

УДК 666.96

ВПЛИВ РЕЦЕПТУРИ НА ВЛАСТИВОСТІ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНОГО БЕТОНУ

О.В. КОВАЛЕНКО, канд. тех. наук,

О.Ю. ЮЗЮК, аспірант

Інститут водних проблем і меліорації НААН

Наведено результати досліджень впливу рецептури на технологічні та фізико-механічні властивості самоущільнювального бетону як матеріалу для ремонту та відновлення залізобетонних гідротехнічних споруд водогосподарсько-меліоративного комплексу.

Ключові слова: самоущільнювальний бетон, рецептура, фізико-механічні властивості, технологічні властивості, експериментально-статистичні моделі

Актуальність проблеми. Гідротехнічні споруди (ГТС) водогосподарсько-меліоративного комплексу (ВМК) в процесі довготривалої експлуатації зазнали значних руйнувань і потребують проведення ремонтно-відновлювальних робіт (РВР). Ремонт і реконструкція ГТС ВМК є однією з актуальних проблем останніх років та потребують застосування ефективних технологій з використанням матеріалів із високими технологічними та фізико-механічними властивостями.

Найбільший обсяг робіт при ремонті ГТС ВМК займає бетонування. Переважна більшість залізобетонних конструкцій ГТС насичені арматурою, закладними елементами та мають складну конфігурацію, що ускладнює подачу і розподіл бетонної суміші, перешкоджає переміщенню її всередині бетонованого об'єму і ускладнює або робить неможливим якісне ущільнення суміші вібраторами. Особливості конструкцій гідротехнічних споруд обумовлюють необхідність вести бетонування литими бетонними сумішами, здатними самопливом заповнювати бетонований простір без ущільнення вібраторами. Застосування таких сумішей дає можливість для широкого кола конструкцій знизити трудовитрати на укладання бетону, прискорити темпи бетонування з використанням бетононасосів. Для переважної більшості залізобетонних конструкцій, особливо при виконанні ремонтних робіт, таким бетонам немає альтернативи.

Досвід будівництва та ремонту ГТС із застосуванням традиційних литих бетонних сумішей показав ряд їх недоліків, які пов'язані з недостатньо високими показниками міцності, морозостійкості, адгезійної міцності, водонепроникності та тріщиностійкості бетону [1]. Ці обставини змушують шукати нові, більш досконалі модифікації литих бетонних сумішей, розширювати масштаби їх застосування.

Успіхи у створенні сучасних ефективних, високотехнологічних, високо функціональних бетонів (High Performance Concrete, HPC) з високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями відкривають нові перспективи застосування цього матеріалу в будівництві [2]. До таких бетонів належать самоущільнювальні бетони (СУБ), які отримують модифікацією бетонних сумішей органо-мінеральними добавками, до складу яких входять полікарбоксилатні суперпластифікатори останнього покоління та активні мінеральні наповнювачі (мікрокремнезем, метаколін).

Аналіз попередніх досліджень. СУБ – це бетони, одержані із особливо високорухомих бетонних сумішей, які здатні самопливом під дією власної ваги заповнювати простір, що бетонується, та які практично не потребують використання механічної вібрації. У німецькій мові СУБ отримав скорочену назву SVB (selbstverdichtender beton), в англійській – SCC (self-compacting concrete), у французькій – ВАР (béton autoplaçant). До самоущільнювальних бетонних сумішей (СУБС) належать суміші, розплив конуса яких складає 550–850 мм (рис. 1).

Висока рухомість та самоущільнення бетонної суміші забезпечують відсутність розшарування між крупним заповнювачем та розчиною частиною при переміщенні бетонної суміші через ділянки конструкції з високою концентрацією арматурних стержнів та високу структурну однорідність бетону.

СУБС, як напрямок в технології приготування бетонних сумішей, виділився завдяки дослідженням японських вчених Х. Окамури, К. Маєкави та К. Озави, проведеним у кінці 1980-х років [3-5]. У 1988 р. вперше був представлений прототип СУБ. У 2004 році п'ять європейських організацій: Bureau International du Béton Manufacturé (BIBM),



Рис. 1. Самоущільнювальна бетонна суміш

European Cement Association (CEMBUREAU), The European Ready-mix Concrete Organisation (ERMCO), The European Federation of Concrete Admixture Associations (EFCA), The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC) створили «Європейську групу з проекту» задля оцінювання накопиченого досвіду застосування СУБ та підготовки документа, який охоплював би всі аспекти СУБ. У розробленому документі «The European Guidelines for Self-Compacting Concrete» («Європейське керівництво з самоущільнювального бетону») наведено склади бетонних сумішей для виробництва СУБ, методи випробування, інформацію про матеріали [6].

