

**ДОВГОВІЧНІСТЬ БЕТОНІВ НА ВАПНЯКОВОМУ ЩЕБЕНІ,
ОБРОБЛЕНОМУ ЦЕМЕНТНОЮ СУСПЕНЗІЄЮ**

Мішутін А.В., д.т.н., професор,
Кровяков С.О., к.т.н., доцент,
Полторапавлов А.О., аспірант,
Одеська державна академія будівництва та архітектури
skrovyakov@ukr.net

Анотація. Досліджено міцність, водонепроникність і морозостійкість бетонів на вапняковому щебені (марка щебеню за міцністю 600). Виготовлялися дві паралельні серії зразків: перша готувалася за традиційною технологією, друга – з попередньою обробкою щебеню цементною суспензією. В обох серіях варіювалося кількість мікрокремнезему і суперпластифікатору С-3. Встановлено, що найбільшу міцність при стиску і довговічність мають бетони при кількості мікрокремнезему 20-25 кг/м³ і добавки С-3 близько 0,9 % від маси цементу. Застосування попередньої обробки пористого щебеню підвищує водонепроникність бетону та його міцність при стиску.

Ключові слова: вапняковий щебень, обробка заповнювача, мікрокремнезем, морозостійкість, водонепроникність, довговічність.

**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНОВ НА ИЗВЕСТНЯКОВОМ ЩЕБЕНЕ,
ОБРАБОТАННОМ ЦЕМЕНТНОЙ СУСПЕНЗИЕЙ**

Мишутин А.В., д.т.н., профессор,
Кровяков С.А., к.т.н., доцент,
Полторапавлов А.А., аспирант,
Одесская государственная академия строительства и архитектуры
skrovyakov@ukr.net

Аннотация. Исследована прочность, водонепроницаемость и морозостойкость бетонов на известняковом щебне (марка щебня по прочности 600). Изготавливались две параллельные серии образцов: первая готовилась по традиционной технологии, вторая – с предварительной обработкой щебня цементной суспензией. В обеих сериях варьировалось количество микрокремнезема и суперпластификатора С-3. Установлено, что наибольшую прочность при сжатии и долговечность имеют бетоны при количестве микрокремнезема 20-25 кг/м³ и добавки С-3 около 0.9 % от массы цемента. Применение предварительной обработки пористого щебня повышает водонепроницаемость бетона и его прочность при сжатии.

Ключевые слова: известняковый щебень, обработка заполнителя, микрокремнезем, морозостойкость, водонепроницаемость, долговечность.

**DURABILITY OF CONCRETES ON LIMESTONE CRUSHED STONE
TREATED WITH CEMENT SLURRY**

Mishutin A.V., Doctor of Engineering, Professor,
Kroviakov S.O., PhD., Assistant Professor,
Poltorapavlov A.O., graduate student
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
skrovyakov@ukr.net

Abstract. Strength, water resistance and frost resistance of concrete with limestone rubble was investigated. The rubble grade was used for strength 600. Two parallel series of samples were produced. The first series was made by traditional technology. The second series was made with preliminary treatment of rubble with a cement slurry.

In both series, the amount of silica fume varied from 0 to 40 kg/m³ and superplasticizer S-3 from 0.5 to 1%. All the mixtures had equal mobility. The W/C mixture decreases with an increase in the amount of S-3 and conversely increases with the introduction of silica fume.

The greatest compressive strength, frost resistance and water resistance are concretes with a quantity of silica fume of 20-25 kg/m³ and additive S-3 of about 0.9%. The use of preliminary treatment of porous gravel increases the water resistance of concrete and its compressive strength. The positive effect of crushed stone processing can be explained by hardening the porous aggregate and contact zone, as well as increasing the uniformity of the rubble.

Maximum compression strength of concrete of 60 MPa, tensile strength of 8 MPa, water resistance W14, frost resistance F400. Thus, modified concrete on limestone crushed stone provides high durability of structures.

Keywords: limestone crushed stone, aggregate treatment, silica fume, frost resistance, water resistance, durability.

