

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 666.972.16

А. В. КРАСНЮК¹, В. О. МОМОТ², Н. А. НІКІФОРОВА^{3*}

¹ Дек. «Поромислове і цивільне будівництво», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 38, ел. пошта kafdiit@mail.ru

² Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 85, ел. пошта kafdiit@mail.ru

^{3*} Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (050) 500 89 75, ел. пошта arnik2004@mail.ru

ВИБІР ЕФЕКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ГІДРОТЕХНІЧНОГО БЕТОНУ

Мета. Важливим етапом технології гідротехнічного бетону є визначення раціонального співвідношення матеріалів у складі бетонної суміші. Властивості бетонної суміші визначаються як гранулометричним складом заповнювачів, так і властивостями в'язучого. **Методика.** Виконані експериментальні дослідження структури цементно-піщаного розчину підвищеної рухливості для трубопровідного транспорту. **Результати.** На основі аналізу проведених досліджень встановлено, що отримання гідротехнічного бетону із заданими властивостями можливо в результаті застосування спеціальної технології бетонування з використанням високорухливого цементно-піщаного розчину, наповненого активним мікронаповнювачем в комплексі з модифікованим для умов підводного застосування пластифікатором. **Наукова новизна.** Доведено можливість отримання гідротехнічного бетону із заданими властивостями ін'єкційним способом із застосуванням цементно-піщаної суміші, що забезпечує високоефективне дифузійне та капілярне масопереміщення у формованому підводному масиві. **Практична значимість.** Комплекс технологічних заходів дозволив забезпечити отримання бетонів із заданими властивостями для підводних робіт класів В15...В25 при зниженні витрати цементу на 15 % порівняно з традиційною технологією.

Ключові слова: хімічні добавки; суперпластифікатори; експлуатаційні властивості; морозостійкість; порова структура; міцність; водонасичення

Основним завданням в області будівництва є створення і впровадження прогресивних технологій. При цьому повинно бути значно поліпшені якість робіт, підвищена продуктивність праці, понижені витрати цементу.

Підводне бетонування, без застосування водовідливу, застосовують при влаштуванні і ремонті підводних частин гідротехнічних споруд, при заповненні внутрішніх порожнин оболонок і порожнини розширень, розбурених в основі оболонок, при закріпленні оболонок в свердловинах, пробурених в скелі під водою, а також при влаштуванні плит низьких ростверків і влаштуванні водозахисних подушок в опускних колодязях.

Підводне бетонування виконують одним з наступних способів:

- вертикально переміщеної труби;

- висхідного розчину;
- утрамбування;
- укладання бетону в мішках.

Спосіб підводного бетонування обирають залежно від конструктивних особливостей споруди і глибини укладання бетону. Хорошу якість отримують при виконанні наступних вимог:

- бетонну суміш укладають по можливості без контакту водою;
- склад бетону повинен враховувати комплекс властивостей, включаючи водостійкість, водонепроникність, морозостійкість, обмежена усадка і набрякання, помірне виділення тепла; при твердінні (для масивних споруджень), стійкість проти агресивної дії солей або інших речовин, розчинених у воді;

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

– бетонування окремого блоку без перерви.

У специфічних умовах експлуатації до гідротехнічних бетонів можуть пред'являтися і додаткові вимоги: гідродинамічна стійкість, альгіцидність, бактерицидність.

Спеціальні властивості гідротехнічного бетону, наприклад водонепроникність, забезпечуються:

- вибором матеріалів, що надають необхідну морозостійкість і водонепроникність;
- визначення В/Ц як з рівня міцності, так і з умови довговічності;
- призначенням розсунення, що забезпечує одержання щільного і довговічного бетону;
- застосуванням мікронаповнювачів, що зменшують тепловиділення й об'ємні деформації і гарантують одержання щільного бетону при низьких витратах цементу;
- використанням повітрозалучаючих добавок.

Методи визначення складу гідротехнічного бетону базуються на фундаментальних дослідженнях зв'язків між характеристиками і співвідношеннями складових його матеріалів, з одного боку, і властивостями бетонної суміші і затверділого гідротехнічного бетону – з іншою [1].

Проектування складу бетону для підводних робіт починається з вибору оптимального складу цементно-піщаного розчину, призначеного для трубопровідного транспорту до місця формування підводної конструкції. Залежно від дальності транспортування, діаметру подаючої труби і типу перекачувального пристрою рухливість розчину повинна знаходитися в межах 12...16 см (по зануренню конуса БУДЦНДЛ).