Основними галузями використання СУБ є висотне будівництво, атомні електростанції, морські гідротехнічні споруди, мости, різні інженерні споруди, дорожні покриття, монолітні та збірно-монолітні спеціальні споруди, покриття аеродромів, злітно-посадкових смуг, монолітних конструкцій стартових комплексів для космічних систем та інших спеціальних об'єктів. В Японії із СУБ виготовляється біля 50% нових залізобетонних конструкцій, в Європі – 7-10% об'єму бетону, що виробляється [7].

Незважаючи на численні дослідження інформація про вплив рецептури на властивості СУБ як матеріалу для конструкційного ремонту та відновлення залізобетонних ГТС в науковій літературі обмежена. Метою цієї роботи було встановлення впливу рецептури на технологічні та фізико-механічні властивості СУБ.

Методика досліджень. У дослідженнях застосовували матеріали: портландцемент ПЦ І-500 виробництва ВАТ «Волиньцемент», щебінь гранітний фракції 5-10 Коростеньського кар'єру, пісок річковий Дніпровський з модулем крупності $M_{кр} = 1,49$, метакаолін (МТК) виробництва ТОВ «МетаД», суперпластифікатор (СП) на основі ефірів полікарбонату марки Adium 150. Бетонні суміші готували з використанням ручного електроміксера в три етапи: спочатку перемішували сухі компоненти протягом 5 хв., потім готували рідку фазу шляхом перемішування води і суперпластифікатора, насамкінець суміш сухих компонентів перемішували з рідкою фазою протягом 5 хв. Витрата цементу для всіх зразків становила 450 кг/м^3 , піску – 940 кг/м^3 , щебеню – 940 кг/м^3 . Бетонні зразки формували методом наливу сумішей у відповідні форми.

Рухомість бетонних сумішей визначали за діаметром розпливу конуса згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002 Суміші бетонні. Методи випробувань; міцнісні показники бетону – згідно ДСТУ Б В.2.7-214: 2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності – за контрольними зразками; водопоглинання – згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності.

Бетонні зразки-балочки розміром $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$ і куби розміром $7,07 \times 7,07 \times 7,07 \text{ см}$ витримували в нормально-вологих умовах протягом 28 діб. Дозування добавок розраховували по відношенню до маси цементу. Дослідження проводили із застосуванням методу математичного планування експерименту. Умови планування експерименту наведено в табл. 1.

Результати досліджень. Матриця планування експерименту та результати випробувань наведені в табл.2. Як видно із даних табл.2 в залежності від рецептури рухомість бетонних сумішей становить 370...770 мм, міцність при стиску бетону – 46,1...62,7, міцність при згині – 8,4...9,9, водопоглинання – 5,13...6,07%. З підвищенням рухо-

1. Умови планування експерименту при дослідженні СУБ

Фактори рецептури	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
X_1 , водоцементне відношення, В/Ц	0,40	0,42	0,44	0,02
X_2 , вміст СП в суміші, % від маси цементу	1,00	1,2	1,4	0,2
X_3 , вміст МТК в суміші, % від маси цементу	5	10	15	5

мості бетонних сумішей фізико-механічні показники бетону знижуються.

СУБ, отримані на основі сумішей досліджуваних рецептур, відповідають вимогам, що пред'являються до бетонів для конструкційного ремонту залізобетонних споруд (згідно EN 1504): їх міцність при стиску > 45 МПа. Однак, не вся область рецептур відповідає вимогам, що пред'являються до самоупільнювальних бетонних сумішей (СУБС): їх рухомість повинна бути ≥ 550 мм. Для оптимізації рецептури СУБ, як матеріалу для конструкційного ремонту залізобетонних споруд необхідно вирішувати компромісну задачу: область рецептур повинна задовольняти вимогам як за рухомістю бетонних сумішей, так і за міцнісними показниками бетону.