Вступ. В складі більшості бетонів на основі цементних в'язучих найбільшу за об'ємом частку займає крупний заповнювач. Відповідно, навіть при порівняно низькій ціні заповнювача, завдяки необхідності організації транспортування і складування, витрати на заповнювач складають відчутну частку в собівартості бетону. При будівництві транспортних і гідротехнічних споруд вартість доставки заповнювачів може суттєво збільшувати вартість робіт.

Україна має значні поклади важкорозчинних карстуючих порід, переважно карбонатних (вапняки, доломіт, крейда), причому вони розповсюджені майже на усій території країни. Але в будівельній практиці традиційно використовуються конструкційні бетони переважно на гранітному щебені. Відповідно, як з економічної, так і з екологічної точки зору актуальною залишається задача підвищення якості бетонів на вапняковому щебені для досягнення можливості більш широкого використання подібних композитів.

Аналіз останніх досліджень. Відомо, що при правильному проектуванні складу, бетони на пористих заповнювачах мають високу міцність при порівняно низькій щільності, обмежену усадку і повзучість, що дозволяє виготовляти великорозмірні вироби [1]. Багаторічний досвід застосування конструкцій із бетонів на пористих заповнювачах в цивільному, промисловому і гідротехнічному будівництві показав ефективність даного матеріалу [2].

Для бетонів на щільних заповнювачах значна різниця у величинах коефіцієнтів лінійного температурного розширення і модулів пружності компонентів бетону може призводити до розущільнення структури при навантаженнях. Це призводить до утворення тріщин в контактній зоні на границі крупного заповнювача і затверділої розчинної частини бетону. На бетони на пористих заповнювачах цей негативний фактор впливає в істотно меншій мірі, тому що співвідношення коефіцієнтів лінійного температурного розширення і модулів пружності заповнювача з розчинною частиною бетону, що проникнула в його пори, може наближатися до одиниці [3]. Також однією з переваг застосування пористих заповнювачів є їх здатність забезпечувати внутрішній догляд в процесі структуроутворення бетону (внутрішній водний догляд). Тобто при забезпеченні належної технології приготування суміші, саме пористі заповнювачі є ефективними запобіжниками надмірних усадкових деформацій та тріщиноутворення при твердінні бетону [4]. Крім того, підтримання належної внутрішньої вологості забезпечує більш високу ступінь гідратації в'язучого, що покращує показники водонепроникності та морозостійкості бетону [5]. Це пов'язано з тим, що в процесі структуроутворення пори краще заповнюються продуктами гідратації цементу, відповідно знижується відкрита пористість і проникність бетону [6].

Властивості матеріалу обумовлюються його структурою, при цьому модель структури, яка розглядається дослідником, має бути у співвідношенні з конкретним виробом або конструкцією [7]. Наприклад, для бетонів на пористих заповнювачах пористість регулюється, як на рівні заповнювач, так і на рівні розчинної складової. Це дозволяє отримувати матеріали, що мають сприятливу для формування мікроклімату сорбційну вологість. При правильному призначенні складу бетонів на пористих заповнювачах забезпечується первинний захист арматури від корозії без додаткових витрат.

Як зазначалося вище, Україна має значні поклади вапняків – державним балансом запасів налічується 171 родовище [8]. Проте властивості природних заповнювачів навіть одного типу можуть досить істотно відрізнятися залежно від родовища їх походження. Більше того, в межах одного родовища можуть знаходитися породи різного складу і різної щільності, що впливає на однорідність заповнювача. Тому для природних пористих заповнювачів процес їх збагачення, який, як правило, включає операції підвищення однорідності за щільністю та міцністю, поліпшення форми зерен і зменшення вмісту домішок, є дуже важливим [9].

Відповідно, властивості бетонів на вапнякових заповнювачах доцільно досліджувати фактично окремо для кожного родовища вапняку і робити це з врахуванням різних вимог до бетону, який необхідно отримати. При цьому крім механічних властивостей обов'язково визначати довговічність даних матеріалів у типових для них умовах експлуатації.

Метою роботи є підвищення довговічності і міцності бетонів на вапняковому щебені завдяки застосуванню модифікаторів і технологічного прийому обробки крупного пористого заповнювача цементною суспензією.

