

К. В. КИРИЧЕНКО, О. В. ЩЕДРОЛОСЄВ, О. С. РАШКОВСКИЙ

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ СУДНОБУДІВНОГО БЕТОНУ ІЗ ЗАДАНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ І ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Розглянуті особливі вимоги, які пред'являються до суднобудівного бетону і бетонної суміші у зв'язку із екстремальними умовами роботи морських залізобетонних споруд. Представлені дослідження з оптимізації бетону для густоармованих тонкостінних елементів конструкцій плавучих споруд. Результати досліджень дають змогу використовувати метод факторного планування експерименту для одержання залежностей досліджуваних властивостей бетону, що дає можливість за допомогою обчислювальної техніки прогнозувати властивості майбутньої бетонної суміші за короткий час з врахуванням зміни параметрів вхідних компонентів.

Ключові слова: плавучий композитний док, понтон, суднобудівний бетон, дрібнозернистий бетон, міцність бетону.

Рассмотрены особые требования, которые предъявляются к судостроительному бетону и бетонным смесям в связи с экстремальными условиями работы морских железобетонных сооружений. Представлены исследования по оптимизации бетона для густоармированных тонкостенных элементов конструкций плавучих сооружений. Результаты исследований позволяют использовать метод факторного планирования эксперимента для получения зависимостей исследуемых свойств бетона, что позволяет с помощью вычислительной техники прогнозировать свойства будущей бетонной смеси за короткое время с учетом изменения параметров входящих компонентов.

Ключевые слова: плавучий композитный док, понтон, судостроительный бетон, мелкозернистый бетон, прочность бетона.

In the article concerned questions that relate to special requirements, which need to be applied to shipbuilding concrete and concrete mix due to the extreme conditions of exploitation of reinforced concrete structures. The results of the research are: reducing time, energy and material costs in the manufacture of concrete using methods of factor planning of experiments while testing prototypes and automating this process.

As a scientific innovation presented research about optimization of concrete for reinforced thin-walled elements constructions of floating structures. The following studies conducted using mathematical planning methods of experiment and simulation to determine the dependence of properties of concrete mixtures and concrete of the recipe-technological factors. The practical significance of the developed procedures is to use the method of factor planning experiment to obtain dependencies of the researched properties of concrete. These results, with a usage of computing machinery, give the opportunity to predict the properties of the future concrete mix in a short time taking into account changes in the parameters of the input components.

Keywords: floating composite dock, pontoon, shipbuilding concrete, fine-grained concrete, durability of concrete.

Вступ. Умови роботи морських залізобетонних споруд (особливо плавучих доків) є значною мірою екстремальними. Залізобетонні конструкції плавучих доків піддаються всім відомим впливам навколишнього середовища через те, що вони експлуатуються у всіх кліматичних зонах земної кулі. Одночасно з цим конструкції плавучого доку зазнають впливу широкого спектру навантажень: постійних (вантажі на стапель-палубі, тиск води і т. ін.); статичних змінних (сили виштовхування води при прогині і перегині корпусу); динамічних змінних (удари, навали), внаслідок яких в бетоні виникають напруження різної величини і змінного напрямку.

Бетон корпусів залізобетонних плавучих доків у всіх кліматичних зонах поперемінно зволожується і висушується, зазнає агресивної дії солей морської води – хімічної корозії в результаті реакції між цементним каменем і солями, розчиненими в морській воді, обростає водоростями і черепашками.

Крім того, в південних, субтропічних і тропічних морях дія хімічної корозії підсилюється високою температурою, вологістю при багаторазових і поперемінних зволоженнях і висиханнях, а в північних і східних морях суднобудівний бетон в зимовий період багаторазово поперемінно заморожується і відтає.

За кліматичними умовами і ступенем агресивності середовища (морської води) моря, де експлуатуються плавучі доки, можуть бути поділені на моря з особливо суворими (Баренцове море, Біле море, моря басейну Тихого океану), з суворими (Чорне море, Каспійське море) та з помірними кліматичними умовами (Балтійське море).

У зв'язку з такими багатофакторними умовами експлуатації залізобетонних суден, а також розвитком напрямків використання залізобетонних плавучих

засобів (причали, плавучі майстерні, крани, дебаркадри, брандвахти, рибоморозильні бази, перевезення і зберігання нафти і нафтопродуктів) є актуальним створення нових видів високоміцних суднобудівних бетонів з підвищеними міцнісними характеристиками, високою водонепроникністю і морозостійкістю [1–4].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Питанням проектування і, в основному, будівництву залізобетонних доків присвячені роботи П. С. Гофтарша, Н. М. Егорова, В. В. Козлякова, М. А. Ловягина, А. А. Мільто, І. І. Рибалова, Г. В. Танхельсона [5–11], що відносяться до 60...70-м рокам минулого сторіччя. Підхід до конструювання залізобетонних доків був успадкований від металевих суднобудування – понтони проектували з набором балочної конструкції аналогічно широко відомим понтонам із сталі.

Проведені дослідження і конструкторські розробки в частині забезпечення оптимальної роботи залізобетонних елементів корпусу, виходячи з умов міцності на вигин та кручення, водонепроникності і герметичності, дозволили вперше в світовій практиці докобудування отримати необхідні комбінації тонкостінних елементів з мінімальним використанням сталі, що дозволило скоротити кількість арматури майже в 3 рази [12].

До 1960 р. при побудові корпусів залізобетонних суден застосовувався тільки важкий суднобудівний бетон класу В 25 і В 30 (легкі бетони класу В25 для будування експериментальних суден), вимоги до якого щодо міцності, водонепроникності і морозостійкості визначалися чинним на той час нормативним документом Річкового Регістру РРФСР, що не відповідало потребам морського суднобудування.