У результаті реалізації плану експерименту отримані експериментально-статистичні (ЕС) моделі, які виражають вплив рецептури на рухомість бетонних сумішей та на фізико-механічні властивості бетону:

$$D_{p.k.} = 570 + 90x_1 + 35x_2 - 97x_3 - 10x_1^2 + 20x_2^2 + 20x_1x_2 + 34x_1x_3 + 11x_2x_3 \quad (1)$$

$$f_{cm} = 54,3 - 4,6x_1 - 0,5x_2 + 3,5x_3 + 2,4x_1^2 - 0,9x_3^2 + 1,3x_1x_3 \quad (2)$$

$$f_{ctd} = 8,98 - 0,42x_1 + 0,41x_3 + 0,22x_1^2 - 0,13x_3^2 + 0,1x_1x_3 \quad (3)$$

$$W_m = 5,57 + 0,24x_1 \quad (4)$$

Аналіз моделей 1-4 показує, що рецептура чинить суттєвий вплив на рухомість бетонних

сумішей і в меншій мірі на фізико-механічні властивості бетону. На величину рухомості бетонної суміші позитивно впливають два фактори: X_1 (величина В/Ц) та X_2 (вміст СП), при переважному впливі величини В/Ц; фактор X_2 (вміст МТК) негативно впливає на цей показник. Вплив указаних факторів на міцнісні властивості бетону обернений за знаком: із збільшенням В/Ц та вмісту СП міцність бетону знижується, а із збільшенням вмісту МТК – зростає. Величина В/Ц чинить переважний вплив на міцнісні характеристики бетону, вміст СП незначно впливає на міцність при стиску, а його вплив на міцність при згині не проявляється. Величина водопоглинання бетону збільшується із збільшенням В/Ц, вплив модифікуючих добавок СП та МТК на цей показник не виявлено.

Графічне зображення моделей 1-3 наведено на рис. 2-3.

Як видно із рис.2 та рис.3 області рецептури, які задовольняють вимоги, що пред'являються до СУБС за показником рухомості бетонної суміші не менше 550 мм та показником міцності при стиску бетону в проектному віці (28діб) не менше 45 МПа відповідають наступним сполученням факторів: для класу SF1 ($D_{p.k.} = 550 \dots 650$ мм) – В/Ц=0,40...0,44, вміст СП – 1,0...1,4%, вміст МТК – 8...15%; для класу SF2 ($D_{p.k.} = 660 \dots 750$ мм) – В/Ц=0,42...0,44, вміст СП – 1,0...1,4%, вміст МТК – 5...8%; для класу SF3 ($D_{p.k.} = 760 \dots 850$ мм) – В/Ц=0,44, вміст СП – 1,35...1,40%, вміст МТК – 5...7%.

2. Матриця планування експерименту та результати випробувань

№ досліду	X_1	X_2	X_3	Діаметр розпливання конуса $D_{p.k.}$ мм	Міцність при стиску f_{cm} , МПа	Міцність при згині f_{ctd} , МПа	Водопоглинання W , %
1	+	+	+	700	55,2	9,0	5,77
2	-	+	+	378	61,3	9,9	5,43
3	+	-	+	530	56,5	9,3	6,04
4	-	-	+	370	62,7	9,8	5,13
5	+	+	-	770	46,1	8,3	6,07
6	-	+	-	664	59,1	9,2	5,25
7	+	-	-	725	47,8	8,0	5,64
8	-	-	-	620	57,4	9,3	5,54
9	+	0	0	628	51,1	8,9	5,76
10	-	0	0	425	61,8	9,5	5,52
11	0	+	0	600	52,9	8,9	5,63
12	0	-	0	515	54,7	9,1	5,64
13	0	0	+	457	58,1	9,3	5,63
14	0	0	-	628	48,2	8,4	5,60
15	0	0	0	600	55,1	9,2	5,50