По розрахунку еквівалентних складів гідротехнічного бетону виконуються такі операції:

1. За заданою проектною маркою бетону і відомою активністю використаного цементу

обчислюється значення розрідження цементного тіста, Ц/В і В/Ц.

2. Для обчисленого значення розрідження цементного тіста і заданої консистенції бетонної суміші знаходиться відповідні величини функції насичення бетону крупним заповнювачем.

3. Робиться обчислення коефіцієнтів насичення бетону крупним заповнювачем за значеннями функції насичення.

4. Визначається склад бетону, з використанням рівняння абсолютних об'ємів.

5. Встановлюється щільність бетону як сума витрат окремих складових.

Властивості бетонів водного твердіння досліджувалися на трьох видах цементу: на портландцементі Балаклєєвського цементного заводу, на сульфатостійкому портландцементі Амвросієвського цементного заводу, портландцементі Криворізького цементного заводу.

Хімічний склад, а також основні характеристики цементів приведені в табл. 1 і 2.

У якості заповнювачів застосовувалися місцеві матеріали заводів Придніпровського регіону (табл. 3).

Для проведення частини експериментів щебень розсіювали на фракції: 5...10, 10...20 і 20...40 мм.

При ін'єкційному способі бетонування велике значення має оптимізація складу і структури цементно-піщаного розчину.

Дослідження проводилися на двох видах розчину, кожен на однофракційному піску: один – на основі крупної фракції 1,25...0,63; другий – на основі дрібної фракції 0,315...0,16.

Пісок фракції 1,25...0,63 одержаний розсіванням річкового піску через сито 1,25 і представляє залишок на ситі 0,63; дрібний пісок фракції 0,315...0,16 одержаний розсіванням річкового піску через сито 0,315 і представляє залишок на ситі 0,16.

Таблиця 1

Хімічний склад цементів

Завод-виготовитель	Вид і марка цементу	SiO	Al ₂ O	Fe ₂ O	CaO
Амвросієвський	ССПЦ 400	24,52	4,63	5,27	60,35
Балаклєєвський	ПЦ 400	22,34	5,26	4,58	66,23
Криворізький	ПЦ 400	22,86	4,42	2,82	58,52

Таблиця 2

Характеристики цементів

Цемент	НГ %	Терміни тужавіння, хв.		Міцність при вигині, МПа		Міцність при стиску, МПа	
		початок	кінець	7 діб	28 діб	7 діб	28 діб
Амвросієвський	26,7	105	260	4,3	6,6	29,7	42,7
Балаклаєвський	25,6	132	280	4,6	6,9	28,8	43,1
Криворізький	27,1	137	390	4,7	7,1	29,3	42,8

Таблиця 3

Характеристика заповнювачів

Заповнювач	Розмір зерен, мм	Модуль крупної	Насипна щільність кг/м ³	Щільність в шматку кг/м ³	Порожність, %
Пісок	-	2,1...2,4	1,55...1,6	2,6...2,7	40...41
Щебінь	5...40	-	1,54...1,61	2,6...2,75	42...43

Встановлено, що в результаті введення в цементно-піщаний розчин у якості мікронаповнювача ПГПФ змінюється кінетика гідратації в'язучого в підводному середовищі, вміст гідросилікатів кальцію збільшується на 13... 18 % порівняно з матеріалом без наповнювача.

Досліджені міцнісні характеристики зразків розчину, що тверднув у водному середовищі і для порівняння – в нормальних умовах (вік – 28 діб). Показані склади розчину оптимальною кількістю мікронаповнювача. Результати експериментів приведені в табл. 4.