Об'єкти і методи дослідження. Властивості бетонів на вапняковому щебені досліджувалися із застосуванням методів планування експерименту. За оптимальним 2-о факторним планом проводився експеримент, у якому варіювалися наступні фактори складу [10]:

X_1 – кількість мікрокремнезему, від 0 до 40 кг/м³;

X_2 – кількість суперпластифікатору С-3, від 0,5 до 1,0% від маси цементу.

Кількість портландцементу у всіх складах становила 450 кг/м³. У якості крупного заповнювача застосовувався вапняковий щебінь Великодолинського кар'єру (Одеська область) фракції 5-20 мм з насипною щільністю 1200 кг/м³. Даний щебінь має марку 600 за міцністю. Вміст пилоподібних і глинистих частинок у щебені – 2,5%, глини в грудках у щебені не виявлено. Також в якості компонентів бетону використовувалися кварцовий пісок з $M_{кр}=2,6$ (Вознесенський район, Миколаївської області), портландцемент М400 Одеського цементного заводу і мікрокремнезем Нікопольського заводу феросплавів.

Всі дослідження виконувалися на двох паралельних серіях зразків. У контрольній серії (індекс «к») змішування проводилося за традиційною технологією з послідовним завантаженням у змішувач щебеню, який безпосередньо у змішувачі зволожувався водою в обсязі 10% від загальної кількості води необхідної для суміші, піску, портландцементу, мікрокремнезему і води з добавкою. У другій серії (індекс «о») змішування проводилося із застосуванням прийому попередньої обробки пористого вапнякового щебеню цементною суспензією. Для цього у змішувач подавалася вся необхідна вода з добавкою С-3 і 30% від необхідної кількості портландцементу і мікрокремнезему. Після однієї хвилини перемішування цементної суспензії (для досягнення однорідності) у змішувач подавався вапняковий щебінь, який далі оброблявся даною суспензією теж протягом однієї хвилини, для цього фактично продовжувалося перемішування. Далі в змішувач подавався пісок і решта цементу та мікрокремнезему і суміш перемішувалася до досягнення однорідності. Таким чином, загальний час перемішування суміші був приблизно на одну хвилину довше, ніж час приготування суміші традиційним способом.

Результати досліджень. Всі досліджені в обох серіях суміші мали рівну рухомість П2 (ОК = 4-6 см), відповідно їх В/Ц залежало від складу бетону і змінювалося у діапазоні від 0,40 до 0,52. Було встановлено, що на рівень В/Ц не впливає технологія приготування суміші

– традиційна або з попередньою обробкою щебеню цементною суспензією. При підвищенні кількості суперпластифікатору С-3 В/Ц суміші знижується, а при введенні мікрокремнезему навпаки підвищується на 10-12%.

На рис. 1 показана діаграма, яка відображає вплив кількості добавки С-3 і мікрокремнезему на міцність при стиску досліджених в обох серіях бетонів на вапняковому щебені. Аналіз діаграми показує, що максимальну міцність мають склади при кількості добавки С-3 0,8-0,9%. При введенні мікрокремнезему у кількості 20-25 кг/м³ міцність бетону зростає досить істотно, подальше підвищення кількості цього модифікатору неефективне.