Багаторічні дослідні роботи дозволили вишукати нові види високоміцних суднобудівних бетонів з морозостійкістю 300...600 циклів в морській. Якщо врахувати малі товщини корпусу залізобетонного судна (місцями до 4...8 см), великий відсоток насичення сталевую арматурою ($250...600 \text{ кг/м}^3$) для забезпечення загальної і місцевої міцності корпусу, використання досить жирних складів бетонів (витратою цементу $450...800 \text{ кг/м}^3$), рухливості 2...18 см із дрібним заповнювачем і малими значеннями водоцементного відношення 0,32...0,45, то можна зробити висновок, що суднобудівні бетони відрізняються від бетонів, застосовуваних в інших галузях промисловості і мають свої специфічні особливості.

Суднобудівний бетон також повинен мати достатню корозійну стійкість і щільність, надійно захищаючи арматуру від корозії при товщинах захисного шару 0,5 см для внутрішніх сухих і поверхонь, що періодично звожуються, і 1,0...1,15 см для зовнішніх поверхонь корпусу залізобетонного судна, що постійно звожуються.

До суднобудівного бетону і бетонної суміші пред'являються особливі вимоги щодо вибору виду і витрати цементу, чистоти і крупності заповнювачів, високої рухливості і зручності укладання бетонної суміші при низьких значеннях водоцементного відношення, твердіння в природних умовах і в середовищі насиченої пари. Щоб задовольнити весь комплекс цих вимог, треба одержати бетон з високою міцністю ($400...600 \text{ кг/см}^2$), водонепроникністю (до 10 кг/см^2), морозостійкістю в морській воді (300...600 циклів). Тільки при застосуванні такого бетону буде забезпечена висока якість і довговічність корпусу залізобетонного судна.

Відмінна риса суднобудівних бетонів як конструкційних матеріалів від інших конструкційних матеріалів, застосовуваних у суднобудівній промисловості, полягає в тому, що цей вид матеріалів приготується безпосередньо на верфі, на місці будівництва залізобетонних суден. Тому під час пошуку необхідних складів бетону були розроблені нормативні документи (галузеві стандарти на застосування бетону в залізобетонному суднобудуванні), які регламентують основні властивості суднобудівного бетону, фактори, що впливають на їхню зміну, а також основні вимоги до створення на верфі технології приготування і використання цього виду конструкційного матеріалу із наперед заданими властивостями.

Було встановлено, що для будівництва залізобетонних суден і плавучих доків повинні використовуватися такі види бетонів:

- важкі суднобудівні бетони класу В 30...В 60 і суднобудівні бетони класу В 30...В 50;
- дрібнозернисті бетони класу В 30...В 40;
- суднобудівні легкі бетони;
- нафтонепроникний бетон;

Суднобудівний бетон класу В 40 об'ємною масою 2430 кг/м^3 , приготовлений на сульфатостійкому портландцементі, з водоцементним відношенням 0,38...0,40 має найбільшу довговічність і корозійну стійкість після 20...25 років експлуатації в конструкціях збірних елементів (підданих пропарюванню по опти-

мальним режимам) і конструкціях стикових з'єднань (що твердіють у природних умовах) корпусів плавучих залізобетонних суден і доків, експлуатованих у суворих і особливо суворих умовах морів півночі і сходу.

Суднобудівний дрібнозернистий бетон класу В 40, об'ємною масою 2400 кг/м^3 , приготовлений на сульфатостійкому портландцементі, з водоцементним відношенням 0,4, на чистому кварцовому піску і гранітному щебеню крупністю 3...10 мм, має велику корозійну стійкість і довговічність у конструкціях стикових з'єднань корпусів залізобетонних плавучих доків і суден, експлуатованих у морях півдня, півночі і сходу.

Суднобудівні бетони, об'ємною масою 2280 кг/м^3 , приготовлені на сульфатостійкому портландцементі, з водоцементним відношенням 0,32...0,40 на чистому, промитому кварцовому піску, мають велику корозійну стійкість і довговічність у конструкціях стикових з'єднань корпусів залізобетонних плавучих доків і суден, експлуатованих у морях півдня, півночі і сходу.

Суднобудівний нафтонепроникний бетони, об'ємною масою 2430 кг/м^3 , приготовлений на сульфатостійкому портландцементі з добавками розчинного скла і сульфітно-спиртової барди, з водоцементним відношенням 0,38...0,40, має високу щільність, міцність і водонепроникність після 20...25 років експлуатації в конструкціях танків корпусів залізобетонних суден, призначених для зберігання і перевезення дизельного палива і мазуту.

Суднобудівні важкі бетони, з добавкою нітриту натрію, що твердіють у зимових умовах при температурі повітря від 0° до -15°C , мають високу міцність і корозійну стійкість у конструкціях стикових з'єднань корпусів залізобетонних доків, експлуатованих у морях півдня, півночі і сходу.

Суднобудівний керамзитобетон, об'ємною масою 2000 кг/м^3 , приготовлений на сульфатостійкому портландцементі з водоцементним відношенням 0,4, на кварцовому піску і керамзитовому гравію крупністю 3...20 мм, має високу міцність і щільність у конструкціях корпусів залізобетонних суден і плавучих споруд, експлуатованих у морях півдня, півночі і сходу.

Застосування нових видів високоміцних суднобудівних бетонів для будівництва залізобетонних суден замість важких бетонів марок 250-300 дозволить знизити вагу корпусу судна до 20 % за рахунок зменшення товщини елементів, знизити витрату арматурної сталі, а також підвищити водонепроникність і довговічність залізобетонних суден.