Таблиця 4

Фізико-механічні характеристики розчину на крупному (на дрібному) піску

Вид і кількість, %	$R_{сж}$, МПа		$R_{виг}$, МПа		Водонасичення %	
	НУ	Підводне твердіння	НУ	Підводне твердіння	НУ	Підводне твердіння
-	43,2	44,7	4,1	4,4	9,2	8,7
	(41,3)	(42,2)	(4,6)	(4,7)	(8,8)	(8,4)
МП-20	44,3	45,3	4,3	4,5	8,8	8,2
	(41,8)	(42,4)	(4,5)	(4,7)	(8,4)	(7,8)
МП-30	45,1	46,2	4,5	4,7	8,1	7,7
	(42,4)	(43,1)	(4,7)	(4,8)	(8,0)	(7,2)
ПГПФ-15	45,7	47,6	4,7	4,9	7,9	7,1
	(43,9)	(43,9)	(4,9)	(5,0)	(7,3)	(6,4)
ПГПФ-20	47,4	48,9	4,8	5,1	7,0	6,6
	(44,2)	(45,9)	(5,1)	(5,1)	(6,8)	(6,0)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Міцність при стиску зростає при збільшенні вмісту мікронаповнювача до 26 %, особливо при введенні ПППФ. Можна виявити закономірність підвищення щільності мінерального скелета у разі застосування крупного піску порівняно з щільністю розчину на дрібному піску. Особливо цей ефект виявляється при введенні до складу розчину ПППФ в кількості 10...20 % від маси цементу, причому при подальшому підвищенні вмісту ПППФ (понад 25 % від маси цементу) спостерігається пониження щільності скелета на 1,5...3,2 %.

Приріст міцності порівняно з міцністю зразків без наповнювача складає для меленого піску 3...6 %, для ПППФ – 9...14 %.

Основною технологічною характеристикою бетонної суміші при трубопровідному транспортуванні є її консистенція. Для такого способу

транспортування звичайно застосовують високорухливі бетонні суміші. Консистенція бетонної суміші повинна забезпечувати надійність транспортування і можливість укладання її в опалубку підводної конструкції. Тому консистенцію слід призначати з урахуванням умов бетонування і форми конструкції.

Аналіз даних, приведених у табл. 5, показує залежність коефіцієнта удобоперекачування K від початкової вологості цементно-піщаного розчину, тоді як його рухливість залишається пропорційною водовмісту розчину. При цьому призначення оптимальної вологості розчину W диктується, з одного боку, заданим класом бетону по міцності (В/Ц) і обмеженням параметра K , з іншого боку.

Таблиця 5

Залежність технологічних параметрів цементно-піщаної суміші від її складу

Склад, кг/м ³ Ц:П:В	Структурні характеристики		W, %	Рухливість, см	Kx10, см/мс
	В/Ц	x=П/Ц			
400:750:132	0,33	1,88	10	10	11,2
390:724:148	0,38	1,86	12	12	13,5
375:693:153	0,41	1,85	13	14	17,0
330:647:148	0,45	1,96	13	16	19,0
300:660:126	0,42	2,20	12	15	17,7
280:644:112	0,40	2,30	11	14	16,2

Управління технологічними властивостями бетонних сумішей для підводних робіт в основному здійснюється застосуванням різних хімічних добавок і їх комплексів і композицій.

Для отримання бетонів із заданими технологічними властивостями необхідне встановлення закономірностей в регулюванні параметрів цементних систем на стадії взаємодії цементу з водою. Хімічні процеси, визначальні ці властивості, обумовлені, в основному, молекулярними силами, що діють на межі розділу фаз. Вказані взаємодії формують такі властивості дисперсних систем, як в'язкість, пептизація, гранична змащувальна дія, коагуляція, структуроутворення та інші.

Характерними явищами в дисперсних системах є створення і розвиток просторових структур. У основі їх лежить термодинамічна не-

стійкість мікрогетерогенних дисперсних систем як наслідок надмірної вільної енергії розвинених міжфазних поверхонь розділу. Взаємодія мікрооб'єктів в значній мірі визначає протікання процесів пептизації, коагуляції, структуроутворення. Можливість управління цими процесами лежить в основі направленої зміни в'язкості цементно-водних систем, регулювання таких важливих технологічних властивостей гідротехнічних бетонів, як розрідження і збереження рухливості в часі, розшарування і водовідділення [2].

В даний час робота в області фізико-хімічних поверхневих явищ і теорії контактних взаємодій направлена на дослідження особливості структуроутворення цементного каменя з мікронаповнювачем і пластифікуючими добавками в умовах підводного твердіння.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Для прийнятих високорухливих бетонних сумішей необхідне застосування комплексних поліфункціональних добавок. Найважливішими з них є:

- високий пластифікуючий ефект;
- надійна здатність до стабілізації.

Перший пункт забезпечує збільшення рухливості суміші, другий – надає властивості незрешаруватості.

У якості поліфункціональної добавки прийняті суперпластифікатор С-3 (Росія) + мікронаповнювач, суміш пластифікатора ПФМ-БС,

модифікування якого проведене д. т. н. М. Ш. Файнером (Україна) і мікронаповнювача, а також суміш комплексної добавки ПК з мікронаповнювачем.