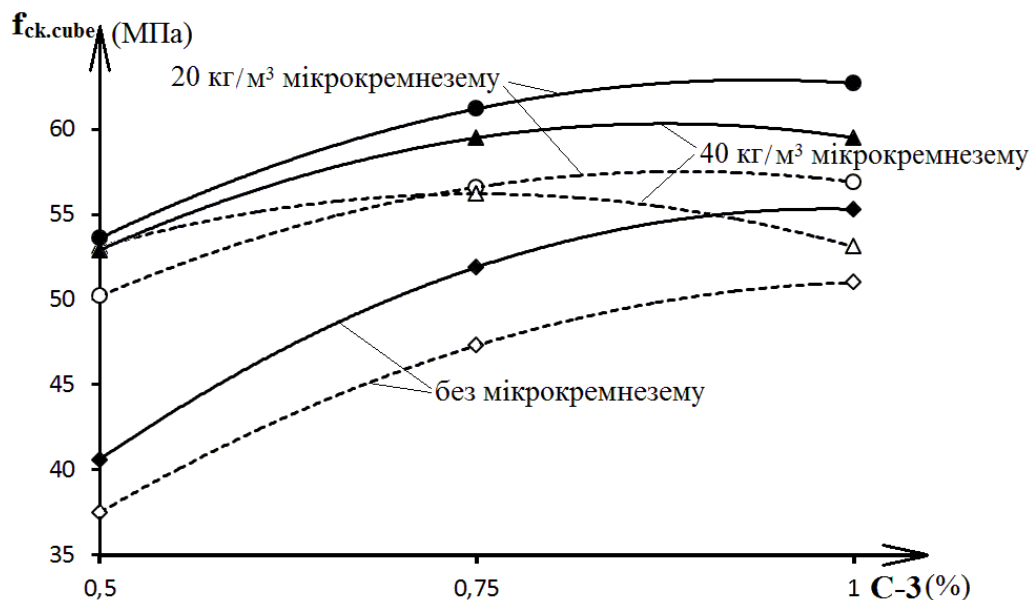


Рис. 1. Вплив кількості добавки С-3 і мікрокремнезему на міцність при стиску бетонів на вапняковому щебені:
 --- приготування за традиційною технологією,
 — на обробленому цементною суспензією щебені

Завдяки застосуванню технологічного прийому обробки пористого щебеню цементною суспензією міцність бетонів на вапняковому щебені підвищувалась на 3-5 МПа. Даний ефект можна пояснити, по-перше, зміцненням поверхневого шару крупного заповнювача та перехідної зони між заповнювачем і розчинною частиною бетону, а по-друге, покращенням однорідності природнього щебеню при обробці. Тобто більш пористі та тріщинуваті зерна, які є слабкішими і відповідно руйнуються при меншому навантаженні, завдяки насиченню в'язучим менше відрізняються від більш щільних зерен, що робить структуру бетону одноріднішою.

Аналіз міцності досліджених бетонів на розтяг при згині показав, що на відміну від міцності при стиску, величина цього показника не залежить від технології приготування суміші. Це можна пояснити тим, що міцність заповнювача в меншій мірі впливає на здатність композита протидіяти навантаженням розтягування, ніж навантаженням стискання. На рис. 2 показана діаграма, яка відображає вплив кількості добавки С-3 і мікрокремнезему на величину міцності бетону на розтяг при згині. Аналіз діаграми показує, що при підвищенні кількості суперпластифікатору з 0,5 до 1% міцність досліджених бетонів при згині збільшується приблизно на 1 МПа для складів без мікрокремнезему і на 1,5 МПа для складів з максимальним вмістом 40 кг/м³ мікрокремнезему. Відповідно введення мікрокремнезему викликає збільшення величини f_{ctk} на 0,6 МПа для складів з мінімальною кількістю суперпластифікатору, проте майже не впливає на міцність на розтягування при згині за умови застосування максимальної кількості С-3.

Відомо, що довговічність більшості конструкцій гідротехнічних і транспортних споруд в типових для України кліматичних умовах залежить переважно від морозостійкості та

водонепроникності бетону [11]. Водонепроникність обумовлює стійкість бетону до корозії першого і частково другого типу (за класифікацією В.М. Москвіна), а також швидкість карбонізації в конструкції. Для обох досліджених серій (приготовлених за традиційною технологією та на обробленому цементною суспензією щебені) визначалися рівні водонепроникності та морозостійкості бетону.