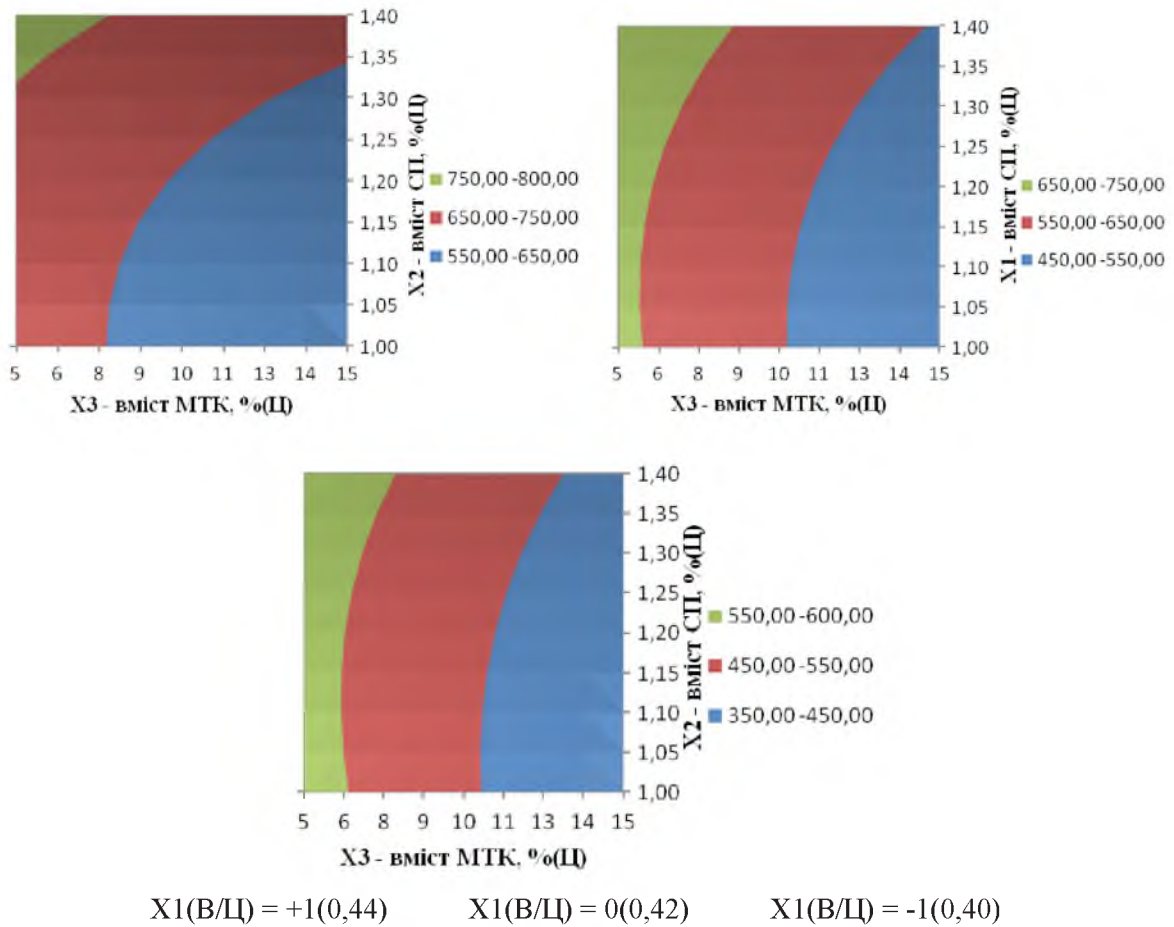


Рис. 2. Вплив рецептури на рухомість СУБС

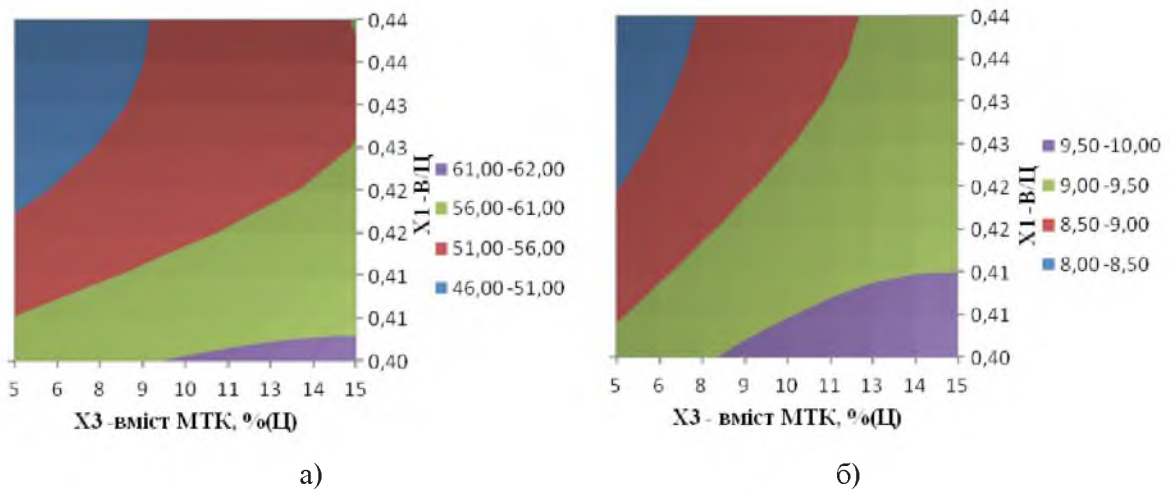


Рис. 3. Вплив рецептури на міцність при стиску (а) та на міцність при згині (б) СУБ (вміст СП=1,2%)