У якості мікронаповнювачів композицій в дослідженнях використовувалися: андезитове борошно, мелений кварцовий пісок і пил газоочищення виробництва феросиліцію.

Хімічний склад і основні властивості мінеральних мікронаповнювачів приведені в табл. 6 і 7.

Таблиця 6

Хімічний склад наповнювачів

Вид наповнювача	Хімічний склад, %					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Андезитове борошно	63,8	15,1	12,6	0,9	1,4	0,18
Мелений кварцовий пісок	91,94	5,34	0,57	0,03	0,8	0,17
Пил газоочищення	89,2	0,17	0,04	0,1	0,2	-

Таблиця 7

Основні властивості мінеральних наповнювачів

Наповнювач	Вологість, %	Щільність істинна, г/см ³	Насипна щільність, г/см ³	Питома поверхня, см ² /г
Андезитове борошно	0,16	2,69	1,0	3436
Мелений кварцовий пісок	0,15	2,64	1,07	3407
Пил газоочищення	0,11	2,23	0,831	9489

Суперпластифікатор С-3 – продукт, що одержується при багатостадійному синтезі. Основу суперпластифікатора С-3 складають натрієві солі продукту конденсації нафталінсульфокислоти і формальдегіду. Екологічно нешкідливий, відноситься до 3 класу небезпеки. Випускається у вигляді порошку світло-коричневого кольору, повністю розчинного у воді, не змінює своїх властивостей в сухому вигляді при температурі від +85 °С до –40 °С з подальшим повним відтаванням, пожежо- і вибухобезпечний.

Модифікована добавка ПК є побічним продуктом виробництва смол карбомід-

формальдегідів, які достатньо широко випускаються хімічними заводами України. Має пластифікуючі властивості.

При поєднанні прийнятого пластифікатора з мікронаповнювачем утворюється гелеподібна суспензія, що має поліфункціональні властивості, підвищену пластифікуючу здатність при одночасному запобіганні розшарування бетонної суміші, а також бере активну участь в структуроутворенні бетону підводного твердіння.

Призначення складу бетону заданого класу при роздільному способі підводного бетонування характерно рядом особливостей. До них

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

відносяться: роздільне призначення складу цементно-піщаної суміші, призначеної для трубопровідного транспорту, а також призначення кінцевого складу бетону із заданими властивостями (табл. 8).

Таблиця 8

Оптимальні склади бетону для підводних робіт

Витрати складових на 1 м ³ бетону, кг				Клас бетону
Цемент	Пісок	Щебінь	Вода	
330	708	1183	126	B20
324	775	1214	123	B20
302	772	1129	121	B15
286	620	1168	118	B15
267	598	1223	109	B10

На підставі проведених комплексних лабораторних випробувань розроблені і запропоновані граничні значення складових і властивостей розчинів з пластифікатором ПК (табл. 9).

Таблиця 9

Оптимальні склади бетону для підводних робіт

Найменування показника	Показники
Кількість цементу, кг/м ³	470...566
Кількість пластифікатора, кг/м ³	7...15
Кількість наповнювача (пил газоочищення), кг/м ³	35...75
Кількість води, кг/м ³	290...370
Рухливість, см	12...19
Міцність при стисненні у віці 28 діб при твердінні у воді, МПа	28...39
Морозостійкість, циклів	150...200
Адгезійна міцність, МПа	1,6...2,1

А. В. КРАСНЮК¹, В. А. МОМОТ², Н. А. НИКИФОРОВА^{3*}

¹ Каф. «Промышленное и гражданское строительство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 38, эл. почта kafdii@mail.ru

² Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 85, эл. почта kafdii@mail.ru

^{3*} Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (050) 500 89 75, эл. почта arnik2004@mail.ru

Встановлено, що в результаті введення в цементно-піщаний розчин у якості мікронаповнювача ПППФ змінюється кінетика гідратації в'язучого в підводному середовищі, вміст гідросилікатів кальцію збільшується на 13...18 % порівняно з матеріалом без наповнювача.