Багаторічні дослідження цих видів суднобудівних бетонів, а також дані експлуатації плавучих залізобетонних споруд у морях дозволили зробити вищевказані висновки. Це стало підставою для подальшого застосування суднобудівних бетонів як конструкційних матеріалів при проектуванні і будівництва корпусів нових типів залізобетонних суден, плавучих і підводних споруд, призначених для експлуатації в морях півночі, півдня і сходу.

Крім проектних вимог за міцністю, морозостійкістю і водонепроникністю для гідротехнічного бетону у відповідності до умов роботи та норм проектування можливе пред'явлення ряду додаткових вимог. Проектний вік, у

якому повинні бути забезпечені технічні вимоги, вказують у документації на конструкції. Він призначається згідно норм проектування залежно від умов до бетону, способів зведення та термінів фактичного завантаження конструкцій. Якщо проектний вік не зазначений технічні вимоги до бетону повинні бути забезпечені в 28 діб [7].

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення складу бетонної суміші з урахуванням з особливих вимог у зв'язку із екстремальними умовами роботи морських залізобетонних споруд

Задачею дослідження є скорочення часу, енергетичних та матеріальних витрат при виробництві бетону.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1) дослідження визначення залежності властивостей бетонних сумішей і бетонів від рецептурно-технологічних факторів із застосуванням методів математичного планування експерименту і моделювання;

2) використання методів факторного планування експериментів при випробуванні дослідних зразків і автоматизація цього процесу.

Матеріали та методи дослідження застосування нових модифікованих суднобудівних бетонів при побудові композитних плавучих доків. Методичною основою виконання досліджень є: математичне планування експерименту і моделювання, для визначення залежності властивостей бетонних сумішей і бетонів від рецептурно-технологічних факторів.

Об'єктом моделювання була міцність бетону на стискання у віці 28 діб, водовміст сумішей, їх життєздатність.

Предметом дослідження є характеристики матеріалу плавучих тонкостінних густоармованих конструкцій, з урахуванням фізико-механічних вимог, які до них пред'являються: міцність на стискання, міцність на вигин, водонепроникність, морозостійкість у морській воді, середня щільність.

Підбір складу бетонної суміші є однієї з найбільш відповідальних операцій у технології бетонних робіт. Підібраний склад бетонної суміші з застосуванням наявних матеріалів повинен забезпечити одержання суднобудівного бетону проектною міцності, необхідної водонепроникності і морозостійкості, а також забезпечити одержання бетонної суміші необхідної рухливості для укладання в тонкостінні і густоармовані конструкції корпусу залізобетонного судна.

Розрахунок складу бетонної суміші проводиться на основі випробувань всіх матеріалів, що входять до складу бетону, відповідно до вимог галузевої нормалі «Бетон суднобудівний важкий» і «Рекомендацій з технології приготування та застосування важкого суднобудівного бетону при будівництві морських плавучих залізобетонних і композитних споруд» РНТЦ-37-501-04.

Таким чином, технологічний процес виробництва залізобетонних конструкцій складається з декількох етапів. На першому етапі виробляється підбір складу бетону, і другому – виготовлення і випробування виготовлених зразків бетону і на третьому етапі здійснюється безпосереднє виробництво готового продукту з наступним контролем його якості.

Операція підбору складу бетонної суміші за спрощеною схемою розрахунково-експериментального методу здійснюють щоразу, коли є відхилення від первісних значень в параметрах якості заповнювачів і самого бетону. Це займає багато часу, а якщо врахувати, що після підбору складу суміші необхідно провести випробування на зразках, а потім тільки запустити підібрану суміш у виробництво, то процес підбору затягується на багато днів. В ході випробувань зразків здійснюється корегування складу бетону, що також призводить до перерахування вихідного складу і повторних випробувань.

В умовах ринкової економіки виробники не мають постійних постачальників заповнювачів бетону (піску, щебеню, цементу і хімічних добавок) і при надходженні нових компонентів (при зміні постачальника) технологі і відповідним службам прихопиться знову здійснювати весь процес підбору складу бетону, виготовлення і випробування зразків.

Одним із шляхів скорочення часу, енергетичних та матеріальних витрат при виробництві бетону є використання методів факторного планування експериментів при випробуванні дослідних зразків і автоматизація цього процесу. Сутність планування факторних експериментів описується наступним виразом:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j \text{ при } i \neq j \quad (1)$$

де Y_i, Y_j – досліджувана властивість бетону; $x_1 \dots x_k$ – вихідні фактори; $b_0 \dots b_{ij}, b_{ii}$ – коефіцієнти рівнянь; i, j – порядкові номери факторів.

Для планування факторного експерименту, поперше, визначається кількість вихідних факторів, виходячи з чого визначають необхідну кількість дослідів. Далі всі фактори варіюються на трьох рівнях: середньому (основному), верхньому і нижньому, віддалених від основного на однакову величину інтервалу варіювання. Потім складають матрицю планування у вигляді таблиці, куди заносять усі можливі сполучення факторів на двох рівнях. Дана матриця і є планом проведення експерименту.

