конструкції та дією заморожування і відтаювання. Запропоновано і захищено патентами неруйнуючий спосіб визначення однорідності бетону в конструкції по різниці технологічної та експлуатаційної пошкодженості бетону в різних частинах

даної конструкції та спосіб прискореного визначення морозостійкості бетону, якій ґрунтується на визначенні зміни технологічної пошкодженості матеріалу при заморожуванні і відтаюванні.

Описано методичні принципи проведення досліджень структури та властивостей легких бетонів, бетонних сумішей, а також похідних матеріалів. Наведені характеристики компонентів, які використовувалися при дослідженнях бетонів на різних етапах роботи. Описані основні принципи побудови і статистичного аналізу експериментально-статистичних моделей, які розраховувалися за результатами планованих експериментів та широко використовувалися у дослідженнях (методики В.А. Вознесенського, Т.В.Ляшенко).

Третій розділ роботи присвячений аналізу технологічних методів забезпечення довговічності бетонів на пористих заповнювачах. В рамках *другого етапу* досліджень експериментально обґрунтовано, що підвищення довговічності легких бетонів досягається за рахунок створення структури зі зниженою капілярною пористістю цементно-піщаної матриці, зокрема в контактній зоні заповнювача. Спрямовано управляти структурою дозволяє використання модифікаторів та здійснення операцій, що мінімізують об'ємні вологісні деформації заповнювача, за рахунок чого покращується якість сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці.

Один з головних механізмів впливу сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці на структуру і властивості легкого бетону проілюстровано на схемі, наведеній на рис. 1.

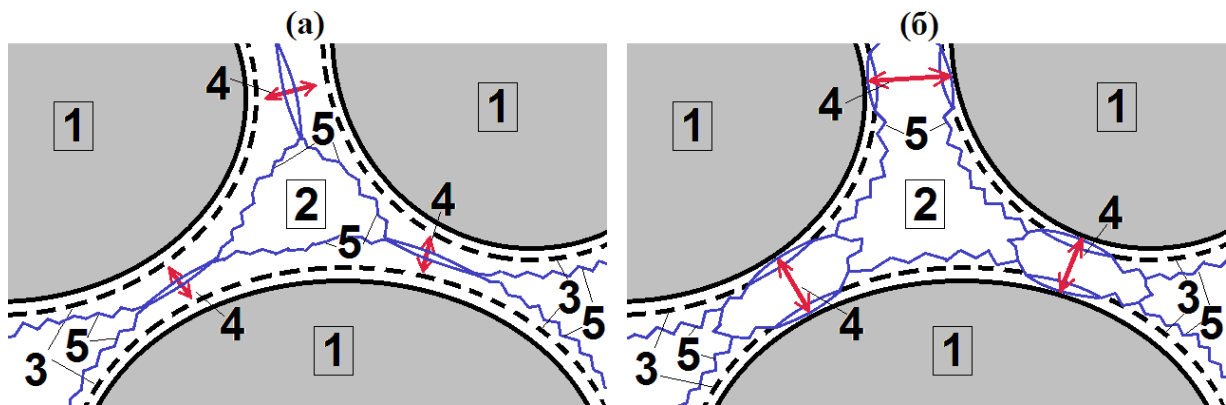


Рис.1. Механізми утворення технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу в цементно-піщаній матриці легкого бетону при набуханні і усадці пористого заповнювача: а) при адгезії матричного матеріалу до заповнювача вищій за його когезію; б) при когезії матричного матеріалу вищій за адгезію до заповнювача

1 – пористий заповнювач; 2 – цементно-піщана матриця; 3 – границя вологісних деформацій заповнювача в процесі структуроутворення і експлуатації; 4 – зони з найбільшою інтенсивністю вологісних деформацій; 5 – напрям вірогідного зростання фронту технологічних тріщин

За рахунок вологісних деформацій пористого заповнювача в цементно-піщаній матриці виникають зони з найбільшою інтенсивністю даних

деформацій, в яких наявні технологічні та експлуатаційні тріщини, що активно зростають. При цьому можливі два основних типи механізмів утворення і розвитку технологічних тріщин в матриці легкого бетону при набуханні і усадці заповнювача: при адгезії матричного матеріалу до заповнювача вищій за його когезію (рис.1.а), та при когезії матричного матеріалу вищій за адгезію до заповнювача (рис.1.б). Надалі ці тріщини здатні поєднуватися з утворенням внутрішніх поверхонь розділу, які з високою вірогідністю можуть розкритися до величин, що дозволяють проникати воді і за рахунок цього інтенсифікувати більшість видів корозійних впливів середовища. Відповідно зниження набухання і усадки заповнювача є важливим механізмом впливу на структуру композиту, спрямованим на підвищення його довговічності. Також одним з механізмів покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці може слугувати регулювання величини адгезії матричного матеріалу до пористого заповнювача. При цьому слід прагнути до «урівноваження» між величинами адгезії цементно-піщаної матриці до заповнювача та її власної когезії.

Таким чином, для підвищення фізико-механічних властивостей та відповідно довговічності бетонів на пористих заповнювачах, які змінюють свій об'єм через набухання і втрату вологи, корисними є технологічні операції, спрямовані на забезпечення сумісної роботи заповнювача і матриці, зокрема на зменшення вологісних деформацій заповнювача. З врахуванням особливостей умов експлуатації тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд окреслені вище задачі було запропоновано вирішувати двома методами.

Перший метод – обробка пористого заповнювача цементною суспензією у початковій стадії перемішування суміші, що є досить простим технологічним прийомом. Обробка здійснюється за рахунок завантаження у бетонозмішувач води з добавками і цементу з подальшим приготуванням суспензії, яке займає в середньому одну хвилину. Далі у змішувач завантажуються гравій, який обробляється суспензією протягом ще однієї хвилини. Останнім у змішувач подається пісок і перемішування продовжується до досягнення однорідності бетонної суміші. Така обробка зміцнює поверхневий шар крупного пористого заповнювача та перехідної зони між заповнювачем і матрицею, підвищуючи її однорідність, сприяє перетворенню пористості заповнювача у замкнуту, покращує однорідність заповнювача завдяки насиченню тріщин, пор та інших порожнин гравію цементним тістом. У сумі дані ефекти впливають на капілярно-порову структуру композиту, зокрема в контактній зоні, та відповідно на роботу заповнювача в матриці.

Другий метод – гідрофобізація поверхні пористого заповнювача, яка здійснюється завдяки його обробці емульсією кремнійорганічної рідини з подальшим висушуванням для утворення гідрофобної плівки. Це дозволяє знизити поглинання води з цементно-піщаної матриці, за рахунок чого понизити В/Ц суміші без погіршення її технологічності, а також у 3..5 разів зменшити об'ємні зміни зерен заповнювача в матриці в процесі структуроутворення, що показано нижче. Також гідрофобізація змінює ступень

адгезії заповнювача до матриці та знижує ефект розм'якшення заповнювача у вологих умовах експлуатації. Цей метод вперше був запропонований О.А.Кучеренком і В.М. Вировим, але в даній роботі він вдосконалений з позиції забезпечення саме підвищення довговічності легких бетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд.

Обидва запропоновані методи управління сумісною роботою заповнювача і матриці мають здійснюватися в комплексі з рецептурними рішеннями, спрямованими на підвищення довговічності – проектуванням раціональних складів бетонів, введенням пластифікаторів, кольматуючих добавок і наповнювачів, дисперсним армуванням тощо. Застосування комплексних заходів дозволяє отримувати структуру легкого бетону з переважно закритою пористістю, враховуючи пористість заповнювача в композити, при зниженні капілярної пористості цементно-піщаної матриці.

Проаналізовано динаміку проникнення цементної суспензії у гранули керамзиту при обробці. Встановлено, що темп проникнення суспензії у гранули після 3-х хвилин обробки значно знижується і судячи зі зміни кольору фенолфталеїну на зрізі суспензія проникає вглиб пористих гранул на 1-3 мм. Але при наявності в гранулі тріщин, що виходять за її оболонку, в'язуче здатне проникати по даній тріщині на більшу глибину, що сприяє покращенню однорідності гранул в бетоні. Встановлено, що за рахунок застосування технологічного прийому обробки пористого заповнювача цементною суспензією міцність керамзитобетону зростає на 2-2,5 МПа в порівнянні з аналогічними за складом бетонами на основі насиченого водою гравію. Також за рахунок обробки заповнювача зменшується середній розмір пор керамзитобетону та підвищується показник однорідності пор за розмірами.

Проаналізовано вплив гідрофобної обробки поверхні пористого гравію емульсією кремнійорганічної рідини 136-157М з концентрацією 0,8% на властивості керамзитобетону. Встановлено, що міцність керамзитобетону на гідрофобізованому гравії на 2-2,5 МПа вище за міцність контрольного складу при рівноважній вологості та на 3-4 МПа у водонасиченому стані. Це пояснюється зниженням В/Ц суміші за рахунок зменшення водопоглинання заповнювача і меншою ступеню розм'якшення гідрофобізованого керамзитового гравію при насиченні легкого бетону водою. Крім того позитивний вплив гідрофобної обробки пояснюється зменшенням об'ємних деформацій керамзитового гравію в процесі структуроутворення бетону, що показано нижче і що сприяє покращенню сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці.

В реальних умовах твердіння легкобетонної суміші керамзитовий гравій активно поглинає вологу лише на протязі перших декількох годин після подачі в бетонозмішувач. Далі за рахунок зниження кількості вільної води в суміші починається зворотній процес – віддача вологи з пористих зерен. Крім того, терміни кінця тужавлення цементу також, як правило, обмежені 3-4 годинами. Для розуміння характеру вологісних деформацій штучного пористого заповнювача саме в початкові терміни утворення структури бетону були

проаналізовані набухання і зміна вологості керамзитового гравію. Дослідження вологісних деформацій проводилися на гранулах розміром 11-12 мм та 18-19 мм, що було обумовлено конструкцією створеної установки. Використовувався керамзитовий гравій, який після виготовлення не зволожувався, а також гравій з гідрофобізованою 0,8% емульсією кремнійорганічної рідини поверхнею. Результати досліджень наведено на рис.2.