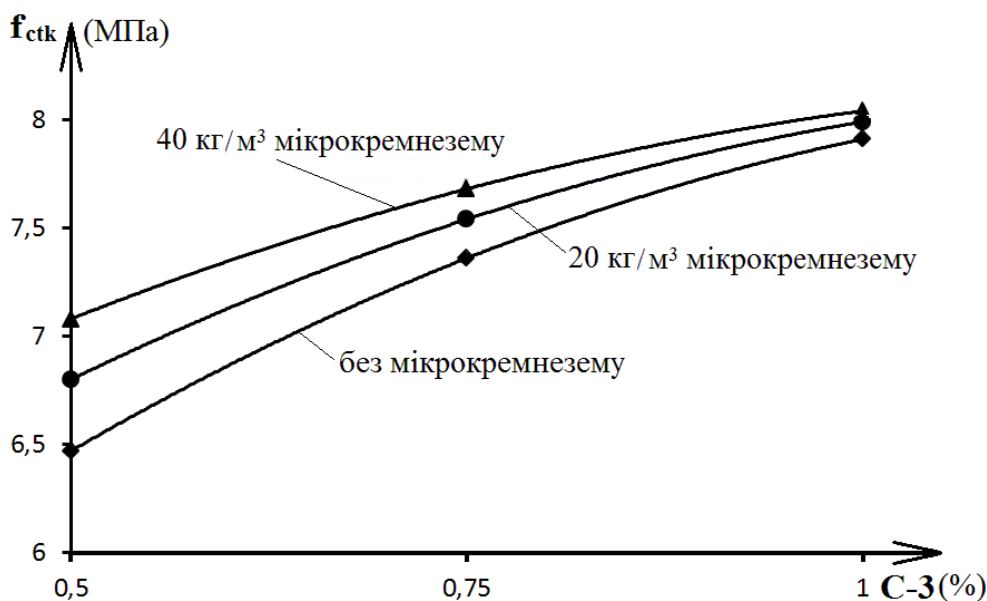


Рис. 2. Вплив кількості добавки С-3 і мікрокремнезему на міцність на розтяг при згині бетону на вапняковому щебені (для обох серій)

ЕС-моделі, що описують вплив варійованих факторів складу на водонепроникність досліджених бетонів на вапняковому щебені в двох серіях мають вигляд:

$$W_K (\text{атм}) = 13.3 + 0.3x_1 - 3.0x_1^2 - 0.5x_1x_2 + 1.3x_2 - 2.0x_2^2 \quad (1)$$

$$W_O (\text{атм}) = 14.0 + 0.7x_1 - 2.0x_1^2 - 1.0x_1x_2 + 1.0x_2 - 1.0x_2^2 \quad (2)$$

Слід зазначити, що точність ЕС-моделей (1) і (2) суттєво обмежена через специфіку дискретної методики визначення водонепроникності бетону. Тобто існують і визначаються лише марки W0, W2, W4 і так далі. Саме цей досить «широкий» крок показника і впливає на точність побудови моделей, проте він не змінює загальні тенденції впливу факторів, що варіювалися, на показник W.

На рис. 3 показані побудовані за ЕС-моделями (1) і (2) діаграми, що відображають вплив кількості мікрокремнезему та добавки С-3 на водонепроникність досліджених бетонів на вапняковому щебені. Як можна побачити з діаграми, завдяки підвищенню кількості суперпластифікатора С-3 з 0,5 до 0,9% водонепроникність бетонів підвищується на величину від однієї до двох марок. Тобто даний модифікатор ефектно підвищує довговічність бетону завдяки зниженню В/Ц бетонної суміші рівної рухомості. При цьому важливо відмітити, що підвищення кількості добавки С-3 більш ефективно впливає на рівень W бетонів без мікрокремнезему (показник водонепроникності зростає в середньому на 2 марки). Для складів з вмістом мікрокремнезему 20 кг/м³ і більше при підвищенні кількості С-3 до 0,9% рівень W бетону зростає трохи більше, ніж на одну марку. Це пояснюється тим, що активна мінеральна добавка мікрокремнезем також ефективно впливає на рівень W, відповідно вплив суперпластифікатора стає менш відчутним у модифікованих бетонах з більш щільною структурою. Слід також відмітити, що водонепроникність бетонів на

обробленому цементною суспензією щебені була дещо вищою порівняно з цим показником у бетонів, приготовлених за традиційною технологією. Різниця в рівнях W в окремих зонах факторного простору складала до 2-х атмосфер, тобто до однієї марки. Цей ефект можна пояснити зменшенням наскрізної пористості вапнякового заповнювача завдяки обробці, що безпосередньо впливає на здатність композиту опиратися проникненню вологи під тиском.