Виходячи із вищесказаного, наприклад, моделювалася міцність бетону в залежності від його складу. Об'єктом моделювання була міцність бетону на 28 добу. Як вихідні фактори були взяті маси цементу (x_1), щебеню (x_3), піску (x_4) хімічних добавок МБ10-01 (x_5) і ЦСПК (x_6) (κ_2), об'єм води (x_2) ($л$). При наявності такої кількості факторів повний факторний експеримент включає 64 дослідів. Виробничими умовами було накладене обмеження на проведення експерименту. В зв'язку з чим був здійснений дробовий факторний експеримент із восьми дослідів, в результаті якого були отримані міцнісні характеристики бетону із середнім значенням рівним 200 кг/см^2 . Залежність міцності від вихідних факторів виразилася таким рівнянням:

$$R = 151,5 + 3,5x_1 - 8,25x_2 - 5x_3 - 15,75x_4 - 8,25x_5 - 2,25x_6. \quad (2)$$

Це рівняння і є експериментально-статистичною моделлю міцності бетону, вона може бути у виді програми закладено в комп'ютер з певним набором обмежень і тоді будь-які варіації параметрів компонентів будуть автоматично враховуватися в складанні прогнозів тих чи інших властивостей бетону. Крім того, автоматизація виразу (1) дозволить швидко перебудовувати самі моделі факторного планування, роблячи громіздкі обчислювальні операції розглянутого процесу. Для порівняння підбір складу за спрощеною схемою займає від 4 до 8 годин, а при наявності готових залежностей, отриманих методом факторного планування, на цей процес іде близько 1 години. При цьому результати другого методу будуть більш точними і об'єктивними. Маючи ж готову програму з планування експерименту, технолог затратить усього кілька хвилин.

Оскільки залізобетонні конструкції плавучих споруд знаходяться в жорстких умовах експлуатації, у зв'язку з цим до суднобудівного бетону, який застосовується при побудові подібних конструкцій пред'являються підвищені вимоги – для відповідальних плавучих тонкостінних густоармованих конструкцій матеріал повинен відповідати наступним фізико-механічними характеристиками:

- міцність на стискання – 40...50 МПа;
- міцність на вигин – 4...6 МПа;
- водонепроникність – W-10;
- морозостійкість у морській воді – $F = 400$ циклів;
- середня щільність – 2350...2400 кг/м^3 .

Були виконані дослідження з оптимізації бетону для густоармованих тонкостінних (8...14 см) елементів конструкцій плавучих споруд. За умовами експериментальних досліджень були вибрані бетони, що мають рівне дозування (500 кг/м^3) сульфатостійкого цементу марки 400 Новоамвросієвського заводу і однакове водоцементне відношення - 0,40. Застосовувався щебінь фракцій 5...10 мм (тому що матеріал був призначений для густоармованих тонкостінних конструкцій) і пісок з $M = 1,2$.

В натурному експерименті варіювалися такі фактори складу бетону: X_1 - співвідношення між великим і дрібним заповнювачами (щебінь/пісок) в межах від 3,25 до 4,41 по масі ($3,25 < X_1 = \text{Щ/П} < 4,41$), X_2 - дозування пластифікуючої добавки в межах від 0,5 до 1 % від маси цементу ($0,5 < X_2 = \text{Д}_{\text{доб}} < 1$). Підбір складів бетонів був виконаний за наведеною вище стандартною методикою. Нормалізація факторів бетону виконана за формулою:

$$x_i = \frac{X_i - 0,5 \cdot (X_{i,\max} + X_{i,\min})}{0,5 \cdot (X_{i,\max} + X_{i,\min})}$$

Досліджувалися зручність укладання суміші і міцність на стискання бетону в ранні (3 доби) і марочні (28 діб) терміни.

Для величини осадки конусу бетонної суміші (см) отримана наступна експериментально-статистична (ЕС) модель із усіма значимими коефіцієнтами (похибка експерименту при розрахунку $\delta_{\epsilon} = 1,70$ см):

$$OK = 8,94 - 1,92 X_1 - 2,71 X_1 \cdot X_2 + 1,58 X_2 \quad (3)$$

Дана модель має максимум $OK_{\max} = 15,2$ см в точці з координатами $X_1 = X_2 = 1$ і мінімум $OK_{\min} = 5,9$ см в точці з координатами $X_1 = -1$, $X_2 = 1$. На рис. 1 показана діаграма у вигляді квадрата, побудована за моделлю 2.

Як видно з діаграми, найбільш рухливі ($OK > 10$ см) склади з низьким Щ/П ($X_1 < 0$, високопісчані бетони) і дозуванням добавки більше 0,75 % ($X_2 > 0$). Збільшення витрати добавки з 0,5 до 1 % підвищує рухливість сумішей з великим змістом піску, але практично не позначається на рухливості низькопісчаних сумішей ($\text{Щ/П} > 4$).

Вплив факторів складу на міцність бетону в ранньому віці (3 доби) описує експериментально-статистична модель (з похибкою $\delta_{\epsilon} = 2,5$ МПа):

$$R_{c3} = 20,1 - 1,81 X_1 \cdot X_2 + 2,2 X_2 \quad (4)$$

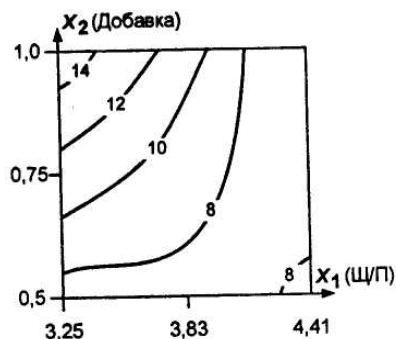


Рис. 1 – Вплив Щ/П і кількості добавки на величину осідання конуса бетонної суміші

Дана модель має максимум $R_{c3 \max} = 24$ МПа в точці з координатами $R_{c3 \max} = 24$ МПа і мінімум $R_{c3 \min} = 16,2$ МПа в точці з координатами $X_1 = X_2 = -1$. На рис. 2, а показана діаграма у вигляді квадрата, побудована по моделі 3. Ця діаграма показує, що на величину ранньої міцності найбільш істотно впливає дозування добавки і, у міру її росту з 0,5 до 1 %, міцність зростає від 4 МПа (при високому Щ/П) до 7 МПа (при низькому Щ/П). Даний ефект свідчить про прискорення пластифікуючими добавками твердіння бетону в ранньому віці, що найбільш істотно позначається на високопісчаних складах.