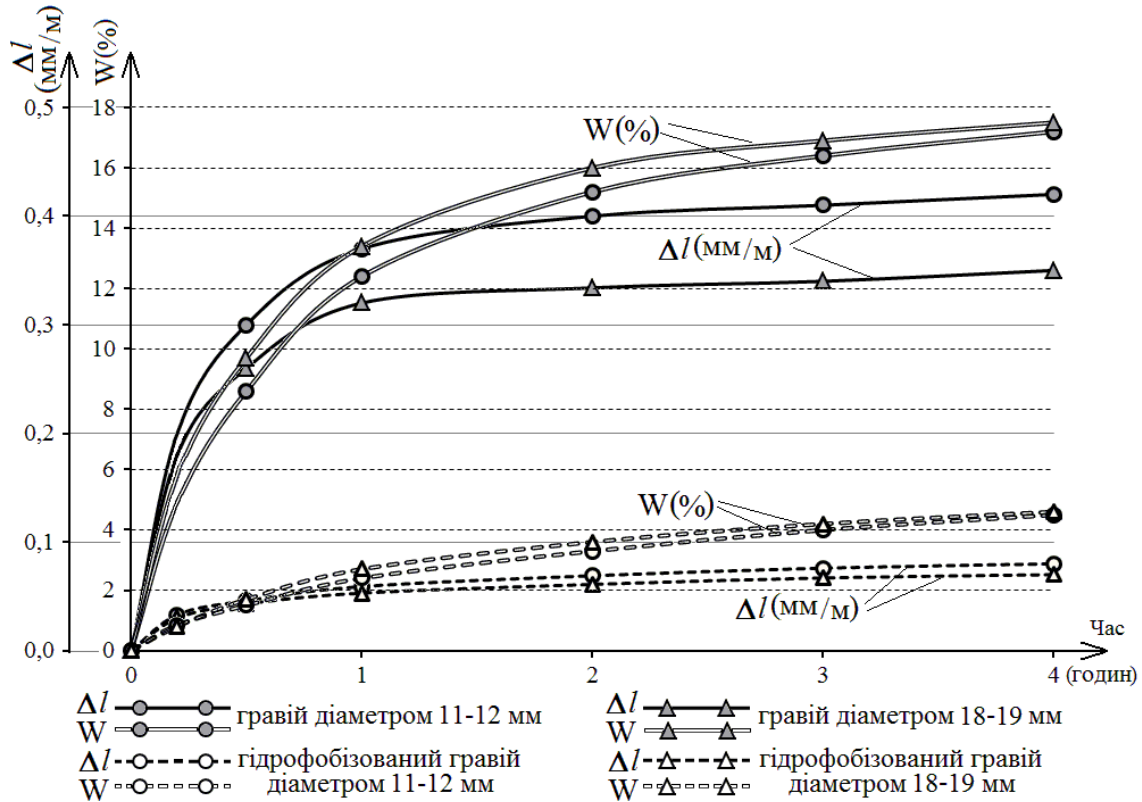


Рис.2. Набухання (Δl) і зміна вологості (W) керамзитового гравію за перші 4 години насичення водою

Аналіз діаграми показує, що набухання гравію з гідрофобізованою поверхнею при насиченні водою є в 4-5 разів меншим, ніж необробленого гравію. Ця різниця у величині та темпі вологісних деформацій обробленого і необробленого гравію пояснюється, в першу чергу, різним темпом їх водопоглинання. Так через годину експонування у воді вологість необробленого гравію є більш ніж в чотири рази вище, ніж гідрофобізованого. Через 4 години експонування зберігається майже 4-х кратна різниця у вологості гравію з обробкою і без. Тобто зниження вологісних деформацій гравію при його гідрофобній обробці пояснюється переважно зниженням його водопоглинання. Також встановлено, що усадка при висиханні керамзитового гравію з гідрофобізованою поверхнею практично дорівнює його набухання при насиченні водою і є у 2,2-2,4 рази меншою за усадку необробленого гравію. Аналогічні дані щодо зменшення вологісних деформацій пористого гравію були отримані при їх дослідженні у модельній системі цементно-піщаного розчину. Тобто гідрофобна обробка поверхні заповнювача дозволяє покращити якість його роботи у цементно-піщаній матриці завдяки зменшенню

деформацій контактної зони при зменшенні власних вологісних деформацій заповнювача.

При довготривалій дії води з одного боку конструкції часто виникає «рівноважна» ситуація, при якій волога візуально проникає лише на деяку глибину у бетон, після чого умовний «фронт» вологи візуально зупиняється. Фактично у даній ситуації виникає двофазна течія через бетон: спочатку у вигляді рідини, а потім у вигляді парів рідини, тобто на сухий бік проходить капілярне перенесення пару. Проте відомі методи визначення корозійної стійкості бетону не враховують данні особливості умов експлуатації однобічно обводнених гідротехнічних споруд і передбачають контакт агресивного середовища зі зразками з усіх боків. Здійснюється або витримання зразків у агресивній рідині або їх періодичне насичення з послідуєчим висиханням. Для забезпечення більшої точності визначення корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі води-середовища або іншої агресивної рідини в рамках третього етапу досліджень також був розроблений новий метод дослідження цього показника. Його суть полягає в створенні максимально наближених до реальної дії агресивної рідини умов. Витримка зразків здійснюється при однобічній дії рідини (води-середовища). Збудовано експериментальну установку, схему якої показано на рис.3. Метод є менш трудомістким в порівнянні з методикою визначення корозійної стійкості згідно ОСТ 5.9266-76 та, як показали проведені дослідження корозійної стійкості керамзитобетонів різних складів, дозволяє більш об'єктивно відображати зміну властивостей матеріалу в умовах, що є близькими до реальних умов експлуатації значної частини тонкостінних конструкції гідротехнічних споруд. Показник корозійної стійкості визначався порівнянням міцності зразків, які знаходилися під впливом води-середовища, з міцністю бетону контрольної партії, яка зберігалася у прісній воді.

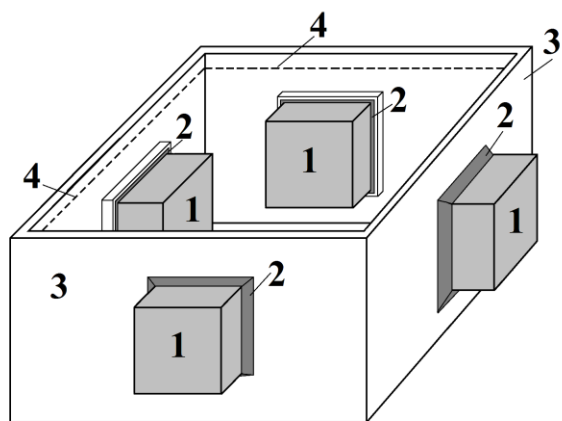


Рис.3. Загальна схема установки для дослідження корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі агресивної рідини: 1 – зразки-куби бетону; 2 – ущільнювач; 3 – стінки ємності; 4 – рівень агресивної рідини (води-середовища)

У **четвертому розділі** роботи представлені дослідження структури, властивостей та довговічності модифікованих керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд. З метою аналізу ефективності запропонованих технологічних методів управління сумісною роботою заповнювача і матриці в комплексі з рецептурними методами підвищення

довговічності легких бетонів в рамках *третього етапу* досліджень були проведені дві серії багатофакторних експериментів.

У першій серії за оптимальним планом був проведений 3-х факторний експеримент, у якому варіювалися наступні фактори складу керамзитобетону:

X_1 – кількість сульфатостійкого портландцементу, від 500 до 600 кг/м³;

X_2 – кількість мікрокремнезему, від 0 до 50 кг/м³;

X_3 – кількість добавки С-3, від 0.5 до 1.0% від маси цементу.

У другій серії за оптимальним планом був проведений 4-х факторний експеримент, у якому варіювалися такі фактори складу керамзитобетону:

X_1 – кількість сульфатостійкого портландцементу, від 500 до 600 кг/м³;

X_2 – кількість мікрокремнезему, від 0 до 40 кг/м³;

X_3 – вміст керамзитового гравію, від 650 до 700 л/м³;

X_4 – кількість поліпропіленової фібри Ваусон, від 0 до 1,2 кг/м³.

Приготування сумішей проводилося з використанням технологічної операції обробки керамзитового гравію цементною суспензією, що було обрано з врахуванням результатів попереднього етапу досліджень. Кількість кварцового піску в сумішах корегувалася в залежності від кількості інших компонентів, тобто у другій серії експериментів фактор X_3 фактично показував розсунення гранул крупного заповнювача. В якості крупного заповнювача використовувався керамзитовий гравій Одеського керамзитового заводу фракції 5-10 мм марки П150 з насипною густиною 600 кг/м³. В якості дрібного заповнювача використовувався митий кварцовий пісок з $M_{кр}=2,7$. З метою аналізу ефективності застосованого технологічного прийому обробки керамзиту цементною суспензією в початковій стадії перемішування суміші на даному етапі досліджень були виготовлені два «контрольних» склади бетону, які були ідентичними до відповідних складів другої серії експериментів, але готувалися без попередньої обробки керамзиту суспензією.

Всі легкобетонні суміші в обох серіях експериментів, а також «контрольні», мали рівну рухомість R_2 , що досягалося підбором кількості води, тобто В/Ц сумішей залежало від складу керамзитобетону. Встановлено, що при збільшенні кількості портландцементу і добавки суперпластифікатора В/Ц знижується, при введенні мікрокремнезему в кількості до 30 кг/м³ В/Ц суміші змінюється несуттєво, але подальше збільшення кількості мікрокремнезему викликає необхідність підвищення В/Ц для збереження рухомості суміші. Вміст гравію і кількість поліпропіленової фібри має обмежений вплив на В/Ц.

На рис.4 показані побудовані за відповідними експериментально-статистичними (ЕС) моделями діаграми, які відображають вплив варійованих факторів складу модифікованого керамзитобетону на його міцність при стиску (на рис.4.а – для першої серії експериментів, на рис.4.б – для другої). Міцність досліджених бетонів знаходилася у діапазоні від 31 до 44 МПа, що задовольняє вимогам, які висуваються для більшості тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих. У міру збільшення кількості портландцементу міцність керамзитобетону зростає, а кількість фібри практично не впливає на даний показник. При підвищенні кількості добавки

C-3 до 0,8-1% за рахунок зниження В/Ц суміші міцність при стиску досліджених легких бетонів підвищується на 2-2,5 МПа, аналогічний ефект досягається при введенні мікрокремнезему в кількості 30-35 кг/м³. За рахунок варіювання вмісту гравію в складі міцність бетону змінюється на величину до 1,5 МПа, а найбільш міцними є бетони з вмістом гравію 660-670 кг/м³, що відповідає меншому В/Ц суміші. Важливо зазначити, що міцність при стиску контрольних керамзитобетонів, приготованих без обробки пористого гравію цементною суспензією, була на 2-2,2 МПа менше міцності при стиску аналогічних за складом бетонів другої серії експериментів. Тобто технологічний прийом обробки гравію цементною суспензією підтвердив свою ефективність. Контроль міцності при стиску окремих зразків керамзитобетонів в водонасиченому стані показав, що їх коефіцієнт розм'якшення знаходився в межах 0,85-0,88, що забезпечує достатню водостійкість даних легких бетонів.

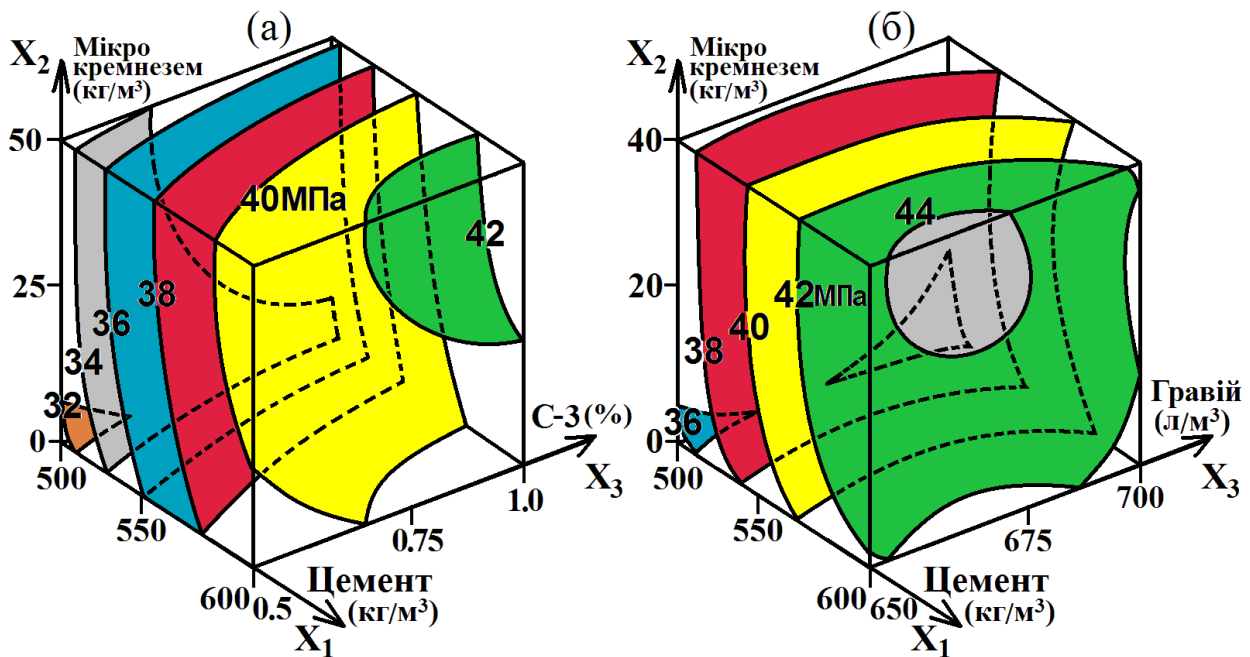


Рис.4. Вплив складу керамзитобетону на його міцність при стиску: а) перша серія експериментів, б) друга серія експериментів ($x_4=0$)

Тонкостінні конструкції гідротехнічних споруд під час експлуатації піддаються різноспрямованим навантаженням, відповідно важливим для них показником якості є міцність бетону на розтяг. Встановлено, що міцність на розтяг при згині досліджених на даному етапі керамзитобетонів знаходиться в діапазоні 5,5-7 МПа. Загальний характер впливу кількості цементу, мікрокремнезему та суперпластифікатору на міцність на розтяг при згині легких бетонів є аналогічним з їх впливом на величину міцності при стиску. За рахунок дисперсного армування міцність на розтяг керамзитобетонів зростає на 0,4-0,5 МПа. Слід зазначити, що бетони на пористих заповнювачах відрізняються від важких бетонів відчутно більшою міцністю на розтяг при згині за умови відносно близьких величин міцності при стиску. І це є ще одним чинником, що забезпечують ефективність легких бетонів саме для тонкостінних конструкцій.