Висновок. Досліджено вплив водоцементного відношення (в межах 0,40-0,44), полікарбонатного суперпластифікатора Adium-150 (в межах 1,0-1,4% від маси цементу) та метаксаоліну (в межах 5-15% від маси

цементу) на рухомість самоущільнювальної бетонної суміші та на фізико-механічні властивості самоущільнювального бетону. Встановлено, що рецептура чинить суттєвий вплив на рухомість бетонних сумішей і в

меншій мірі на фізико-механічні властивості бетону. На величину рухомості бетонної суміші позитивно впливають величина В/Ц та суперпластифікатор, при переважному впливі величини В/Ц; метакаолін негативно впливає на цей показник. Вплив указаних факторів на міцнісні властивості бетону обернений за знаком: із збільшенням В/Ц та вмісту суперпластифікатора міцність бетону знижується, а із збільшенням вмісту метакаоліну – зростає. Величина В/Ц чинить переважний вплив на міцнісні характеристики бетону, вміст суперпластифікатора незначно впливає на міцність при стиску, а його вплив на міцність при згині не проявляється. Величина водопоглинання

бетону збільшується із збільшенням В/Ц, вплив модифікуючих добавок (суперпластифікатора та метакаоліну) на цей показник не виявлено.

Для забезпечення рухомості бетонної суміші за величиною діаметра розпливу стандартного конуса 550-760 мм, міцності на стиск бетону в проектному віці не менше 45 МПа, область раціональних рецептур знаходиться в межах: для класу SF1 – В/Ц=0,40...0,44, вміст СП – 1,0...1,4%, вміст МТК – 8...15%; для класу SF2 – В/Ц=0,42...0,44, вміст СП – 1,0...1,4%, вміст МТК – 5...8%; для класу SF3 – В/Ц=0,44, вміст СП – 1,35...1,40%, вміст МТК – 5...7%.

Бібліографія

1. Костыря Г.З. *Технология бетона и бетонных работ при строительстве и ремонте железобетонных конструкций гидротехнических сооружений с применением высокопластичных бетонных смесей с добавками ПАВ и микронаполнителя : автореферат дис. кандидата технических наук : 05.23.07, 05.23.05 / ВНИИ гидротехники им. Б. Е. Веденеева. Санкт-Петербург, 2000. 33 с.*
2. Фаликман В.Р. *Новые эффективные высокофункциональные бетоны. Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. №1. 2011. С. 48-54.*
3. Okamura H., Ouchi M. *Self-Compacting Concrete // Advanced Concrete Technology. 2003. № 1. Pp. 5-15.*
4. Kitamura H., Nishizaki T, Ito, H., Chikamatsu R., Kamada F, Okudate M. *Construction of prestressed concrete outer tank for LNG storage using high-strength self-compacting concrete // Proceedings of the International Workshop on Self-Compacting Concrete. 1999. Pp. 262-291.*
5. Ozawa, K. *Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures // Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. 1999. Vol. 1. Pp. 445-450.*
6. *The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use. UK, 2005. 21 p.*
7. Комаринский М.В., Смирнов С.И., Бурцева Д.А. *Литые и самоуплотняющиеся бетонные смеси // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 11. С. 106-118.*

А.В. Коваленко, А.Ю. Юзюк

Влияние рецептуры на свойства самоуплотняющихся бетонов

Приведены результаты исследований влияния рецептуры на технологические и физико-механические свойства самоуплотняющегося бетона как материала для ремонта и восстановления железобетонных гидротехнических сооружений водохозяйственно-мелиоративного комплекса

A. V. Kovalenko, A. Y. Yuzyuk

Effect of the formulation on the properties of self-compacting concretes

The results of studies of the effect of the formulation on the technological and physicalmechanical properties of self-compacting concrete as a material for repair and restoration of reinforced concrete hydraulic structures of the water management and reclamation complex.