Вплив же факторів складу бетону на величину міцності на стискання в віці 28 діб (марочну міцність) адекватно описується приведеною нижче експериментально-статистичною моделлю ($\delta_{\epsilon} = 2,5$ МПа):

$$R_{c28} = 48,1 - 2,0 X_1^2 - 2,2 X_2^2 \quad (5)$$

Дана модель показує максимум $R_{c28 \max} = 4,8$ МПа в точці з координатами $X_1 = X_2 = 0$ і мінімум $R_{c28 \min} = 4,4$ МПа одночасно в 4 точках (кути факторного простору). Діаграма у вигляді квадрата, побудована по даній моделі, показана на рис. 2, б.

Можна зробити висновок, що у віці 28 діб вплив варіюваних факторів складу на міцність бетону помітно слабшає в порівнянні з їх впливом у ранньому ві-

ці. За рахунок $R_{с28}$ зміни $Щ/П$ і дозування добавки в межах експериментальних значень змінюються не більш, ніж на 10 %, хоча у віці 3 доби міцність в окремих складів відрізнялася на 40 %.

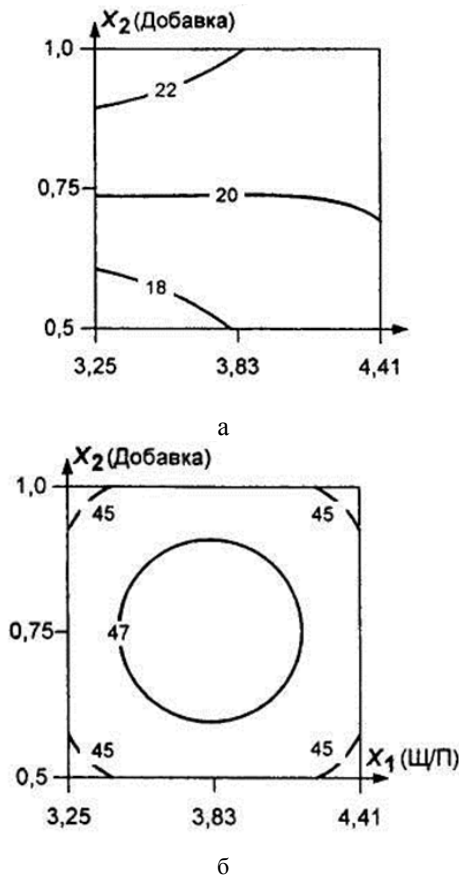


Рис. 2 – Вплив $Щ/П$ і кількості добавки на міцність бетону в віці : а – 3 доби, б – 28 діб

Аналіз всіх отриманих експериментально-статистичних моделей дозволяє графічним методом вибрати оптимальний склад бетону (рис. 3). Виходячи з умов бетонування, можливе застосування тільки достатньо рухливих сумішей, з $OK > 10$ см. Тому зона складів, що не задовольняють даним вимогам, заштри-

хована. Суцільними ізолініями на малюнку показана міцність у віці 3 доби, пунктирними - у віці 28 діб.

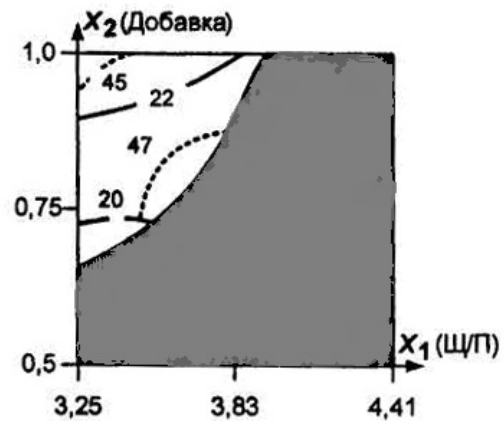


Рис. 3 – Підбір оптимального складу бетону

Як показує аналіз цієї діаграми, до застосування можна рекомендувати тільки склади з підвищеним (більше 0,7 %) витратою добавки і низьким (менше 3,8 %) співвідношенням $Щ/П$. При цьому, у тому випадку, коли необхідно підвищити ранню міцність бетону, дозування добавки треба збільшити до 0,9...1,0 %.

Величина зони оптимальних рішень може бути оцінена методом Монте-Карло. Для цього розраховується велике число випадкових рівномірно розподілених точок і відповідні значення аналізованого показника в цих точках (у даному випадку – для 10000). Отримані в такий спосіб 10000 значень величини порівнюються з нормативом. Відсоток значень величини $Y_{роз}$, більшого нормативу, показує величину зони припустимих рішень P . На рисунку 4 показана графічна реалізація алгоритму визначення величини зони припустимих рішень методом Монте-Карло на прикладі моделі для OK . В даному випадку величина зони оптимальних рішень, у якій $OK > 10$ см, складає 22,2 %.

У цілому, результати досліджень дозволяють рекомендувати до використання в плавучих гідротехнічних спорудах бетон на сульфатостійкому портландцементі М400 Новоамвросівського заводу з пластифікуючою добавкою.