Як зазначалося вище, водонепроникність (W) є одним з основних показників якості для бетонів тонкостінних конструкцій, які експлуатуються у підводному положенні або при контакті з водою. На рис.5 показані побудовані за відповідними ЕС-моделями діаграми, які відображають вплив факторів складу модифікованого керамзитобетону на його водонепроникність (на рис.5.а – для першої серії експериментів, на рис.5.б – для другої).

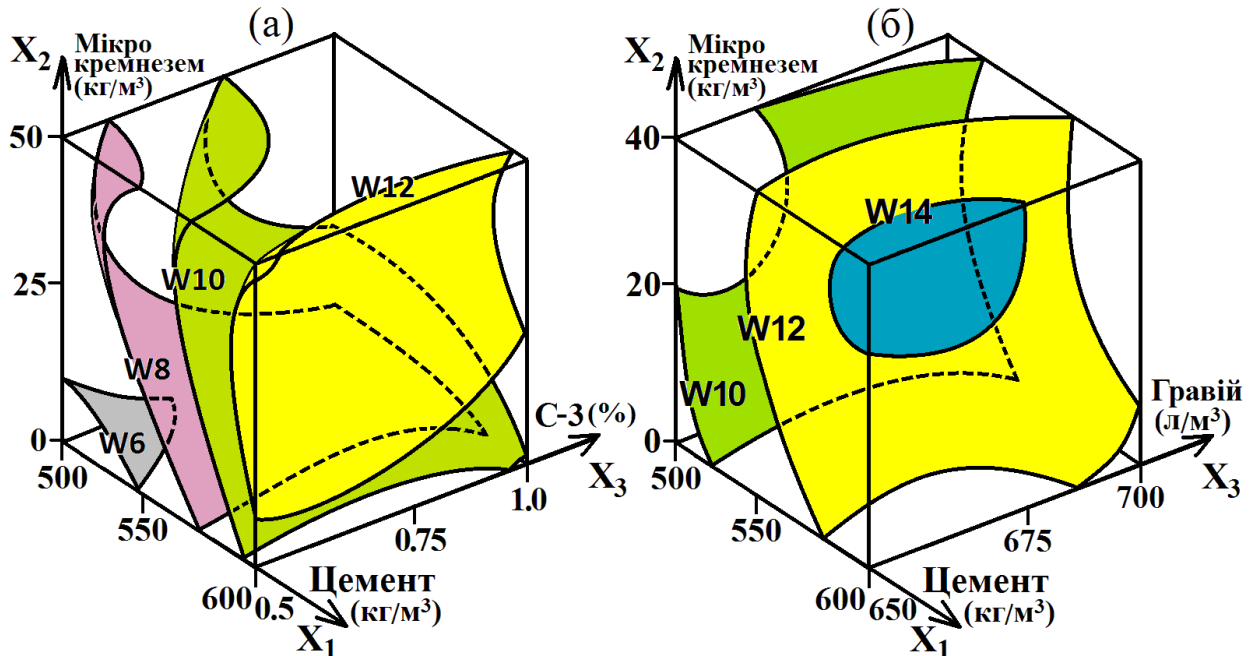


Рис.5. Вплив складу керамзитобетону на його водонепроникність: а) перша серія експериментів, б) друга серія експериментів ($x_4=0$)

Найбільш суттєво на рівень W керамзитобетонів впливає кількість портландцементу – при підвищенні кількості в'язучого до 600 кг/м^3 водонепроникність матеріалу зростає на величину до двох марок. За рахунок введення у склад керамзитобетону $30\text{-}35 \text{ кг/м}^3$ мікрокремнезему водонепроникність матеріалу підвищується в середньому на одну марку. При збільшенні кількості суперпластифікатора С-3 до $0,8\text{-}0,9\%$ за рахунок зниження В/Ц рівень W підвищується приблизно на одну марку. Вміст керамзитового гравію впливає на рівень W несуттєво, при цьому максимальна водонепроникність композиту спостерігається при кількості гравію $660\text{-}670 \text{ л/м}^3$. Введення дисперсної арматури в склад бетону не позначається на його водонепроникності. Контрольні склади керамзитобетонів, приготовані без обробки пористого гравію цементною суспензією, мали водонепроникність або на рівні або на одну марку нижче водонепроникності бетонів аналогічних складів другої серії експерименту, що в цілому підтверджує ефективність застосованого технологічного прийому.

Також в рамках даного етапу досліджень була проаналізована морозостійкість керамзитобетонів обох експериментальних серій. Діаграма, яка побудована за відповідною ЕС-моделлю, та яка відображає вплив варійованих в першій серії експериментів факторів складу модифікованого керамзитобетону на його морозостійкість показана на рис.6.

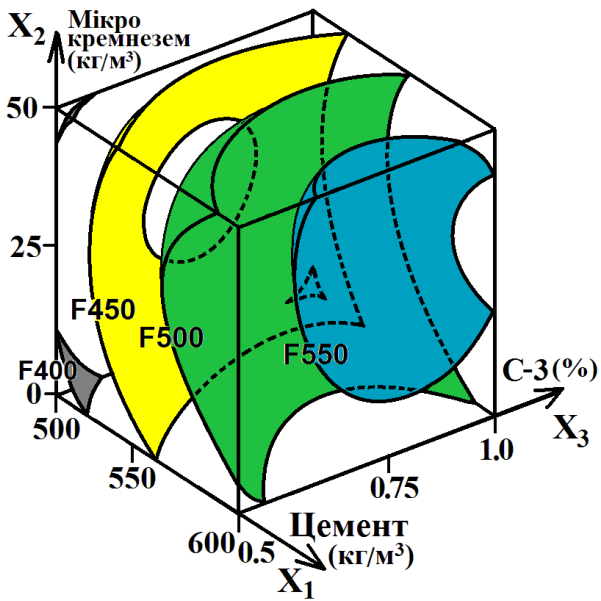


Рис.6. Вплив варійованих в першій серії експериментів факторів складу модифікованого керамзитобетону на його морозостійкість

Аналіз діаграми показує, що на морозостійкість керамзитобетонів відчутно впливає кількість портландцементу. При введенні мікрокремнезему в кількості 30-35 $\text{кг}/\text{м}^3$ морозостійкість підвищується приблизно на 50 циклів, подальше підвищення кількості мікрокремнезему неефективно. За рахунок зниження В/Ц на 50 циклів зростає морозостійкість досліджених керамзитобетонів при підвищенні дозування добавки С-3 до 0,8-0,9% від маси цементу.

На рис.7 показана побудована за відповідною ЕС-моделлю діаграма типу «квадрати на квадраті», яка відображає вплив варійованих в другій серії експериментів факторів складу модифікованого керамзитобетону на його морозостійкість.

Як видно з діаграми, вплив кількості портландцементу та мікрокремнезему на морозостійкість керамзитобетонів, які досліджувалися в другій серії експериментів, в цілому є аналогічним з їх впливом на даний показник якості в першій серії експерименту. В межах факторного простору експерименту вміст гравію оказує обмежений вплив на рівень морозостійкості легкого бетону. За рахунок застосування фібри в кількості 0,8-1,2 $\text{кг}/\text{м}^3$ морозостійкість легких бетонів підвищується на 50 циклів.

Таким чином, досягнутий рівень водонепроникності і морозостійкості досліджених модифікованих керамзитобетонів при використанні раціональної кількості модифікаторів і фібри, а також при застосуванні технологічного прийому обробки пористого гравію цементною суспензією як методу покращення сумісної роботи заповнювача і матриці, дозволяє забезпечити необхідну довговічність легкого бетону в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд в типових для них умовах експлуатації. Це, зокрема, дозволяє використовувати дані керамзитобетони в якості суднобудівних.

Як зазначалося вище, однією з основних причин застосування легких бетонів в гідротехнічному будівництві є зниження ваги залізобетонних конструкцій. Найбільш важливою і актуальною ця задача є для плавучих залізобетонних споруд. Середня густина модифікованих керамзитобетонів визначалася в різних умовах експлуатації: в сухому стані, при рівноважній

вологості (у повітряно-сухому стані) та у водонасиченому стані. Встановлено, що в сухому стані середня густина легких бетонів варіювалася в діапазоні 1650-1760 кг/м³, при рівноважній вологості – від 1710 до 1810 кг/м³, в водонасиченому стані – від 1780 до 1870 кг/м³. Тобто в цілому середня густина досліджених керамзитобетонів є на 500..600 кг/м³ меншою в порівнянні з середньою густиною важких бетонів, що дозволяє за рахунок їх використання покращити ефективність тонкостінних конструкцій, зокрема підвищити вантажопідйомність плавучих залізобетонних споруд. При цьому середня густина керамзитобетонів у повітряно-сухому стані задовольняє вимогам галузевих стандартів на суднобудівний бетон.