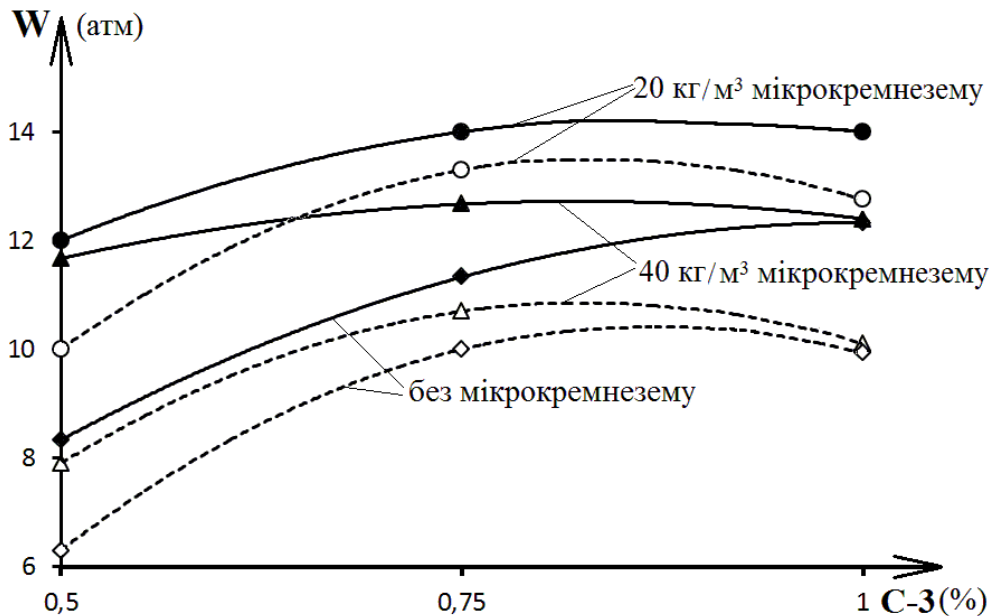


Рис. 3. Вплив кількості добавки С-3 і мікрокремнезему на водонепроникність бетонів на вапняковому щебені:
 --- приготовлених за традиційною технологією,
 — на обробленому цементною суспензією щебені

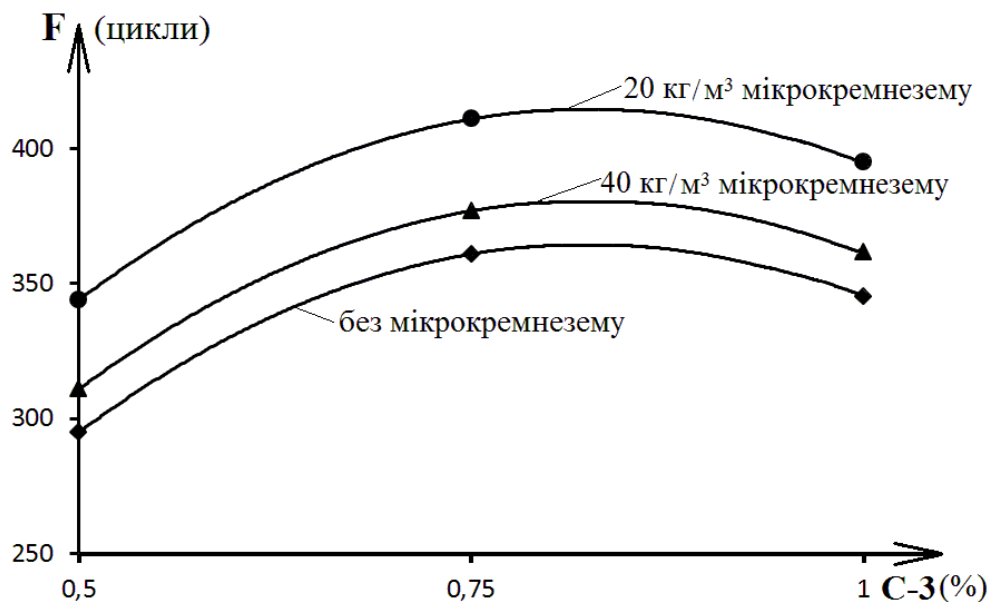


Рис. 4. Вплив кількості добавки С-3 і мікрокремнезему на морозостійкість бетонів на вапняковому щебені (для обох серій)