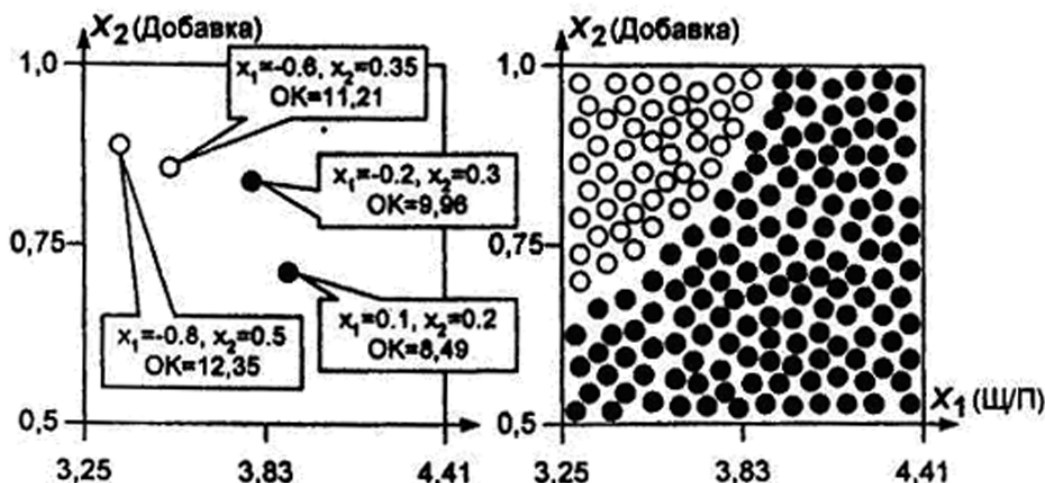


Рис. 4 – Реалізація алгоритму визначення величини зони припустимих рішень методом Монте-Карло

Для проведення інших експериментальних досліджень використовувались матеріали, що застосовуються в залізобетонному суднобудуванні: сульфатостійкий портландцемент марки 400, гранітний щебінь фракцій 3...10 і 10...20 мм, пісок з модулем крупності 1,8 і питна вода, а також хімічні добавки: суперпластифікатор С-3 (як ефективний пластифікатор), кремнійорганічна емульсія КЕ 12-35 (модифікатор гідрофобно-структуруючої дії), нітрит натрію (НН) як інгібітор корозії і ЛІСТ, що застосовується на цей час в залізобетонному суднобудуванні.

Для визначення залежності властивостей бетонних сумішей і бетонів від рецептурно-технологічних факторів дослідження проводились із застосуванням методів математичного планування експерименту і моделювання.

- Змінними факторами були прийняті:
- витрати цементу $X_1 = 600 \pm 100 \text{ кг/м}^3$;
 - рухливість бетонної суміші $X_2 = 10 \dots 20 \text{ см}$;
 - С-3 $X_3 = 0,24\%$;
 - КЕ $X_4 = 1$
 - НН $X_5 = 0,5 \pm 0,5$.

Експеримент проведено за п'ятифакторним планом. Значення ОК відповідають рухливості суміші, необхідної для виготовлення різних елементів споруд. Широкий діапазон змінення сполучної речовини дозволяє виявити в досліджуваному факторному просторі необхідні марки бетону (400, 500, 600), дозування С-3 обмежене значенням 0,24 % в зв'язку з тим, що при збільшенні концентрації С-3 в складі комплексного модифікатора за дослідними даними спостерігається зниження його ефективності, дозування КЕ 12-35 і НН вибрані, виходячи з літературних даних і за результатами попередніх експериментів.

Водовміст сумішей підбирався для кожного рядка плану у відповідності до необхідної рухливості суміші.

Моделювалися:

- міцність бетону на стискання у віці 28 діб;
- водовміст сумішей;
- їх життєздатність (час зменшення рухливості суміші до $OK = 6 \text{ см}$).

По результатах експериментів на комп'ютері розраховувались п'ятифакторні поліноміальні моделі. Так, модель міцності на стискання має вигляд:

$$Y\{R_{\text{ш}}\} = 47,1 + 11X_1 - 4X_2 + 1,7X_3 + 0,6X_4 + 0,6X_1^2 + 0,5X_2^2 + 0,5X_3X_4. \quad (5)$$

Результати оптимізації складу суднобудівних бетонів із заданими експлуатаційними і технологічними властивостями. Аналіз моделей показав, що добавка нітриту натрію не чинить істотного впливу на модельовані властивості, в той же час покращуючи збереження арматури при різних впливах на бетон, тому оптимальним дозуванням нітриту натрію було прийнято 0,5% від маси цементу. Додавання С-3 (при постійних рухливості і вмісті цементу) збільшує міцність на 2...3 МПа за рахунок зниження водовмісту. При постійному В/Ц збільшення концентрації С-3 без зміни міцності покращує рухомість суміші. Практично невідчутний вплив КЕ 12-35 на міцність бетону при її введенні до 0,03%, проте збільшення цього дозування викликає значне, уповільнення процесу твердіння, що технологічно недоцільно. Цікавий і той факт, що при постійній рухливості введення в суміш КЕ 12-35 викликає різке збільшення життєздатності в сполученні з постійною концентрацією С-3.

Обговорення результатів оптимізації складу суднобудівних бетонів із заданими експлуатаційними і технологічними властивостями. Використовуючи метод факторного планування експерименту, можна одержати багато залежностей досліджуваних властивостей бетону, аналогічних виразу (2), тим самим відкривається можливість за допомогою обчислювальної техніки прогнозувати ті чи інші властивості майбутньої бетонної суміші за короткий час з врахуванням зміни параметрів вхідних компонентів у широких межах, а автоматизація вибору і нагромадження самих моделей планування факторних експериментів за виразу (1) ще більше скорочує час і підвищує об'єктивність розглянутого процесу. Це і обумовлює економію часу, енергетичних і матеріальних витрат при розрахунку складу бетонних сумішей і проведенні їх випробувань.