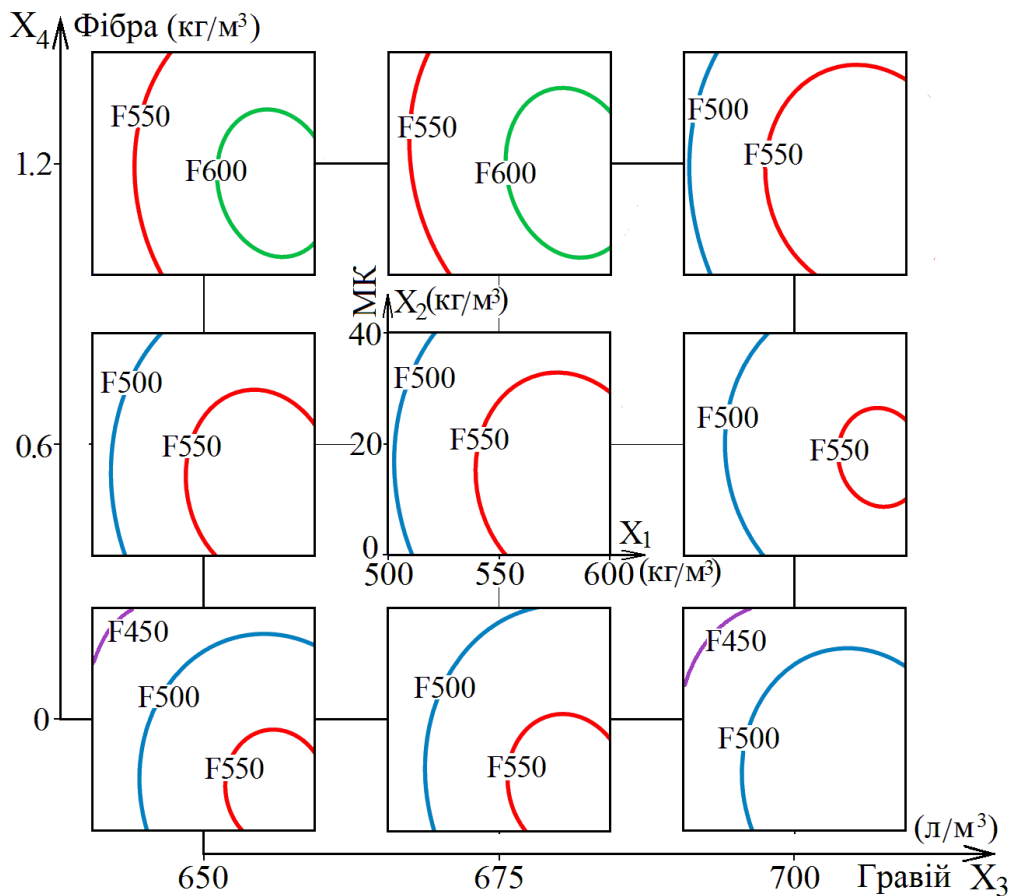


Рис.7. Вплив варійованих в другій серії експериментів факторів складу модифікованого керамзитобетону на його морозостійкість

Проведений мікроскопічний аналіз структури легких бетонів показав наявність видимої кольматації пор і тріщин в зовнішній оболонці обробленого цементною суспензією заповнювача і контактної зони, чим підтвердив ефективність технологічного прийому обробки заповнювача і використаних рецептурних методів, спрямованих на підвищення довговічності матеріалу, зокрема за рахунок покращення сумісної роботи заповнювача і матриці. В керамзиті, якій знаходиться в бетоні, приготованому з використанням попередньої обробки гравію, переважна частка пор на глибині до 1,2-1,6 мм є закольматованими. Рентгенофазовий аналіз підтвердив вплив мікрокремнезему

на процесі гідратації портландцементу в досліджених модифікованих легких бетонах.

На *четвертому етапі* роботи досліджувалися властивості, довговічність та кольорова гама декоративних легких керамзитобетонів, які можуть бути використаними в якості суднобудівних. Для зміни кольорової гами застосовувалися неорганічні залізоокисні синтетичні пігменти: червоний пігмент з основною речовиною Fe_2O_3 , жовтий пігмент з основною речовиною $FeO(OH)$. Дослідження проводилися на двох паралельних серіях зразків. Перша серія виготовлялася за традиційною технологією, друга – із застосуванням технологічного прийому обробки пористого гравію цементною суспензією. У суспензію, яка використовувалася для насичення гравію, пігмент не вводився. Залізоокисні пігменти розміщувалися завчасно в сухому стані з часткою цементу, яка вводилася після обробки гравію. У кожній серії виготовлялося по п'ять партій зразків з різними видами та кількістю пігменту (кількість портландцементу – 500 кг/м^3 , керамзитового гравію – 670 л/м^3 , добавки С-3 – $0,8\%$ від маси цементу). Один склад у кожній серії був контрольним, тобто без пігменту. Два склади бетону включали червоний пігмент, ще два – жовтий пігмент, відповідно по 10 і 20 кг/м^3 . Встановлено, що міцність, водонепроникність і морозостійкість декоративних керамзитобетонів з залізоокисними пігментами практично не відрізняється від даних показників якості контрольних бетонів. За рахунок технологічного прийому обробки гравію цементною суспензією покращується насиченість кольору декоративних бетонів, яка аналізувалася за цифровими фото, зростає міцність та водонепроникність бетону. Тобто модифіковані декоративні конструкційні керамзитобетони, приготовані з використанням технологічного прийому обробки пористого заповнювача, мають високу довговічність, стійкість кольорової гами та можуть бути використані в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд, для яких існує потреба придання певного кольору для отримання необхідної архітектурної виразності. Наприклад у таких плавучих спорудах, як готелі, дома, ресторани тощо.

П'ятий розділ роботи відображає результати *n'ятого етапу* досліджень та присвячено структурі та властивостям модифікованих кольматуючою і пластифікуючою добавками суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів, зокрема на гідрофобізованому гравії.

До суднобудівних бетонів висуваються найбільш високі вимоги щодо довговічності в жорстких умовах експлуатації, при цьому для ряду конструкцій плавучих споруд окремою вимогою є забезпечення мінімально можливої вологості бетону їх «сухого» боку. Це важливо з точки зору безпеки споруди, режиму роботи обладнання і комфортності перебування персоналу. Бетони, аналогічні суднобудівним, можуть бути використані не лише для конструкцій залізобетонних плавучих споруд, а і для інших тонкостінних густоармованих конструкцій гідротехнічних споруд, до матеріалу яких висуваються високі вимоги щодо міцності, довговічності та середньої густини.

Дослідження властивостей суднобудівних керамзитобетонів і фібро-керамзитобетонів проводилися з використанням методів планування експерименту. Був проведений 5-ти факторний експеримент, у якому варіювалися такі фактори складу:

X_1 – кількість сульфатостійкого портландцементу, від 400 до 600 кг/м³.

X_2 – концентрація кремнійорганічної рідини 136-157М (колишня ГКР-94М) в емульсії при гідрофобній обробці поверхні гравію, від 0 до 1,6%. Для приготування емульсії необхідної концентрації спочатку готувалася 50% водна емульсія кремнійорганічної рідини. На основі даної 50% емульсії безпосередньо перед обробкою гравію готувався водний розчин (емульсія) кремнійорганічної рідини необхідної концентрації – 0,8 або 1,6%. Обробка керамзитового гравію проводилася методом короткочасного занурення в емульсію з послідуною сушкою на повітрі до досягнення рівноважної вологості, що займало 4..5 діб. При цьому на поверхні гравію утворювалася гідрофобна плівка кремнійорганічного полімеру.

X_3 – кількість кольматуючої добавки Пенетрон Admix (Пенетрон А), від 0 до 2% від маси цементу.

X_4 – кількість суперпластифікатору С-3, від 0,5 до 0,9% від маси цементу.

X_5 – кількість поліпропіленової фібри Ваусон, від 0 до 1,2 кг/м³.

Бетонні суміші на даному етапі досліджень мали однакову рухомість ОК = 3..4 см, що досягалося підбором кількості води, відповідно їх В/Ц залежало від складу бетону. Встановлено, що гідрофобізація поверхні гравію на 15-30% знижує В/Ц бетонної суміші, при збільшенні кількості С-3 від 0,5 до 0,8% В/Ц знижується на 7-10%. Кількість добавки Пенетрон А несуттєво впливає на В/Ц, а застосування дисперсного армування на 4-5% підвищує В/Ц легкобетонної суміші.

Для досліджених модифікованих керамзитобетонів визначалася міцність при стиску і на розтяг при згині у повітряно-сухих умовах, а також у водонасиченому стані. Аналіз отриманих даних показав, що кількість добавки Пенетрон А і поліпропіленової фібри несуттєво впливає на міцність при стиску суднобудівних керамзитобетонів. За відповідними ЕС-моделями були побудовані діаграми (рис.8), які відображають вплив кількості портландцементу, суперпластифікатору С-3 і концентрації кремнійорганічної рідини при обробці гравію на міцність при стиску досліджених легких бетонів.

Як видно з діаграм, найбільшу міцність як при рівноважній вологості, так і у водонасиченому стані мають склади, в які введено 0,8% суперпластифікатору С-3. Гідрофобізація поверхні пористого гравію кремнійорганічною рідиною при її раціональній концентрації в емульсії підвищує міцність керамзитобетону. Для бетонів з кількістю цементу 400..450 кг/м³ найбільш ефективною є обробка заповнювача емульсією кремнійорганічної рідини з концентрацією 0,7-0,8%, для бетонів з кількістю цементу більше 500 кг/м³ ефективніше застосування емульсії з меншою концентрацією – 0,5..0,7%. За рахунок обробки заповнювача міцність при стиску легких бетонів у повітряно-сухому стані підвищується на 10-11%, у водонасиченому стані – на 12-14%. Збільшення концентрації

кремнійорганічної рідини понад 0,8% не підвищує міцність композиту, що переважно пов'язано з погіршенням зчеплення заповнювача з цементно-піщаною матрицею. Тобто обробка пористого гравію при досягненні певного «балансу» гідрофобних і адсорбційних властивостей заповнювача покращує міцність при стиску керамзитобетону. В першу чергу це відбувається завдяки зниженню В/Ц суміші, в другу – за рахунок покращення сумісної роботи заповнювача і матриці, що досягається зниженням набухання і усадки пористого заповнювача в процесі твердіння суміші, а також встановленням раціонального співвідношення між когезією матричного матеріалу і його адгезією до заповнювача.

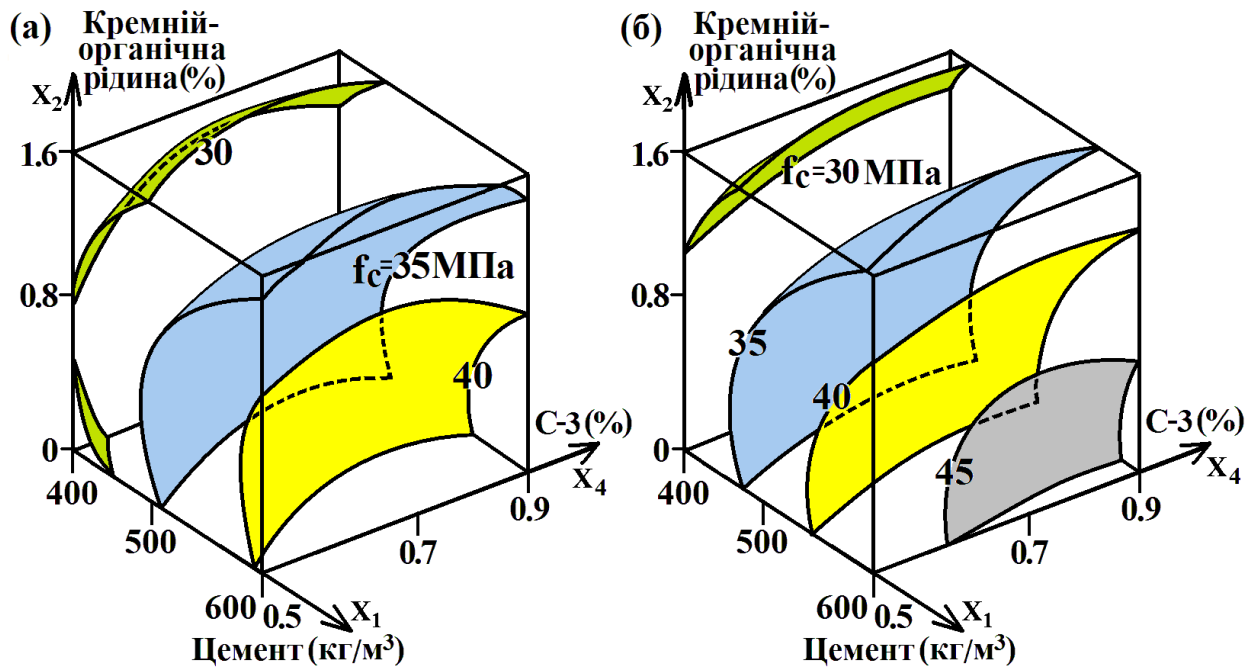


Рис.8. Вплив кількості портландцементу, суперпластифікатору С-3 і концентрації кремнійорганічної рідини при обробці гравію на міцність при стиску суднобудівних керамзитобетонів: а) в водонасиченому стані, б) при рівноважній вологості ($x_3 = x_5 = 0$)

При експлуатації керамзитобетону у водонасиченому стані також важливим стає фактор розм'якшення самого пористого заповнювача. Застосування гідрофобної обробки дозволяє знизити вплив води на міцність зерен керамзиту, відповідно ефективність даного прийому при експлуатації конструкцій у вологих умовах зростає. Для підтвердження цього в усіх 27-ми експериментальних точках був розрахований коефіцієнт розм'якшення легкого бетону. Встановлено, що досліджені керамзитобетони і фіброкерамзитобетони мають достатню водостійкість – їх коефіцієнт розм'якшення при кількості портландцементу більше 500 кг/м^3 становить не менше 0,86, а в разі застосування гідрофобної обробки гравію – не менше 0,89.