Проведені дослідження показали, що морозостійкість обох серій бетонів на вапняковому щебені, тобто приготовлених за традиційною технологією та на обробленому цементною суспензією щебені, не відрізняється між собою. Фактично точність визначення показника F не дозволяє обґрунтовано розрізняти морозостійкість бетонів однакових складів

в двох досліджених серіях. На рис. 4 показана діаграма, яка відображає вплив кількості добавки С-3 і мікрокремнезему на морозостійкість бетону. Аналіз діаграми показує, що загальний характер впливу обох факторів складу, які варіювалися у експерименті, на морозостійкість є досить схожим. При підвищенні значення фактора до певного «раціонального» рівня показник F зростає, при подальшому зростанні рівня знижується. Відповідно область найбільшої морозостійкості у межах факторного простору знаходиться при кількості мікрокремнезему приблизно $20-25 \text{ кг/м}^3$ та добавки С-3 від 0,8 до 0,9% від маси цементу.

Висновки. Досягнутий рівень водонепроникності бетонів на вапняковому щебені (W12) при застосуванні $20-25 \text{ кг/м}^3$ мікрокремнезему та 0,9% суперпластифікатору С-3 забезпечує високу довговічність даного матеріалу при експлуатації у контакті з водою, а також захищає від корозії в жорстких умовах. Попередня обробка пористого щебеню цементною суспензією дозволяє підвищити міцність при стиску бетону на 3-5 МПа та водонепроникність на величину до однієї марки. Це можна пояснити зміцненням поверхневого шару крупного заповнювача при обробці, відповідно зміцненням перехідної зони між заповнювачем і розчинною частиною бетону, а також покращенням однорідності природнього щебеню.

Література

1. Гідротехнічні та дорожні бетони / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.С. Дорофєєв, А.В. Мішутін. – Одеса: Евен, 2012. – 214 с.
2. Бабич Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях / Е.М. Бабич. – К.: Вища школа, 1988. – 208 с.
3. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций / [Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, В.Н. Ярмаковский, В.Т. Ерофеев] – Архитектура и строительство, 2015. – №1. – С. 93-102.
4. Lightweight aggregate as internal curing agent to limit concrete shrinkage / [J. Browning, D. Darwin, D. Reynolds, B. Pendergrass] – ACI Materials Journal, 2011, November-December. – P. 638-644.
5. Афанасьева В.Ф. Дефекты в конструкциях в процессе строительства и современные приемы их устранения / В.Ф. Афанасьева. – Технологии бетонов, 2014. – № 7. – С. 33-37.
6. Curing of Concrete. Datasheet. – Cement Concrete & Aggregates Australia. – April 2006. – 7 p. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.boral.com.au/brochures/ordering/PDF/DS2006Curing.pdf?pdfName=DS2006Curing.pdf>
7. Суханов В.Г. Структура материала в структуре конструкции / В.Г. Суханов, В.Н. Выровой, О.А. Коробко. – Одесса: Полиграф, 2016. – 244 с.
8. Мала гірнича енциклопедія, т. 1 / За редакцією В.С.Білецького. – Донецьк: Донбас, 2004. – 640 с.
9. Ицкович С.М. Технология заполнителей бетона / С.М. Ицкович, Л.Д. Чумаков, Ю.М. Баженов. – М.: Высшая школа, 1991. – 272 с.
10. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К.: Вища школа, 1989. – 327 с.
11. Мишутин А.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений / А.В. Мишутин, Н.В. Мишутин. – Одесса: Эвен, 2011. – 292 с.

Стаття надійшла 29.06.2017