Висновки. В результаті проведених досліджень:

1. Проведена оптимізація складу суднобудівного бетону із заданими експлуатаційними і технологічними властивостями.
2. Отримано рівняння, що є експериментально-статистичною моделлю міцності бетону, яке може бути представлено у вигляді комп'ютерної програми з певним набором обмежень, що дозволяє автоматично складати прогноз властивостей бетону при будь-яких варіаціях інгредієнтів.
3. Отримана можливість за допомогою обчислювальної техніки прогнозувати за короткий час властивості майбутньої бетонної суміші з урахуванням зміни в широкому діапазоні параметрів вихідних компонентів.

Список літератури:

1. Маломан, В. Ф. Впровадження у виробництво нових модифікованих суднобудівних бетонів при будівництві композитних доків та інших плавучих споруд [Текст] / В. Ф. Маломан, В. М. Коннов, Г. П. Клебанов, О. В. Щедролосев, К. В. Кириченко, О. С. Воробйов // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв: НУК, 2017. – С. 63–64.
2. Мишутин, Н. В. Железобетонные плавучие сооружения и перспективы их использования [Текст] / Н. В. Мишутин А. В. Мишутин // Вісник ОДАБА. – 2002. – Вып. 6. – С. 181–187.
3. Мишутин, А. В. Повышение надежности и долговечности бетона тонкостенных железобетонных конструкций, эксплуатируемых в морской среде [Текст] / А. В. Мишутин // Сб. международной инженерной академии. – Одесса: «Астропринт», 2003. – С. 76–79.
4. Мишутин, А. В. Вплив комплексних добавок на водонепроникнення дрібнозернистих бетонів [Текст] / А. В. Мишутин, С. О. Кровяков, О. А. Романов // Вісник ОДАБА. – 2005. – № 20. – С. 273–278.
5. Гофтарш, П. С. Технологические требования к плавучим докам [Текст] / П. С. Гофтарш. – Л.: Судостроение, 1979. – 126 с.

6. Егоров, Н. М. Технология постройки железобетонных судов [Текст] / Н. М. Егоров. – Москва: Речной транспорт, 1961. – 310 с.
7. Билинский, Ю. С. Колебания плавучего дока при ветровом шквале на волнении [Текст] / Ю. С. Билинский, Л. М. Дыхта, В. В. Козляков // Сб. науч. трудов НКИ. Гидродинамика корабля. – 1966. – С. 19–27.
8. Ловягин, М. А. Плавучие металлические доки [Текст] / М. А. Ловягин, В. М. Корсаков, Я. Б. Каганер. – Л.: Судостроение, 1964. – 336 с.
9. Абросимов, К. А. Технология железобетонного судостроения [Текст] / К. А. Абросимов, А. А. Мильто, А. М. Пасинский. – Л.: Судостроение, 1965. – 348 с.
10. Егоров, Н. М. Справочник по железобетонному судостроению [Текст] / Н. М. Егоров, А. А. Мильто, В. И. Миронов, В. Б. Протопопов, И. И. Рыбалов. – Л.: Судостроение, 1978. – 356 с.
11. Танхельсон, Г. В. Железобетонные плавучие доки [Текст] / Г. В. Танхельсон. – Ленинград: Судпромгиз, 1960. – 316 с.
12. Рашковський, О. С. Проектування, технологія і організація побудови композитних плавучих доків [Текст]: навч. пос. / О. С. Рашковський, О. В. Щедролюсєв, Д. В. Єрмаков, О. М. Узлов. – Николаїв: НУК: РАЛ Поліграфія, 2015. – 254 с.
13. Дворкін, Л. Й. Проектування складів бетонів [Текст]: монографія / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Рівне: НУВГП, 2015. – 353 с.
14. Слуцкий, Н. Г. Разработка технологии долговечного модифицированного бетона для композитных плавучих доков [Текст] / Н. Г. Слуцкий // Вестник СевГТУ «Механика, энергетика, экология». – 2009. – № 97. – С. 133–136.
15. Рашковський, А. С. Оптимізація складу бетону для понтонів композитних плавучих доків [Текст] / А. С. Рашковський, Н. Г. Слуцкий // 36. наук. праць НУК. – 2008. – № 5 (422). – С. 17–24.
16. Слуцкий, Н. Г. Строительство железобетонных сооружений в Украине [Текст] / Н. Г. Слуцкий, В. Ф. Маломан, А. С. Рашковський // Рыбное хозяйство Украины. Специальный выпуск «Морские технологии: проблемы и решения – 2004». – 2004. – № 7. – С. 11–14.
17. Слуцкий, Н. Г. Оптимізація железобетонных конструкций понтона композитного плавучего дока [Текст] / Н. Г. Слуцкий // 36. наук. праць НУК. – 2009. – № 4 (421). – С. 78–83.
18. Слуцкий, Н. Г. Технологические особенности бетонов для понтонов композитных плавучих доков [Текст] / Н. Г. Слуцкий // Сб. научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2008». – Одесса: Черноморье, 2008. – С. 27–31.

Bibliography (transliterated):