Проведений на даному етапі аналіз міцності досліджених легких бетонів на розтяг при згині показав, що у водонасиченому стані даний показник якості змінюється в діапазоні від 4,8 до 6,1 МПа, а при рівноважній вологості – від 5,2 до 7,2 МПа. Зміна кількості С-3 і введення добавки Пенетрон А несуттєво

впливає на величину f_{ctk} . За рахунок дисперсного армування фіброю міцність на розтяг керамзитобетонів підвищується на 0,5-0,7 МПа, тобто на 10-14%. Обробка поверхні гравію емульсією кремнійорганічної рідини при концентрації 0,7-0,8% несуттєво, на 0,3-0,4 МПа підвищує міцність керамзитобетону на розтяг при згині у водонасиченому стані та практично не впливає на даний показник якості у повітряно-сухих умовах. При використанні для обробки гравію емульсії більшої концентрації рівень f_{ctk} досліджених бетонів знижується. Пояснення цьому можна дати з врахуванням всіх ефектів взаємодії цементної матриці та пористого заповнювача. Як зазначалося вище, з одного боку, за рахунок гідрофобізації поверхні керамзиту відбувається зниження В/Ц суміші та зменшення величини об'ємних вологістних деформації заповнювача в результаті чого зменшуються деформації цементно-піщаної матриці при твердінні, зокрема контактної зони. З іншого боку – зчеплення заповнювача з розчинною матрицею погіршується. При цьому природно на властивості легкого бетону впливає міцність самого пористого заповнювача, відповідно гідрофобізація поверхні гравію є більш ефективною для керамзитобетонів, які експлуатуються у вологих умовах. В цілому при дозуванні цементу від 500 кг/м³ досягнутий рівень міцності модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів відповідає вимогам галузевих стандартів до суднобудівних бетонів, що дозволяє використовувати ці матеріали у тонкостінних конструкціях плавучих та інших гідротехнічних споруд.

Для досліджених на даному етапі суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів були проаналізовані їх водонепроникність і морозостійкість як основні показники якості, що забезпечують довговічність матеріалу в типових умовах експлуатації. Побудовані за відповідними ЕС-моделями діаграми типу «квадрати-на квадраті», які відображають вплив варійованих на даному етапі досліджень факторів на водонепроникність і морозостійкість суднобудівних керамзитобетонів показана на рис.9.а і рис.9.б відповідно (не відображені при побудові діаграм фактори зафіксовані на середньому рівні). Аналіз діаграм показує, що збільшення кількості портландцементу істотно підвищує водонепроникність керамзитобетону. Бетони з максимальною кількістю в'язучого мають в середньому на дві марки вищий рівень W, ніж склади з мінімальною кількістю цементу. За рахунок введення 2% добавки Пенетрон А водонепроникність досліджених керамзитобетонів підвищується в середньому на одну марку. Хімічні компоненти цієї кольматуючої добавки вступають в реакцію з іонними комплексами кальцію і алюмінію в'язучого, оксидами і солями інших металів. В результаті цих реакцій утворюються нерозчинні кристалогідрати, що заповнюють мережу пор, капілярів і тріщин в бетоні, завдяки чому матеріал краще опирається проникненню води. Гідрофобізація поверхні гравію покращує капілярно-пористу структуру і підвищує водонепроникність керамзитобетону не менш, ніж на одну марку за рахунок зниження В/Ц суміші, зменшення вологістних деформацій заповнювача і матриці в процесі

структурування, а також надання заповнювачу певних водовідштовхувальних властивостей.

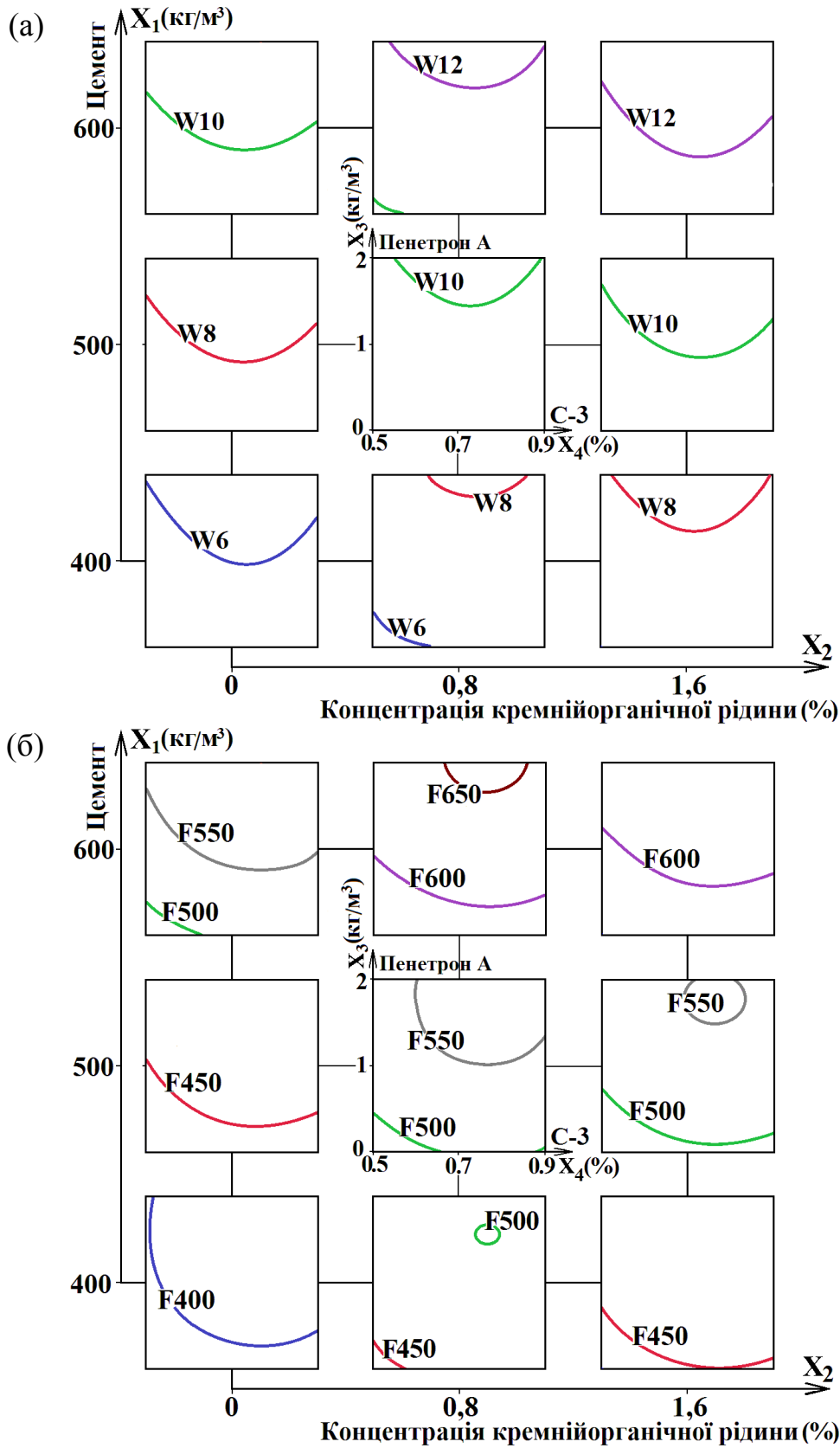


Рис.9. Вплив варійованих факторів складу на водонепроникність (а) і морозостійкість (б) модифікованих суднобудівних керамзитобетонів

Бетони з кількістю портландцементу 500 кг/м^3 при застосуванні обробки пористого гравію гідрофобизатором з концентрацією $0,7-0,8\%$ показують водонепроникність не нижче W8, при кількості в'язучого 600 кг/м^3 – не нижче W10. Збільшення концентрації гідрофобизатора в емульсії понад $0,8\%$ вже практично не змінює водонепроникність легкого бетону. Дисперсне армування несуттєво впливає на рівень W досліджених легких бетонів. У всьому факторному просторі експерименту максимальна водонепроникність досягаються при кількості добавки С-3 близько $0,7-0,8\%$. Це пояснюється тим, що така кількість добавки забезпечує мінімізацію В/Ц бетонної суміші.

На величину морозостійкості досліджених суднобудівних керамзитобетонів в рамках факторного простору експерименту суттєвий вплив оказує кількість портландцементу. Незалежно від рівня інших факторів, найбільшу морозостійкість показують керамзитобетони з кількістю суперпластифікатора С-3 $0,7-0,8\%$ від маси цементу. При використанні дисперсного армування морозостійкість керамзитобетонів зростає на 50 і більше циклів. При цьому застосування фібри є ефективнішим для більш міцних бетонів, що пояснюється кращим защемленням волокон матрицею матеріалу. За рахунок гідрофобізації поверхні пористого заповнювача морозостійкість керамзитобетонів підвищується на 50..100 циклів. При цьому концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії нелінійно впливає на морозостійкість. Рівень показника F найбільш інтенсивно змінюється при підвищенні концентрації модифікатора до $0,7-0,8\%$. Подальше збільшення концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії вже не впливає на морозостійкість. З врахуванням впливу гідрофобної обробки поверхні гравію на показники міцності та водонепроникності досліджених керамзитобетонів концентрацію кремнійорганічної рідини в емульсії рекомендується обмежити рівнем $0,7-0,8\%$.

Таким чином, модифіковані керамзитобетони і фіброкерамзитобетони при кількості портландцементу від 500 кг/м^3 , застосуванні 2% добавки Пенетрон А в комплексі з $0,7-0,8\%$ добавки С-3 (як рецептурних методів підвищення довговічності), а також при використанні методу обробки поверхні пористого гравію емульсією кремнійорганічної рідини раціональної концентрації відповідають вимогам Морського реєстру до матеріалів конструкцій плавучих залізобетонних споруд та можуть використовуватися в тонкостінних гідротехнічних спорудах, зокрема плавучих. Досягнуті рівні водонепроникності та морозостійкості модифікованих керамзитобетонів дозволяють забезпечувати високу довговічність даних матеріалів в умовах напірної дії води, та/або морозних і агресивних впливів різного типу.

Середня густина досліджених легких бетонів в сухому стані становила від 1630 до 1750 кг/м^3 , при рівноважній вологості – від 1680 до 1790 кг/м^3 , у водонасиченому стані – від 1750 до 1860 кг/м^3 , що відповідає вимогам галузевих стандартів. За рахунок застосування добавки Пенетрон А і гідрофобної обробки поверхні пористого гравію кремнійорганічною рідиною рівень вологості матеріалу, що експлуатується при постійному контакті з водою, знижується на $4-5\%$ за об'ємом, тобто приблизно на третину в

порівнянні з керамзитобетонами без даних модифікаторів. За рахунок гідрофобізації поверхні гравію теплопровідність легкого бетону знижується на 0,09-0,10 Вт/(м×К), а середня густина у вологому стані – на 30..40 кг/м³, що пояснюється зниженням капілярної пористості композиту та здатністю плівки гідрофобізатора перешкоджати проникненню вологи у пори гравію. Розроблені модифіковані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони за рахунок своєї низької теплопровідності в порівнянні з важкими бетонами, а також низької експлуатаційної вологості збільшують комфортність перебування людей в приміщеннях плавучої залізобетонної споруди, а також поліпшують умови для роботи технологічного обладнання. При цьому найбільший вплив на експлуатаційну вологість і теплопровідність легкого бетону оказує гідрофобна обробка поверхні пористого гравію.