Таким чином, отримання гідротехнічного бетону із заданими властивостями можливо в результаті застосування спеціальної технології бетонування з використанням високорухливого цементно-піщаного розчину, наповненого активним мікронаповнювачем в комплексі з модифікованим для умов підводного застосування пластифікатором.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пунагін, В. М. Проектування складів гідротехнічного бетону. [Текст] : монографія / В. М. Пунагін, О. М. Пшінько, Н. М. Руденко. – Д. : Арт-Прес, 1998. – 192 с.
2. Нікіфорова, Н. А. Вплив комплексних модифікованих добавок на морозостійкість важких бетонів [Текст] / Н. А. Нікіфорова, В. О. Момот, О. О. Вергун // Збірник наук. праць ДНУЗТ. – Д., 2012. – № 2. – С. 41-44.
3. Коваленко, В. В. Исследование структуры и свойств минеральных добавок для бетонов и строительных растворов [Текст] / В. В. Коваленко, С. В. Коваленко, А. И. Вовк, Ю. Л. Заяц // Збірник наук. праць ДНУЗТ. – Д., 2012. – № 1. – С. 28-32.
4. Чуб, А. А. Исследование морозостойкости, прочностных и деформативных свойств бетона от технологических характеристик бетонных смесей [Текст] / А. А. Чуб // Збірник наук. праць ДНУЗТ. – Д., 2012. – № 1. – С. 120-125.
5. Романенко, О. В. Фізико-хімічні дослідження цементного каменю з добавками суперпластифікатора та прискорювача твердіння [Текст] / О. В. Романенко // Збірник наук. праць УДАЗТ. – Х., 2012. – № 130. – С. 40-49.

ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО БЕТОНА

Цель. Важным этапом технологии гидротехнического бетона является определение рационального соотношения материалов в составе бетонной смеси. Свойства бетонной смеси определяются как гранулометрическим составом заполнителей, так и свойствами вяжущего. **Методика.** Выполнены экспериментальные исследования структуры цементно-песчаного раствора повышенной подвижности для трубопроводного транспорта. **Результаты.** На основе анализа проведенных исследований установлено, что получение гидротехнического бетона с заданными свойствами возможно в результате применения специальной технологии бетонирования с использованием высокоподвижного цементно-песчаного раствора с активным микронаполнителем в комплексе с модифицированным для условий подводного применения пластификатором. **Научная новизна.** Доказана возможность получения гидротехнического бетона с заданными свойствами инъекционным способом с применением цементно-песчаной смеси, что обеспечивает высокоэффективное диффузионное и капиллярное масоперемещение в формируемом подводном массиве. **Практическая значимость.** Комплекс технологических мероприятий позволил обеспечить получение бетонов с заданными свойствами для подводных работ классов В15...В25 при снижении затрат цемента на 15 % по сравнению с традиционной технологией.

Ключевые слова: химические добавки; суперпластификаторы; эксплуатационные свойства; морозостойкость; поровая структура; прочность; водонасыщение

ANDREY KRASNUK¹, VITALIY MOMOT², NATALIYA NIKIFOROVA^{3*}

¹ Dean's Office of Industrial and civil building, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovs'k, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 38, e-mail kaf-diit@mail.ru

² Dept. of Building production and geodesy, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovs'k, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 85, e-mail kaf-diit@mail.ru

^{3*} Dept. of Building production and geodesy, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovs'k, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 500 89 75, e-mail apnik2004@mail.ru

CHOICE OF EFFECTIVE MATERIALS FOR A HYDROTECHNICAL CONCRETE

Purpose. Determination of rational correlation of materials is the important stage of technology of hydrotechnical concrete in composition a concrete mixture. Properties of concrete mix are determined both by granulometric composition and the volume and properties of the binder. **Methodology.** The structure of cement-sandy solution of enhanceable mobility is investigational experimentally for a pipeline transport. **Findings.** It is set on the basis of analysis of the conducted researches, that the receipt of hydrotechnical concrete with the set properties is possible as a result of application of the special technology of concreting with the use of high-mobile cement-sandy solution with active one micro by filling in a complex with the plasticizer modified for the terms of submarine application. **Originality.** Possibility of receipt of hydrotechnical concrete is well-proven with the set properties by an injection method with the use of cement-sandy mixture. **Practical value.** Complex of technological actions has allow ensure a reception of concretes with given characteristics for undersea working the classes B15...B25 when reducing a consumption of cement on 15 % in the comparison with the traditional technology.

Keywords: chemical additions; superplasticizers; operating properties; frost-resistance; structure of pores; durability; saturation by water

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. І. Нетесою (Україна).

Надійшла до редколегії 10.09.2013.

Прийнята до друку 28.10.2013.