1. Maloman, V. F., Konnov, V. M., Klebanov, Gh. P., Shchedrolosiev, O. V., Kyrychenko K. V., Vorobjov, O. S. (2017). Introduction of the production of new modified shipbuilding concrete in the construction of composite docks and other floating structures. Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference. Innovations in shipbuilding and ocean engineering. Mykolaiv, 63–64.
2. Mishutin, N. V., Mishutin, A. V. (2002). Ferro-concrete floating structures and prospects of their use. Bulletin of the Odessa State Academy Construction and Architecture, 6, 181–187.
3. Mishutin, A. V. (2003). Increase of reliability and durability of concrete thin-walled reinforced concrete structures exploited in the marine environment. Collection of the International Engineering Academy. Odessa: Astroprint, 76–79.
4. Myshutyn, A. V., Krovjakov, S. O., Romanov, O. A. (2005). Influence of complex additives on waterproofing fine-grained concrete. Astroprint, Bulletin of the Odessa State Academy Construction and Architecture, 20, 273–278.
5. Goftarsh, P. S. (1979). Technological requirements for floating docks. Leningrad: Shipbuilding, 126.
6. Egorov, N. M. (1961). Technology of building ferro-concrete vessels. Moscow: River transport, 310.
7. Bilyanskiy, Yu. S., Dyhta, L. M., Kozlyakov, V. V. (1966). Fluctuations of a floating dock with a wind squall on waves. Proceedings of Admiral Makarov Mykolayiv Institute of Shipbuilding. Hydrodynamics of the ship, 19–27.
8. Lovyagin, M. A., Korsakov, V. M., Kaganer, Ya. B. (1964). Floating metal docks. Leningrad: Shipbuilding, 336.
9. Abrosimov, K. A., Milto, A. A., Pasinskiy, A. M. (1965). Technology of ferro-concrete shipbuilding. Leningrad: Shipbuilding, 348.
10. Egorov, N. M., Milto, A. A., Mironov, V. I., Protopopov, V. B., Ryibalov, I. I. (1978). Reference book on reinforced concrete shipbuilding. Leningrad: Shipbuilding, 356.
11. Tanhelson, G. V. (1960). Reinforced concrete floating docks. Leningrad: Sudpromgiz, 316.
12. Rashkovskiy, O. S., Shchedrolosiev, O. V., Yermakov, D. V., Uzlov, O. M. (2005). Design, technology and organization of building composite floating docks. Nikolayev: Admiral Makarov National University of Shipbuilding – RAL Polygraphy, 254.
13. Dvorkin, L. J., Dvorkin, O. L. (2015). Design of concrete warehouse. Rivne: National University of Water Management and Nature Management, 353.
14. Slutsky, N. G. (2009). Development of the technology of durable modified concrete for composite floating docks. Bulletin of the SevSTU, 97, 133–136.
15. Rashkovskiy, A. S., Slutsky, N. G. (2008). Optimization of the composition of concrete for pontoons of composite floating docks. Proceedings of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 5 (422), 17–24.
16. Slutsky, N. G., Maloman, V. F., Rashkovskiy, A. S. (2004). Construction of ferroconcrete floating structures in Ukraine. Fisheries of Ukraine. Special issue "Marine technologies: problems and solutions – 2004", 7, 11–14.
17. Slutsky, N. G. (2009). Optimization of reinforced concrete pontoon structures of a composite floating dock. Proceedings of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 4 (421), 78–83.
18. Slutsky, N. G. (2008). Technological features of concrete for pontoons of composite floating docks. Collection of scientific papers on materials of the international scientific and practical conference "Modern Directions of Theoretical and Applied Research 2008". Odessa: Black Sea Coast, 27–31.

Надійшла (received) 02.12.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимізація складу суднобудівного бетону із заданими експлуатаційними і технологічними властивостями/ Кириченко К. В., Щедролюсєв О. В., Рашковський О. С. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266).– P.20–27. – Bibliogr.:18. – ISSN 2079-5459

Оптимізація складу суднобудівного бетону з заданими експлуатаційними і технологічними властивостями/ Кириченко К. В., Щедролюсєв О. В., Рашковський О. С. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266).– P.20–27. – Bibliogr.:18. – ISSN 2079-5459

Optimization of the shipbuilding concrete with set points of operational and technological properties/ Kyrychenko K., Shchedrolosiev O., Rashkovskiy O. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266).– P.20–27. – Bibliogr.:18. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кириченко Костянтин Володимирович – аспірант кафедри «Будівництва та ремонту суден», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; пр. Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна, 54025; E-mail: kostiantynkyrychenko@nuos.edu.ua.

Кириченко Константин Владимирович – аспірант кафедри «Строительства и ремонта судов», Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова; пр. Героев Украины, 9, г. Николаев, Украина, 54025; e-mail: kostiantynkyrychenko@nuos.edu.ua.

Щедролюсєв Олександр Вікторович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Будівництва та ремонту суден», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; пр. Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна, 54025; e-mail: aleksandr.schedrolosev@nuos.edu.ua.

Щедролюсєв Александр Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительства и ремонта судов», Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова; пр. Героев Украины, 9, г. Николаев, Украина, 54025; e-mail: aleksandr.schedrolosev@nuos.edu.ua.

Рашковський Олександр Саулович – доктор технічних наук, професор кафедри «Будівництва та ремонту суден», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; пр. Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна, 54025; e-mail: olexandr.rashkovskiy@nuos.edu.ua.

Рашковский Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительства и ремонта судов», Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова; пр. Героев Украины, 9, г. Николаев, Украина, 54025; e-mail: olexandr.rashkovskiy@nuos.edu.ua.

Kyrychenko Kostiantyn – Postgraduate Student at the Department of «Construction and ship repair», Admiral Makarov National University of Shipbuilding; Heroes of Ukraine, 9, Mykolaiv, Ukraine, 54025; e-mail: kostiantynkyrychenko@nuos.edu.ua.

Shchedrolosiev Oleksandr – doctor of technical science, professor, head of the Department of «Construction and ship repair», Admiral Makarov National University of Shipbuilding; Heroes of Ukraine, 9, Mykolaiv, Ukraine, 54025; e-mail: aleksandr.schedrolosev@nuos.edu.ua.

Rashkovskiy Oleksandr – doctor of technical science, professor at the Department of «Construction and ship repair», Admiral Makarov National University of Shipbuilding; Heroes of Ukraine, 9, Mykolaiv, Ukraine, 54025; e-mail: olexandr.rashkovskiy@nuos.edu.ua.