Результати електронної мікроскопії підтвердили ефективність застосування гідрофобної обробки поверхні пористого заповнювача в поєднанні з рецептурними методами управління структурою матеріалу. Цементно-піщана матриця в контактній зоні легких бетонів на гідрофобізованому заповнювачі має щільну структуру з низькою кількістю пор. Волокна фібри добре розподілені в матеріалі, а пори в розчинній частині мають переважно незначні розміри. За рахунок гідрофобної обробки поверхні пористого гравію емульсією кремнійорганічної рідини відчутно знижується коефіцієнт технологічної пошкодженості композиту. Тобто модифіковані легкі бетони характеризуються структурою, яка забезпечує їх підвищену довговічність в характерних для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд умовах експлуатації.

У **шостому розділі** роботи у рамках *шостого етапу* досліджень проаналізовані властивості і довговічність бетонів на різних типах пористих заповнювачів, а також наведені дані про практичну реалізацію результатів досліджень.

Досліджувалися властивості модифікованих бетонів на вапняковому щебені з міцних перекристалізованих порід вапняку та вплив обробки даного пористого заповнювача цементною суспензією. В планованих експериментах варіювалася кількість мікрокремнезему (від 0 до 40 кг/м³) і добавки С-3 (від 0,5 до 1,0% від маси цементу). Виконувались дві паралельних серії експериментів, в яких готувалися бетони однакових складів за різними технологіями змішування суміші: за традиційною технологією та з попередньою обробкою пористого вапнякового щебеню цементною суспензією у початковій стадії перемішування суміші. Встановлено, що за рахунок обробки вапнякового щебеню цементною суспензією міцність бетону при стиску підвищується на 4-5 МПа, а водонепроникність приблизно на одну марку. При цьому обробка практично не впливає на міцність на розтяг при згині та морозостійкість бетону на вапняковому щебені. При використанні суперпластифікатора і мікрокремнезему як рецептурних методів управління структурою міцність бетонів при стиску підвищується на 16-18 МПа, міцність на розтяг при згині – на 1-1,5 МПа. Комплексна модифікація підвищує водонепроникність бетонів на

пористому вапняковому щебені на три марки та на 100 і більше циклів підвищує їх морозостійкість. Досягнутий за рахунок модифікації і обробки заповнювача рівень водонепроникності (W12) і морозостійкості (F400) бетонів на вапняковому щебені забезпечує достатню довговічність даного матеріалу і дає змогу використовувати подібні матеріали у ряді конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема в підпірних стінках та лицюванні каналів.

На даному етапі також досліджувалися властивості керамзитобетонів з різними типами дрібних пористих заповнювачів, зокрема з гранульованим піносклом. В дослідженнях було порівняно міцність, довговічність і середню густину модифікованих керамзитобетонів з різними типами пісків: кварцовим, керамзитовим і піском з гранульованого піноскла. Це дозволило оцінити можливість і доцільність застосування конструкційних керамзитобетонів на легких пісках у якості суднобудівних матеріалів. В дослідженнях використовувався керамзитовий гравій фракції 5-10 мм, в якості дрібного заповнювача застосовувалися п'ять різних типів пісків, отриманих за рахунок змішування окремих фракцій різних пісків:

- кварцовий пісок з модулем крупності 3,1, насипною густиною 1580 кг/м³;
- пісок, в якому 50% об'єму крупних фракцій (1,25-2,5 мм і 2,5-5 мм) було замінено керамзитовим піском відповідних фракцій. Насипна густина піску складала 1430 кг/м³ ;
- пісок, в якому 100% об'єму крупних фракцій було замінено керамзитовим піском. Насипна густина піску складала 1290 кг/м³;
- пісок, в якому 50% об'єму крупних фракцій було замінено гранульованим піносклом відповідних фракцій (піноскло НВП «Технологія», м. Шостка). Насипна густина піску складала 1330 кг/м³;
- пісок, в якому 100% об'єму крупних фракцій було замінено гранульованим піносклом. Насипна густина піску складала 1080 кг/м³.

Іншим фактором, який варіювався у дослідженнях, була кількість полікарбосилатного пластифікатору Coral ExpertSuid-5 – від 0,4 до 1% від маси цементу. Кількість портландцементу у всіх досліджених легких бетонах складала 500 кг/м³, кількість керамзитового гравію – 675 л/м³. Всі суміші мали рівну високу рухомість П5, яка забезпечувалася застосуванням ефективного пластифікатору полікарбосилатного типу, а також зміною кількості води. Відповідно В/Ц сумішей залежало від їхнього складу. При збільшенні кількості суперпластифікатору з 0,4 до 0,6% В/Ц легкобетонних сумішей на всіх типах пісків знижувалось на 11...13%. При збільшенні дозування добавки до 0,8% В/Ц знижувалась ще на 2..3%, подальше підвищення кількості пластифікатору було вже не ефективно. Незалежно від кількості пластифікатору найменше В/Ц мають керамзитобетонні суміші на кварцовому піску, а найбільше – на суміші кварцового і керамзитового пісків. Легкобетонні суміші з дрібним заповнювачем з суміші кварцового піску і піноскла мають дещо вище В/Ц в порівнянні з керамзитобетонними сумішами на кварцовому піску, але нижче в порівнянні з сумішами на керамзитовому піску. Це пояснюється тим, що гранульоване піноскло має відносно низьке водопоглинання.

Кількість пластифікатору Coral ExpertSuid суттєво впливає на міцність керамзитобетону при стиску завдяки зниженню В/Ц суміші, але на міцність легкого бетону на розтяг при згині кількість даного модифікатору впливає значно менше. Найбільш міцними (22-28 МПа) є керамзитобетони з кількістю суперпластифікатору Coral ExpertSuid 0,8% від маси цементу. Тип піску, який використовувався у керамзитобетоні, більш відчутно впливав на величину міцності при стику, ніж на міцність на розтяг при згині. Склади з 50% та 100% керамзитового піску в крупних фракціях показують міцність при стику відповідно на 3-7% та 7-10% нижчу за міцність керамзитобетонів на кварцовому піску. При застосуванні 50% та 100% гранульованого піноскла в піску міцність керамзитобетону при стиску знижується відповідно на 17-23% (18,6-21,5 МПа) та 23-32% (17,5-19,2 МПа) в порівнянні з бетонами на кварцовому піску. Міцність керамзитобетону на розтяг при згині при застосуванні керамзитового піску в крупних фракціях дрібного заповнювача становить від 4,9 до 5,3 МПа, а при застосуванні піску з гранульованого піноскла від 4,3 до 5,2 МПа. Тобто керамзитобетони при застосуванні легких пористих пісків мають високу міцність на розтяг при згині, що є важливим для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих.

Також були досліджені морозостійкість і водонепроникність керамзитобетонів на різних типах пісків, як основні показники якості, що забезпечують довговічність даних матеріалів. Встановлено, що керамзитобетони, які включають піноскло в крупних фракціях піску, мають водонепроникність на рівні керамзитобетонів на кварцовому піску (W8-W12). За рахунок підвищення дозування добавки Coral ExpertSuid до 0,6-1,0% водонепроникність досліджених легких бетонів підвищується в середньому на марку. За рахунок введення до складу керамзитобетонів пористого піску у кількості 50% від об'єму крупних фракцій морозостійкість матеріалу підвищується на 50 циклів. При застосуванні 100% піноскла або керамзитових зерен в крупних фракціях піску морозостійкість легких бетонів знаходиться на рівні морозостійкості керамзитобетонів на кварцовому піску (F450-F500). Незалежно від виду піску найбільшу морозостійкість мають бетони при кількості суперпластифікатору Coral ExpertSuid-5 0,8% від маси цементу.

Середня густина керамзитобетону з керамзитовим піском в крупних фракціях не перевищує 1572 кг/м^3 , а з піском з гранульованого піноскла – 1440 кг/м^3 . Тобто при значно меншій середній густині в порівнянні з керамзитобетонами на кварцовому піску бетони з пористим піском мають достатньо високу довговічність. Це дозволяє використовувати дані матеріали в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд, для яких важливо зниження ваги, зокрема у залізобетонному суднобудуванні.

На даному етапі роботи також проводилися дослідження, в яких було виконане порівняння властивостей дрібнозернистих бетонів і фібробетонів на кварцовому і керамзитовому піску. Дрібнозернисті бетони використовуються при ремонті залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема для

поновлення захисного шару арматури, для закладення швів між конструкціями тощо. При цьому частіше всього для таких задач застосовуються дрібнозернисті бетони на кварцовому піску, але для конструкцій з легкого бетону бажано використовувати більш близькі за властивостями матеріали.

Встановлено, що за рахунок введення до складу дрібнозернистого бетону частки керамзитового піску з раціональним розміром зерен підвищується морозостійкість, ударостійкість і тріщиностійкість композиту, а також знижується середня густина бетону та водовідділення бетонної суміші. Дрібнозернисті бетони на суміші кварцового і керамзитового піску, зокрема дисперсно-армовані, можуть бути використані при ремонті та відновленні залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд з легких бетонів.

На заключному *сьомому етапі* досліджень було проведено впровадження отриманих результатів та розробка нормативних документів. Зокрема з використанням комплексу експериментально-статистичних моделей та методу Монте-Карло здійснено вибір оптимальних складів керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд, а також складів суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів на гідрофобізованому гравії для залізобетонних плавучих споруд. Рекомендовані склади забезпечують підвищену міцність та довговічність легкого бетону, поліпшені експлуатаційні властивості у вологих умовах експлуатації, а також задовольняють вимогам Морського реєстру.

З врахуванням вимог Реєстру судноплавства України, «Правил будівництва корпусів суден і плавучих споруд із застосуванням залізобетону» і діючих галузевих стандартів розроблена технологія виготовлення модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів, яка використовує створені в рамках даної роботи технологічні і рецептурні методи підвищення довговічності легких бетонів. Розроблено та затверджено на Херсонському державному заводі «Паллада» «Технологічний регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків». При розробці даної технології враховувався накопичений у співпраці багаторічний досвід спеціалістів Херсонського державного заводу «Паллада» та Одеської державної академії будівництва та архітектури.

В рамках даної роботи був розроблений та знаходиться на стадії погодження проект Державного стандарту України «Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування», який складається з двох частин: Бетон суднобудівний важкий і Бетон суднобудівний легкий. Необхідність розробки стандарту була обумовлена відсутністю в Україні національного нормативного документу, що встановлює та узагальнює технічні вимоги до суднобудівного бетону, який укладається в конструкції корпусів суден і плавзасобів та технології його приготування. Даний Державний стандарт України має замінити декілька діючих на сьогодні галузевих стандартів в залізобетонному суднобудуванні, які є морально і технічно застарілими. Стандарт входить до групи стандартів ДСТУ Б В.2.7-XXX:2018 Будівельні

матеріали. Він встановлює класифікацію суднобудівних бетонів та основні технічні вимоги до них за корозійною стійкістю, водостійкістю, водонепроникністю, морозостійкістю і міцністю. Стандарт встановлює також вимоги до матеріалів і бетонних сумішей та методів їх випробувань, наводить основні вимоги до технології приготування бетонних сумішей та бетону, вимоги щодо безпеки та збереження навколишнього природного середовища, правила приймання, транспортування і зберігання бетонної суміші та бетону тощо. В проекті ДСТУ наведені рекомендовані склади легких суднобудівних бетонів, які були розроблені на основі проведених досліджень та з врахуванням досвіду виробництва керамзитобетонних конструкцій.

Результати проведених досліджень були впроваджені на об'єктах гідротехнічного будівництва, при виробництві тонкостінних керамзитобетонних конструкцій та в навчальному процесі в Одеській державній академії будівництва та архітектури.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розвинуто теоретичні основи і створено практичні методи отримання легких бетонів на пористих заповнювачах із заданими експлуатаційними властивостями та підвищеною довговічністю для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих. Встановлено, що підвищення довговічності та фізико-механічних характеристик легких бетонів досягається за рахунок управління структурою, спрямованого на зниження капілярної пористості цементно-піщаної матриці, зокрема у контактній зоні заповнювача. Ця задача вирішується шляхом застосування модифікаторів і здійснення операцій, спрямованих на покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці.

2. За результатами натурних обстежень тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд встановлено, що довговічність бетонів в найбільшій мірі обумовлюється стійкістю до впливу вологи при фільтрації, а також до циклічного зволоження та заморожування. Проаналізовано механізми корозійного пошкодження бетонів на пористих заповнювачах з врахуванням впливу експлуатаційного середовища в гідротехнічних спорудах, узагальнено вимоги до даних бетонів. Запропоновано новий метод визначення корозійної стійкості бетону при однобічному впливі води-середовища. Запропоновані та захищені патентами неруйнівний спосіб визначення однорідності бетону в конструкціях та спосіб прискореного визначення морозостійкості бетону, які ґрунтуються на визначенні зміни технологічної пошкодженості матеріалу.

3. Вдосконалено методи управління структурою і властивостями легких бетонів. Показано, що покращення сумісної роботи пористого заповнювача і цементно-піщаної матриці при структуроутворенні і експлуатації є одним з шляхів покращення механічних властивостей і підвищення довговічності легкого бетону в вологих умовах. Запропоновано використання двох методів обробки пористих заповнювачів, спрямованих на покращення їх сумісної роботи з матрицею: обробка цементної суспензією в початковій стадії

перемішування суміші та гідрофобізація поверхні. Проаналізовано динаміку проникнення суспензії в зерна керамзиту при обробці. Встановлено, що за рахунок обробки пористого заповнювача цементною суспензією зменшується середній розмір пор керамзитобетону та підвищується однорідність пор за розмірами, а також відчутно зростає його міцність.

4. Встановлені закономірності вологісних деформацій штучного пористого заповнювача в умовах, наближених до реальних умов твердіння легкобетонної суміші. Показано, що об'ємні вологісні деформації гідрофобізованого гравію у воді та у цементно-піщаному розчині є в 4..5 разів меншими за деформації необробленого гравію. Усадка при висиханні насиченого водою не обробленого керамзитового гравію є меншою за його первинне подовження при насиченні, що є наслідком зниження попереднього напруженого стану гранул.

5. Вдосконалено рецептурні методи управління структурою легких бетонів. Досліджено вплив модифікаторів, фібри та технологічного прийому обробки гравію цементною суспензією на структуру, властивості та довговічність керамзитобетону. За рахунок обробки гравію суспензією та використання мікрокремнезему, суперпластифікатору, дисперсного армування отримано керамзитобетони з міцністю при стиску до 42..44 МПа і міцністю на розтяг при згині до 7 МПа, що задовольняє вимогам для більшості тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема вимогам Морського реєстру до суднобудівних керамзитобетонів. Водонепроникність модифікованих легких бетонів складає від W4 до W14, морозостійкість – від F400 до F600. За рахунок використання раціональної кількості модифікаторів водонепроникність керамзитобетонів підвищується на дві марки і більше, морозостійкість – на 100 циклів. За рахунок обробки гравію цементною суспензією зростає водонепроникність і міцність при стиску керамзитобетону. Мікроскопічний аналіз структури легких бетонів на обробленому цементною суспензією керамзиті виявив кольматацию пор і тріщин в зовнішній оболонці заповнювача на глибині до 1,2-1,6 мм, а також зниження пористості контактної зони.

6. Показана можливість застосування залізоокисних порошкових пігментів для поліпшення декоративних властивостей легких бетонів. Міцність і довговічність декоративних конструкційних керамзитобетонів не відрізняється від даних показників контрольних бетонів аналогічних складів. При обробці пористого гравію цементною суспензією покращується насиченість кольору декоративних бетонів та зростає їх міцність та довговічність.

7. За рахунок використання кольматуючої та пластифікуючої добавок в комплексі із застосуванням гідрофобної обробки поверхні пористого гравію отримані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони з підвищеною довговічністю та покращеними фізико-механічними і експлуатаційними властивостями. Встановлено, що цементно-піщана матриця в контактній зоні бетону на гідрофобізованому гравії має щільну структуру з низькою кількістю рівномірно розподілених пор. Гідрофобізація поверхні пористого гравію знижує В/Ц легкобетонної суміші, зменшує вологісні деформації заповнювача, а також перешкоджає його розм'якшенню в вологих умовах. Для обробки пористого

гравію раціональною є 0,6-0,8% концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії. Модифіковані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони за рахунок введення добавок Пенетрон А і С-3, а також при використанні гідрофобної обробки поверхні гравію мають міцність до 45 МПа, водонепроникність від W8 до W12, морозостійкість не нижче F500 і середню густину в водонасиченому стані 1750..1860 кг/м³, що відповідає вимогам галузевих стандартів та забезпечує високу довговічність матеріалу. При застосуванні кольматуючої добавки і гідрофобної обробки поверхні гравію вологість керамзитобетону, що експлуатується в контакт з водою, знижується на третину, середня густина на 30..40 кг/м³, а теплопровідність на 0,09-0,10 Вт/(м×К). Застосування легких бетонів дозволяє підвищити вантажопідйомність плавучих споруд та покращити комфортність перебування людей і умови роботи технологічного обладнання.

8. Встановлена можливість підвищення міцності і довговічності бетонів на вапняковому щебені за рахунок застосування модифікаторів і обробки заповнювача цементною суспензією. Досягнутий за рахунок застосування суперпластифікатору, мікрокремнезему та обробки заповнювача рівень міцності (50 МПа) водонепроникності (W12) і морозостійкості (F400) бетону на пористому вапняковому щебені забезпечує достатню довговічність матеріалу і дає змогу його використання у ряді конструкцій гідротехнічних споруд.

9. Показана можливість застосування пористих пісків в легких бетонах для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних. Середня густина модифікованих керамзитобетонів з дрібним заповнювачем з суміші кварцового піску і гранульованого піноскла складає 1400-1440 кг/м³, водонепроникність W10-W12, морозостійкість F450-F550, міцність при стиску до 21 МПа, міцність на розтяг при згині до 5 МПа що дозволяє підвищити вантажопідйомність плавучих споруд за рахунок додаткового зниження ваги конструкції при забезпеченні необхідного рівня міцності та високої довговічності матеріалу.

10. Розроблено та затверджено регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків. Розроблено та знаходиться на стадії погодження проект Державного стандарту України «Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування», який складається з двох частин: Бетон суднобудівний важкий і Бетон суднобудівний легкий. З використанням комплексу експериментально-статистичних моделей та методу Монте-Карло здійснено вибір оптимальних складів керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд. Результати досліджень впроваджені на об'єктах гідротехнічного будівництва та в навчальному процесі.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Кровяков С.О. Наукові та практичні основи підвищення довговічності модифікованих бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2018, №73, С.73-80.

2. Кровяков С.О., Мішутін А.В. Рецептурно-технологічні методи підвищення довговічності бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 36. Рівне: Волинські береги, 2018. С.55-63.

3. Kroviakov S.O., Mishutin A.V., Pishev O.V., Kryzhanovskiy V.O. Effect of composition on the strength of modified expanded clay lightweight concrete. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2018, №71, С.107-112.

4. Кровяков С.О., Дудник Л.В. Порівняння властивостей модифікованих керамзитобетонів з різними типами пісків. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 35. Рівне: НУВГП, 2018. С.18-25.

5. Кровяков С.О., Мішутін А.В. Підвищення довговічності легких конструкційних бетонів для гідротехнічних і транспортних споруд шляхом оброблення поверхні пористого заповнювача. Наука та будівництво, 2017, №3. С.50-58.

6. Підвищення довговічності керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд за рахунок застосування модифікаторів. А.В. Мішутін, С.О. Кровяков, О.В. Піщев та ін. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №69, С.100-105 (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

7. Мішутін А.В. Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Довговічність бетонів на вапняковому щебені, обробленому цементною суспензією. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №67, С.89-95 (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

8. Кровяков С.О., Петричко С.М., Дудник Л.В., Ткаченко Г.Г. Декоративний конструкційний керамзитобетон на обробленому цементною суспензією гравії. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №66, С.66-71 (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

9. Кровяков С.О. Мішутін А.В. Полторапавлов А.О. Механічні властивості бетону на обробленому цементною суспензією карбонатному щебені. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №64. С.147-152. (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

10. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Піщев О.В. та ін. Механічні властивості модифікованих суднобудівних керамзитобетонів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №63. С.161-166. (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

11. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Застосування пористих заповнювачів у бетонах для транспортних споруд. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2016, Вип. 98. С.145-155.

12. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Піщев О.В. та ін. Властивості легких бетонів на різних видах пористих заповнювачів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №62, С.119-125. *(індексується наукометричною базою Index Copernicus)*.

13. Мішутін А.В., Кровяков С.О. Досвід і перспективи застосування бетонів на легких заповнювачах для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №61. С.278-284. *(індексується наукометричною базою Index Copernicus)*.

14. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Богущкий В.Л. Оптимізація складу суднобудівного керамзитобетону підвищеної довговічності. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2015, №60. С.160-165.

15. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Богущкий В.Л. Застосування модифікованих бетонів на легких заповнювачах для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. 2015, Випуск 56. С.68-74.

16. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Застосування вапнякового щебеню для бетонів жорстких дорожніх покриттів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2015, №58. С.250- 255.

17. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Порівняння властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів на різних типах заповнювача. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2015, Випуск 31. С.251-257.

18. Мишутин А.В., Богущкий В.Л., Кровяков С.А. Прочность и средняя плотность судостроительного бетона на керамзитовом гравии. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2014, №53. С.245-251.

19. Кровяков С.А., Мишутин Н.В., Заволока Н.В. Опыт применения и перспективы использования бетонов на легких заполнителях в гидротехническом и транспортном строительстве. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2013, №52. С.134-139.

20. Гапоненко Е.А., Кровяков С.А. Обеспечение долговечности бетона водопропускных и водоотводных сооружений на автомобильных дорогах. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 26. Рівне: НУВГП, 2013. С.53-58.

21. Кровяков С.О., Даниленко А.В. Порівняння ефективності застосування зерен пониженої пружності і дисперсного армування при керуванні властивостями дрібнозернистого бетону. Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2010, №14. С.163-168.

22. Кровяков С.О., Даниленко А.В. Вплив дисперсного армування і зерен пониженої пружності на властивості дрібнозернистого бетону. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2010, №38. С.389-394.

23. Кровяков С.А. Даниленко А.В. Влияние демпфирующих частиц на свойства мелкозернистых бетонов при зафиксированной гранулометрии заполнителей. Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). Вип.72. К.: ДП НДІБК, 2009. С.99-104.

24. Кровяков С.А. Даниленко А.В. Влияние демпфирующих частиц на свойства мелкозернистых бетонов в сухом и водонасыщенном состоянии. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2009, №34. С.116-122.

25. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Долговечные бетоны для тонкостенных сооружений, эксплуатируемых во влажной среде. Дороги і мости, Випуск 7, в 2-х т., т.2.К.: ДерждорНДІ, 2007. С.67-70.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

26. Kroviakov S., Mishutin A., Pishev O. Management of the properties of shipbuilding expanded clay lightweight concrete. International Journal of Engineering & Technology, 2018, Vol 7, No 3.2, pp.245-249 (*індексуються наукометричною базою Scopus*).

27. Mishutin A., Kroviakov S., Pishev O., Soldo B. Modified expanded clay light weight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. Tehnički glasnik 11, 3 (2017). (Technical Journal, Vol.11 No.3) pp.121-124 (*індексуються наукометричною базою Web of Science*).

28. Kroviakov S., Mishutin A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanya, Vol. (1) Issue (4), August 2017. pp.2-10.

29. Кровяков С.А., Мишутин А.В. Обработка поверхности пористых заполнителей как метод повышения долговечности легких бетонов гидротехнических и транспортных сооружений. Проблемы современного бетона и железобетона. Выпуск 9, 2017. С.279-294.

30. Mishutin A., Kroviakov S., Zavoloka M., Bogutsky V, Stanchyk Ie. Increasing the durability of expanded clay lightweight concretes for thin-walled hydraulic engineering structures. Meridian Ingeresc, Journal of technical university of Moldova and Moldavian engineering association, 2016, №4, pp.42-45.

Патенти на корисні моделі

31. Патент № 32920, Україна, Модифікована бетонна суміш / Дорофєєв В.С., Мишутін А.В., Кровяков С.О., Гапоненко К.О. заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2008 р.

32. Патент №38003, Україна, Спосіб визначення однорідності якості бетону / Дорофєєв В.С., Вировой В.М., Мішутін А.В., Кровяков С.О., заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2008 р.

33. Патент № 20590, Україна. Спосіб прискореного визначення морозостійкості бетону / Дорофєєв В.С., Вировой В.М., Мишутін А.В., Кровяков С.О., Романов О.А., заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2007 р.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

34. Mishutin A., Kroviakov S., Mishutin N., Bogutsky V. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures. Proceedings of the Second International Conference on Concrete Sustainability. ICCS16. Madrid, Spain, 2016. pp.741-747 (*індексуються наукометричною базою Web of Science*).

35. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Панасюк В.О. Сушицький Е.Б. Набухання і усадка керамзитового гравію в процесі твердіння бетону. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання і оптимізація композитів», Одеса, 2018. С.74-78.

36. Мішутін А.В., Кровяков С.О. Довговічність легких і важких суднобудівних бетонів. Збірник наукових праць за матеріалами I міжнародної азербайджансько-української конференції «Building Innovations – 2018». Баку, ПолтНТУ, 2018. С. 162-164.

37. Кровяков С.О., Дудник Л.В., Петричко С.М. Стійкість кольорової гами декоративних керамзитобетонів. Збірка тез доповідей другої науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси», Одеса: ОДАБА, 2018. С.101.

38. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Дудник Л.В. Дослідження легких бетонів з різними типами дрібного заповнювача. Тези доповідей 74-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса:ОДАБА, 2018. С.269.

39. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Піщев О.В. та ін. Міцність модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних і транспортних споруд. Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Структурутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій», Одеса:ОДАБА, 2018. С.80-83.

40. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Полторапавлов А.О. Врахування зміни Ц/В суміші при оцінці впливу модифікаторів на міцність бетону на вапняковому щебені. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання і оптимізація композитів», Одеса, 2017. С.51-53.

41. Кровяков С.О. Мішутін А.В. Метод дослідження корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі агресивної рідини. Тези доповідей II міжнародної конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд», Одеса:ОДАБА, 2017. С.81-83.

42. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Піщев О.В., Заволока М.В. Застосування методів планування експерименту при дослідженні властивостей керамзитобетону. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів», Одеса, 2016. С.65-67

43. Кровяков С.О., Дудник Л.В., Полторапавлов А.О. Застосування місцевого заповнювача в транспортному і гідротехнічному будівництві в одеському регіоні. Збірка тез доповідей науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси», Одеса:ОДАБА, 2016. С.117.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.

44. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Применение модифицированных бетонов для снижения проницаемости конструкций водопропускных и водоотводных сооружений на автодорогах. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. 2013, Випуск 50. С.92-96.

45. Мішутін А.В., Богуцький В.Л., Кровяков С.О. Модифіковані керамзитобетони для тонкостінних плавучих споруд. Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті, 2014, №2. С.104-110.

АНОТАЦІЯ

Кровяков С.О. Експериментально-теоретичні основи підвищення довговічності легких бетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та виробы. Одеська державна академія будівництва та архітектури – Одеса, 2019.

Розвинуто теоретичні основи і створено практичні методи підвищення довговічності легких бетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих. Запропоновано використання двох методів обробки пористих заповнювачів, спрямованих на покращення їх сумісної роботи з цементно-піщаною матрицею: обробка цементної суспензією в початковій стадії перемішування суміші та гідрофобізація їх поверхні. Встановлені закономірності вологісних деформацій штучного пористого заповнювача в умовах, наближених до реальних умов твердіння легкобетонної суміші. Вдосконалено рецептурні методи підвищення довговічності легких бетонів за рахунок їх комплексної модифікації суперпластифікатором, кольматуючою добавкою та мікрокремнеземом, а також дисперсного армування. Показана можливість застосування пористих пісків та залізоокисних кольорових пігментів в легких бетонах для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд. Розроблено проект Державного стандарту України «Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування».

Ключові слова: легкий бетон, керамзитобетон, заповнювач, модифікатори, обробка, довговічність, водонепроникність, морозостійкість, тонкостінна конструкція.

АННОТАЦИЯ

Кровяков С.А. Экспериментально-теоретические основы повышения долговечности легких бетонов для тонкостенных гидротехнических сооружений. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.05 - строительные материалы и изделия. Одесская государственная академия строительства и архитектуры – Одесса, 2019.

Развиты теоретические основы и созданы практические методы повышения долговечности легких бетонов на пористых заполнителях для тонкостенных гидротехнических сооружений, в том числе железобетонных плавучих. Предложено использование двух методов обработки пористых заполнителей, направленных на улучшение их совместной работы с цементно-песчаной матрицей: обработка цементной суспензией в начальной стадии перемешивания смеси и гидрофобизация их поверхности. Установлены закономерности влажностных деформаций искусственного пористого заполнителя в условиях, приближенных к реальным условиям твердения легкого бетонной смеси. Усовершенствованы рецептурные методы повышения долговечности легких бетонов за счет их комплексной модификации суперпластификатором, кольматирующей добавкой и микрокремнеземом, а также дисперсного армирования. Показана возможность применения пористых песков и железистых цветных пигментов в легких бетонах для тонкостенных конструкций гидротехнических сооружений. Разработан проект Государственного стандарта Украины «Бетон судостроительный. Технические условия и технология приготовления».

Ключевые слова: легкий бетон, керамзитобетон, заполнитель, модификаторы, обработка, долговечность, водонепроницаемость, морозостойкость, тонкостенная конструкция.

ABSTRACT

Kroviakov S.O. Experimental and theoretical basis for improving the durability of lightweight concretes for thin-walled hydraulic structures. – Manuscript.

Thesis for Doctor of Technical Sciences degree. Specialty 05.23.05 – Building materials and products. – Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Odesa, 2019.

Theoretical foundations and practical methods have been developed to increase the durability of lightweight concrete on porous aggregates for thin-walled hydraulic structures, including reinforced concrete floating structures. The field surveys of thin-walled hydraulic structures revealed that concrete durability is determined by the resistance of water filtration and frost resistance. A new method for determining of the concrete homogeneity in structures, a method for accelerated determination of the frost resistance of concrete, and a method for determining of the corrosion resistance of concrete under one-sided exposure to a water-environment have been developed.

It is shown that increasing durability and physicomechanical properties of lightweight concrete are achieved by reducing of the capillary porosity of the cement-sand matrix, including the contact zone of porous aggregate and matrix. Using of the modifiers and operations aimed at improving the combined action of aggregate and cement-sand matrix has been proposed for controlling the concrete structure. Using of two methods for processing of porous aggregates is proposed: the aggregate is treated with a cement slurry in the initial stage of mixing, and the hydrophobization of the aggregate surface.

Moisture deformations of an artificial porous aggregate were studied under the conditions which is similar to real-life hardening conditions of lightweight concrete mixtures. It was determined that volume moisture deformations of hydrophobic claydite gravel in water and cement-sand mortar are 4..5 times less than the deformations of the non-hydrophobic gravel.

The methods for controlling of the lightweight concrete structure are improved. The methods of experimental statistical modeling were used in the researches. Several series of multifactorial experiments with modified lightweight concrete were performed. Due to the processing of gravel and using of silica fume, superplasticizer and fiber reinforcement expanded clay concrete with compressive strength up to 42..44 MPa and tension bending strength up to 7 MPa was obtained. Watertightness of the modified lightweight concrete is from W4 to W14, the frost resistance is from F400 to F600. Similar expanded clay concrete and fiber reinforced expanded clay concrete were obtained by using colmation and plasticizing admixtures in a complex using of hydrophobic gravel surface treatment with an emulsion of a silicon-organic liquid. Hydrophobization of the surface of porous gravel reduces the W/C of lightweight concrete mixture, moisture deformation of the aggregate, and also prevents it from softening under wet conditions. It was established that hydrophobic processing of porous gravel is a rational concentration of silicone fluid in the emulsion of 0.6-0.8%. The developed lightweight concrete meets the requirements for the most thin-walled structures of hydraulic structures, in particular requirements of the Maritime Register for shipbuilding expanded clay concrete. The using of the lightweight concrete allows to increase carrying capacity of floating reinforced concrete structures and to improve comfort of people stay and working conditions of process equipment. The microscopic analysis of lightweight concrete structure on expanded clay with cement slurry treated showed colmation of pores and cracks in envelop of aggregate at the depth of 1.2-1.6 mm, as well as the decreasing porosity of contact zone. The cement-sand matrix of concrete in the contact area of aggregate with a hydrophobic surface has a dense structure with a low number of uniformly distributed pores.

The possibility of using iron oxide powder pigments to improve decorative properties of expanded clay structure is shown. It has been revealed that due to the processing of porous gravel with a cement suspension, the color saturation of the decorative concrete improves and their strength and durability increase. The possibility of increasing strength and durability of concrete on limestone gravel through the use of modifiers and aggregate treatment with cement slurry has been revealed. Expanded clay concrete with fine aggregate from a mixture of quartz sand and granulated foam glass were developed. The average density of modified expanded clay concrete on a mixture of silica sand and granulated foam glass is 1400-1440 kg/m³, watertightness W10-W12, frost resistance F450-F550, it allows increasing load capacity of the floating structure due to the additional weight reduction of the structure.

Developed and approved guides on the technology of preparation of modified shipbuilding expanded clay concrete and fiber expanded clay concrete for

manufacture of thin-walled floating structures and floating docks. Draft State Standard of Ukraine “Concrete shipbuilding. Technical conditions and technology of preparation” has been developed and it is at the stage of discussion and coordination. The research results are implemented at the objects of hydraulic engineering construction and in the educational process.

Key words: lightweight concrete, expanded clay lightweight concrete, aggregate, modifiers, treatment, durability, water tightness, frost resistance, thin-walled construction.

Підписано до друку 28.03.2019 р.
Формат 60 X 84/16 Папір офісний Гарнітура Times
Друк-різографія. Ум.-друк. арк. 2,5.
Наклад 120 прим. Зам. №19-33Е

Видавець і виготовлювач:
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.2013 р.
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.
тел.: (048) 729-85-34, e-mail: rio@ogasa.org.ua

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА)