

**Л.Й. Дворкін**

Заслужений діяч науки і техніки України, професор,  
доктор технічних наук

# **ГІДРОТЕХНІЧНІ БЕТОНИ**

*Навчальний посібник*

Київ 2023

УДК 666.97.033.3(075)

Д24

**Рецензенти:**

**Мішутін А.В.**, доктор технічних наук, професор, Одеська державна академія будівництва та архітектури;

**Пойзнер М.Б.**, доктор технічних наук, професор, Одеський національний морський університет;

**Хланук М.М.**, доктор технічних наук, професор, Національний університет водного господарства та природокористування.

*Рекомендовано вченою радою навчально-наукового інституту будівництва та архітектури Національного університету водного господарства та природокористування.  
(Протокол № 5 від 23 травня 2023р.)*

**Дворкін Л.Й.**

**Д24** Гідротехнічні бетони: навчальний посібник. – Київ: Каравела, 2023. 285 с.

**ISBN**

У навчальному посібнику наведені основні вимоги до гідротехнічних бетонів для масивних і тонкостінних конструкцій та споруд, характеристика основних властивостей бетонів та шляхи їх забезпечення.

Приведені методи проектування гідротехнічних бетонів із заданими властивостями і приклади їх реалізації.

Посібник призначено для студентів будівельних та гідротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

**УДК 666.97.033.3(075)**

**ISBN**

© Дворкін Л.Й., 2023

© «Каравела», 2023

## ЗМІСТ

	Стор.
<b>ПЕРЕДМОВА</b> .....	5
<b>1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ГІДРОТЕХНІЧНИХ БЕТОНІВ</b> .....	6
<b>2. ОСНОВНІ ВИДИ ЦЕМЕНТІВ ДЛЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ БЕТОНІВ</b> .....	16
2.1. Портландцементи загальнобудівельного призначення	16
2.2. Цементи спеціального призначення.....	33
<b>3. ЗАПОВНЮВАЧІ, ДОБАВКИ, ВОДА ДЛЯ ЗАМІШУВАННЯ</b> .....	61
3.1. Заповнювачі бетону.....	61
3.2. Добавки в бетонну суміш.....	82
3.3. Вода для замішування бетонної суміші.....	112
<b>4. ВИРОБНИЦТВО, ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ</b> .....	116
4.1. Виробництво бетонних сумішей.....	116
4.2. Транспортування та ущільнення бетонної суміші.....	122
<b>5. БЕТОННІ СУМІШІ. ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ</b> .....	137
5.1. Легкоукладальність і водопотреба.....	137
5.2. Розшаровуваність бетонних сумішей.....	153
<b>6. ГІДРОТЕХНІЧНИЙ БЕТОН ДЛЯ МАСИВНИХ СПОРУД</b> .....	157
6.1. Міцність бетону на стиск і розтяг.....	158
6.2. Тріщиностійкість.....	165
6.3. Морозостійкість та водонепроникність.....	176
6.4. Корозійна стійкість.....	189
<b>7. ГІДРОТЕХНІЧНИЙ БЕТОН ДЛЯ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА СПОРУД</b> .....	200
7.1. Важкі і легкі бетони для тонкостінних конструкцій і споруд.....	200
7.2. Бетонополімери і полімерцементні бетони.....	216
<b>8. ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ ГІДРОТЕХНІЧНОГО БЕТОНУ</b> .....	223
8.1. Загальна схема.....	223

8.2. Експериментальний і розрахунково-експериментальний методи проектування складів бетонних сумішей.....	230
8.3. Проектування складів гідротехнічного бетону з застосуванням експериментально-статистичних моделей.....	259
<b>ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>281</b>

## ПЕРЕДМОВА



Бетон на найближчу перспективу залишається основним та універсальним будівельним матеріалом. Залежно від призначення до теперішнього часу сформувалася велика сукупність бетонів, що мають низку технологічних особливостей та спеціальних властивостей.

До найстаріших і в той же час таких, що інтенсивно розвиваються, можна віднести гідротехнічні бетони. Маючи багату історію і переконливо довівши ефективність застосування для відповідальних річкових і морських споруд, різноманітних конструкцій і виробів, що експлуатуються при впливі водного середовища, ці бетони успішно застосовуються на сучасному етапі. Розвиток технології дозволяє суттєво модифікувати технологію гідротехнічних бетонів та покращити їх властивості, забезпечувати високу довговічність і надійність конструкцій та споруд.

У даному посібнику розглядаються технологічні особливості та властивості гідротехнічних бетонів для масивних та тонкостінних споруд, шляхи їх регулювання та проектування складів. Посібник призначений для студентів будівельних спеціальностей. У ньому автор поряд із оглядом літературних даних наводить також результати виконаних досліджень при його участі у Національному університеті водного господарства та природокористування.

Автор вдячний рецензентам посібника, зауваження яких враховано під час підготовки його до друку.

Автор також вдячний своїм колегам на кафедрі технології будівельних виробів та матеріалознавства, які брали участь у наукових дослідженнях. Він також вдячний інженерам Л.І. Ніхаєвій, Г.В. Киц та Л.А. Мацько за технічну допомогу при підготовці посібника до видання.

## 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ГІДРОТЕХНІЧНИХ БЕТОНІВ

Гідротехнічні бетони призначені для виготовлення конструкцій та зведення споруд, що постійно або періодично перебувають у воді. Широко застосовуються бетони цього виду при зведенні гідроенергетичних, гідромеліоративних, транспортних споруд, споруд промислової гідротехніки, водопостачання та каналізації та ін. (табл. 1.1).

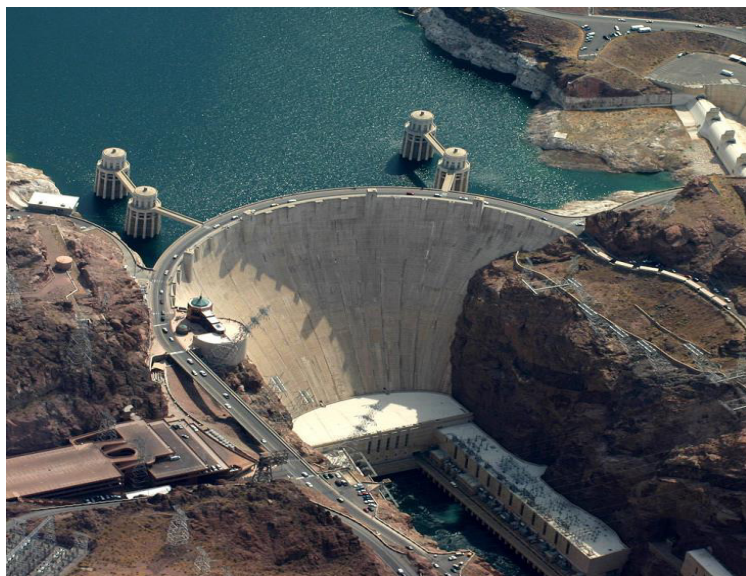
Таблиця 1.1

Області застосування гідротехнічних бетонів

Галузь будівництва	Основні види споруд
Будівництво гідротехнічних споруд	Бетонні греблі, канали та водоскиди, рибопропускні споруди, будівлі електростанцій, насосні станції, водоводи акумулюючих електростанцій та ін.
Транспортне будівництво	Судноплавні шлюзи та підйомники, портові споруди. Споруди причалів, суднобудівних та судноремонтних підприємств, навігаційні споруди, судна та ін. Пролітні будови, опори мостів, підземні та підводні тунелі, споруди поромних переправ, греблі та ін.
Будівництво споруд промислової гідротехніки, водопостачання та каналізації	Градирні, резервуари, відстійники, басейни теплоенергетичних комплексів, очисні споруди та насосні станції, водозабори, колектори та ін.
Гідромеліоративне будівництво	Облицювання каналів, акведуки, дюкери, труби, дренажні пристрої, канали – лотки та ін.
Будівництво споруд для видобутку нафти та інших корисних копалин	Опори морських бурових, галереї, штольні, підземні камери, штреки та ін.

Перші гідротехнічні бетони, які отримували на основі вапна та вулканічного попелу (пуцолани) застосовували ще римляни до нашої ери. Греблі на основі цементного бетону почали зводитися в різних країнах від початку ХХ ст. Цьому сприяли висока технологічність бетону, можливість забезпечення необхідних властивостей цього матеріалу з врахуванням особливостей експлуатації його в конструкціях і спорудах.

В 20-30 роки ХХ ст. побудовані бетонні греблі в США – Боулдер Гувер (рис. 1.1), Норріс і Хайвоссі, в Німеччині – Шварценбах і Блейлок, у Франції – Соте, Мареж, в СРСР – Волховська, Нижньо-Свірська, Дніпровська ГЕС (рис. 1.2) та ін.



**Рис. 1.1.** Гребля Гувера на р. Колорадо у США

У 60-70 роках розпочинається будівництво висотних бетонних гребель: Братської ГЕС (125 м, об'єм бетону 4415 тис. м<sup>3</sup>), Красноярської ГЕС (124 м, 4600 тис. м<sup>3</sup>), Саяно-Шушенської ГЕС (240 м, 8730 тис. м<sup>3</sup>) (рис. 1.3) та ін.



**Рис. 1.2.** Дніпровська ГЕС на р. Дніпро в Україні



**Рис. 1.3.** Саяно-Шушенська ГЕС на р. Єнісей в Росії



Залежно від розташування бетону у споруді стосовно рівня води він поділяється на *підводний*, *зони змінного рівня води*, *надводний*. Бетон у підземних гідротехнічних спорудах розглядається як підводний. Конструкції із застосуванням гідротехнічного бетону поділяють на *масивні* та *немасивні*. Масивні конструкції вимагають спеціальних заходів для регулювання термічних напружень, що виникають при виділенні теплоти в бетоні.

Вимоги до гідротехнічного бетону пред'являються диференційовано з урахуванням його зонального розподілу у конструкціях (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Вимоги до гідротехнічного бетону по зонам

Вимоги до бетону	Масивні споруди						Немасивні споруди		
	Зовнішня зона			Внутрішня зона					
	Зони щодо рівня води								
	підводна	змінного рівня	надводна	підводна	змінного рівня	надводна	підводна	змінного рівня	надводна
Водостійкість	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Водонепроникність	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Морозостійкість	-	+	+	-	-	-	-	+	+
Мале тепловиділення	+	+	+	+	+	+	-	-	-

**Примітка.** Знак "+" означає, що вимога висувається.

Комплекс проектних вимог до гідротехнічних бетонів забезпечується вибором вихідних матеріалів та добавок та проектуванням складів бетонних сумішей відповідно до умов експлуатації з урахуванням рекомендованих обмежень (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

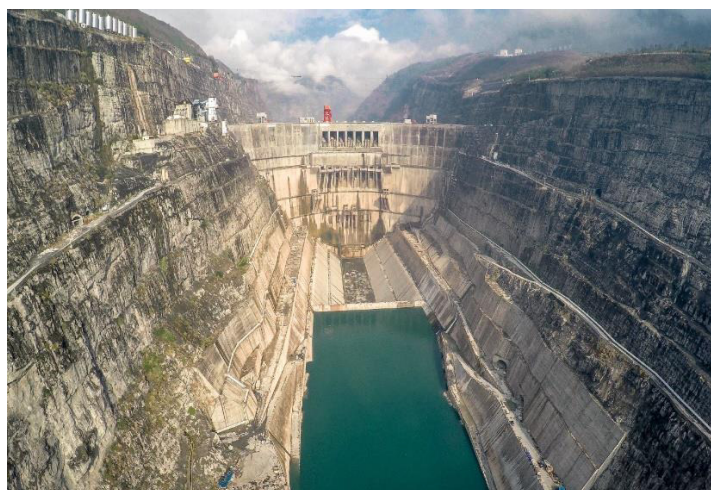
Рекомендовані гранично допустимі величини В/Ц для  
гідротехнічного бетону

Зона та умови експлуатації	Немасивні залізобетонні конструкції у воді		Зовнішня зона конструкцій масивних споруд у воді	
	морській	прісній	морській	прісній
Зона змінного рівня у кліматичних умовах: особливо суворих суворих помірних	0,42	0,47	0,45	0,48
	0,45	0,50	0,47	0,52
	0,50	0,55	0,55	0,58
Підводна зона: напірна безнапірна	0,55	0,58	0,56	0,58
	0,60	0,62	0,62	0,62
Надводна зона, що епізодично омивається водою	0,55	0,60	0,65	0,65

Для гідротехнічних бетонів, як і інших видів важкого бетону якісні показники характеризують класами за міцністю на стиск, осьове розтягування, розтяг при вигині, а також марками з морозостійкості та водонепроникності.

Відповідно до умов роботи бетону та норм проектування можливе призначення низки додаткових вимог.

Гідротехнічне будівництво інтенсивно розвивається на сучасному етапі. З бетону зводяться унікальні споруди, зокрема висотні греблі ( рис. 1.4, 1.5).



**Рис. 1.4.** Гребля Ксилуоду (Xiluodu Dam)



**Рис. 1.5.** Гребля Сяовань (Xiaowan Dam),

У табл. 1.4. наведено список шести найвищих арочних бетонних гребель у світі станом на 2022 рік.

Таблиця 1.4

Найвищі арочні бетонні греблі

№ з/п	Назва гідроелектростанції (ГЕС)	Висота, м	Країна
1	ГЕС Цзиньпін-1	305	Китай
2	ГЕС Сяовань	292	Китай
3	ГЕС Байхетань	289	Китай
4	ГЕС Ксилоуду	285,5	Китай
5	ГЕС Інгурі	271,5	Грузія
6	ГЕС Юсуфейлі	270	Туреччина

На сучасному етапі розвитку будівельної технології для зведення відповідальних споруд у т.ч. і в гідротехнічному будівництві все ширше застосовуються бетони нового покоління. Відмінними їх особливостями є висока міцність та швидкість її зростання, довговічність, знижені значення питомої витрати цементу на одиницю міцності. Отримання таких бетонів передбачає перехід на багатокомпонентні суміші з включенням до їх складу добавок суперпластифікаторів та дисперсних високоактивних мінеральних добавок. До характерних представників бетонів нового покоління відносять високофункціональні бетони типу "High Performance concrete" (НРС) і такі їх різновиди як високоміцні швидкотверднучі бетони, самоущільнювальні і реакційно-порошкові бетони.

Застосування бетонів нового покоління ефективно при зведенні і спеціальних споруд. Такі споруди були першими, де з успіхом використані бетони НРС. У 1995 р в Норвегії зведена платформа для видобутку нафти в Північному морі (рис. 1.6), розрахована на вплив ураганного шторму з максимальною висотою хвилі 31.5 м. Її повна висота 472 м, що в півтора рази перевищує висоту Ейфелевої вежі. Висота залізобетонної частини складає 370 м. Платформа встановлена на ділянці моря глибиною більше 300 м.



**Рис. 1.6.** Норвезька нафтова платформа в Північному морі

Аналогічні платформи побудовані на шельфі Північного Льодовитого океану в 200...400 км від берегів Аляски, що експлуатуються в зоні суцільного льодового покриву, переміщення якого розвивають величезні зусилля. У конструкції платформ при густому армуванні (800 кг стали на  $1\text{ м}^3$  залізобетону) укладено бетон міцністю 120 МПа з використанням багатокомпонентних комплексних модифікаторів.

Розроблені проекти платформ, розраховані на глибини до 500 м (рис. 1.7).



**Рис. 1.7.** Плавуча нафтова залізобетонна платформа у порівнянні з Ейфелевою вежею

Аналогічні платформи побудовані на шельфі Північно-Льодовитого океану в 200...400 км від берегів Аляски, які експлуатуються в зоні суцільного льодового покриву. Переміщення цього покриву розвивають великі зусилля. В конструкції платформ при густому армуванні (800 кг сталі на 1 м<sup>2</sup> залізобетону) укладений бетон міцністю 120 МПа з використанням багатокomпонентних комплексних модифікаторів.

До унікальних споруд, зведених із застосуванням НРС, можна віднести також міст через протоку Акасі в Японії з головним прольотом 1991 м (рис. 1.8), міст через протоку Нордамберленд в Східній Канаді з терміном служби 100 років довжиною 12,9 км, споруджений на опорах, які занурені в воду на глибину понад 35 м. та ін.



**Рис. 1.8.** Висячий міст Акасі - Кейко між островами Хонсю і Сікоку (Японія). Головний проліт 1991м

Поряд з бетонами нового покоління в будівництві успішно застосовують гідротехнічні бетони, багаторічний досвід практичного використання яких підтвердив їх ефективність.

## 2. ОСНОВНІ ВИДИ ЦЕМЕНТІВ ДЛЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ БЕТОНІВ

Вибір виду та марки (або класу) *цементу*, його мінералогічного та речовинного складу обумовлені як необхідною міцністю бетону і кінетикою зростання її в часі, так і рядом інших властивостей, що визначають його довговічність в конструкціях і спорудах при заданих умовах їх експлуатації.

### 2.1. Портландцементи загальнобудівельного призначення

**Загальна характеристика.** Цементи загальнобудівельного призначення стандартизовані відповідно до ДСТУ БВ. 2.7-46:2010. Цей стандарт поділяє найбільш поширені в будівництві цементу на п'ять типів за речовинним складом:

Тип I – портландцемент (від 0 до 5% мінеральних добавок), марки 300, 400, 500;

Тип II – портландцемент з мінеральними добавками (від 6 до 35% мінеральних добавок), марки 300, 400, 500;

Тип III – шлакопортландцемент (від 36 до 95% доменного гранульованого шлаку), марки 300, 400, 500;

Тип IV – пуцолановий цемент (від 21 до 55% мінеральних добавок), марки 300, 400, 500;

Тип V – композиційний цемент (від 36% до 80% мінеральних добавок), марки 300, 400, 500.

За міцністю в ранньому віці (після двох або семи діб тверднення) цементу марок 400 і 500 поділяють на два види: цементу із звичайною міцністю в ранньому віці та швидкотверднучі.

При умовному позначенні цементу вказують його тип, марку, вид мінеральних добавок і спеціальні ознаки (висока міцність в ранньому віці – Р; пластифікація і гідрофобізація ПЛ і ГФ, нормованість мінералогії – Н).

Приклад умовного позначення портландцементу марки 400 з добавкою до 20% шлаку, пластифікованого з високою міцністю в ранньому віці: ПЦ II/A-III-400Р-ПЛДСТУ... .



Як мінеральні добавки до цементів крім гранульованих доменних шлаків застосовують пуцоланові добавки осадового і вулканічного, а також техногенного походження, золу-виносу та добавку вапняку як наповнювача з вмістом  $\text{CaCO}_3$  не менше 75%.

У цементі всіх типів можуть бути введені пластифікуючі та гідрофобізуючі поверхнево-активні речовини (ПАР) в кількості не більше 0,3% від маси цементу в перерахунку на суху речовину добавки. Для інтенсифікації помелу дозволено вводити технологічні добавки, які не погіршують якість цементу, в кількості не більше 1%, в тому числі органічні – не більше 0,15%. Обмеження граничного вмісту таких добавок в цементі викликане їх, зазвичай, негативним впливом на міцність при підвищеному вмісті.

Вміст  $\text{MgO}$  в клінкері для всіх типів цементу повинен бути не більше 5%. За спеціальним дозволом і при забезпеченні рівномірності зміни об'єму зразків при їх випробуванні в автоклаві вміст  $\text{MgO}$  може бути доведений до 5...6%. Також в цементах нормується вміст  $\text{SO}_3$ , що вноситься, переважно, добавкою гіпсового чи гіпсовоангідритового каменю. Допускається використання фосфогіпсу, борогіпсу, фторгіпсу та інших матеріалів, які містять сульфат кальцію за відповідною нормативною документацією. Для всіх типів портландцементу мінімальний вміст  $\text{SO}_3$  повинен бути не менше 1%, максимальний для цементів I, II, IV і V типів марок 300, 400, 400P, 500 – не більше 3,5%, марок 500P, 550, 600, а також всіх марок цементу III-го типу – 4%.

Разом з сировиною в цемент можуть попадати хлористі солі. Вони чинять корозійний вплив на арматуру в бетоні та на металеве обладнання. Вміст хлоридів у цементах обмежується зазвичай в кількості не більше 0,1% за масою, а в цементі, що використовується для виготовлення попередньо напружених залізобетонних конструкцій, взагалі не допускається. Обмежується також вміст лужних оксидів у перерахунку на  $\text{Na}_2\text{O}$  в цементах, призначених для виготовлення масивних бетонних і залізобетонних споруд з використанням реакційноздатних заповнювачів. Вміст лужних оксидів у таких цементах

встановлюється за узгодженням із споживачем і, як правило не повинен перевищувати 0,6%.

Стандартизовані показники міцності цементів загальнобудівельного призначення наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Вимоги до міцності цементів

Марка цементу	Міцність при стиску в МПа, не менше		
	2 доби	7 діб	28 діб
300	-	15	30
400	-	20	40
400P	15	-	40
500	15	-	50
500P	25	-	50

Цементні заводи випускають нормальні ( $C_3S=40\ldots60\%$ ,  $C_2S=15\ldots40\%$ ) високоалітові ( $C_3S>60\%$ ), високо- ( $C_3A>9\%$ ), середньо- ( $C_3A=6\ldots9\%$ ) і низькоалюмінатні ( $C_3A<6\%$ ) цементи. Вплив алюмінатів більш помітний при зниженні вмісту в клінкері  $C_3S$ .

Високоалітові цементи мають, зазвичай, високу міцність і швидкість її зростання до 28 діб, характеризуються іншими покращеними властивостями. Разом з тим, високоалітові портландцементи без мінеральних добавок мають понижену стійкість до корозії вилуговування, сульфатної корозії. Для них характерна також підвищена екзотермія.

Важливим якісним показником цементів є ступінь дисперсності, що характеризується залишками на ситі з розміром отворів 0,08 мм, а також їх питомою поверхнею. У середньому, тонкість помелу портландцементу і його різновидів характеризується проходом через сито №008 близько 90% і коливається залежно від активності цементу. Більш точною є характеристика тонкості помелу за питомою поверхнею, яку визначають зазвичай методом вимірювання швидкості проходження повітря через шар спресованого порошку. Сучасні рядові цементы характеризуються питомою поверхнею близько 280...300 м<sup>2</sup>/кг (2800...3000 см<sup>2</sup>/г) при залишку на ситі №008

5...8%. Швидкотверднучі цементи мають більш високу питому поверхню 350...400 м<sup>2</sup>/кг (3500...4000 см<sup>2</sup>/г).

Нормальна густина є важливою технічною властивістю цементів, що визначає їх водопотребу і витрату в бетонах. На нормальну густину цементу, впливають тонкість помелу, мінералогічний склад клінкеру, вид активної мінеральної добавки та інші фактори. Серед клінкерних матеріалів найбільшу водопотребу має трикальцієвий алюмінат, найменшу – двокальцієвий силікат. Тому високоалюмінатні цементи мають підвищену водопотребу порівняно з низькоалюмінатними. Підвищенню нормальної густоти цементу сприяє введення активних мінеральних добавок, особливо осадового походження.

**Шлакопортландцемент.** Основним видом промислової продукції, виготовленої на основі металургійних шлаків, є шлакопортландцемент (цемент 3-го типу). При виробництві шлакопортландцементу застосовують гранульовані доменні шлаки, що мають найбільш сприятливий хімічний склад і високу гідравлічну активність.

Вперше гранульований доменний шлак був застосований як добавка при виробництві цементу в Німеччині в 1892 р. Вже з 1901р. виробництво т.зв. залізопортландцементу (так у Німеччині спочатку називався шлакопортландцемент) стало досить вагомим. У 1915-1916 рр. у Німеччині після проведення великої серії випробувань був виданий спеціальний закон, який дозволяв застосування шлакопортландцементу на рівні зі звичайним портландцементом.

Шлакопортландцемент (ШПЦ) – гідравлічна в'язуча речовина, що твердне у воді і на повітрі, отримується спільним тонким подрібненням клінкеру, необхідної кількості гіпсу і доменного гранульованого шлаку або ретельним змішуванням тих же матеріалів, подрібнених роздільно. Діапазон складів шлакопортландцементу як цементу III типу відповідно до норм ДСТУ БВ.2.7.–46:2010 приведений у табл. 2.2. Гранульовані доменні шлаки у виробництві ШПЦ на цементних заводах, розташованих поблизу металургійних підприємств, застосовують не лише як активну мінеральну добавку, але і як компонент сировинних сумішей для отримання клінкеру.

Таблиця 2.2

## Склади шлакопортландцементу

Назва	Позначення	Склад, % за масою		
		Основні компоненти		Допоміжні компоненти
		Клінкер	Доменний гранульований шлак	
Шлако-портландцемент	ШПЦ III/A	35-64	36-65	0-5
	ШПЦ III/B	20-34	66-80	0-5
	ШПЦ III/B	5-19	81-95	0-5

Шлакопортландцемент є одним з найбільш ефективних видів в'язучих, тому що при його виробництві значна частина клінкеру замінюється більш дешевим гранульованим шлаком. При використанні доменних шлаків для виробництва ШПЦ паливно-енергетичні витрати на одиницю продукції знижуються в 1,5...2 рази, а собівартість – на 25...30%. Наприклад, при виробництві ШПЦ марки М400 витрата палива в середньому на 36% нижче, ніж при виробництві бездобавочного портландцементу тієї ж марки. Витрата електроенергії скорочується приблизно на 12, а витрати на обслуговування і експлуатацію устаткування – на 10...15%.

ШПЦ із вмістом шлаку 25...40% зазвичай застосовують у тих же умовах, що і звичайний портландцемент. Цементи з високим вмістом шлаку використовуються як низькотермічні в масивних гідроспорудах і в спорудах, що піддаються дії агресивних вод, а також для виготовлення виробів при тепловологісній обробці.

Оптимальні властивості шлакопортландцементу набуває при підборі раціонального складу, структури і співвідношення шлакового і клінкерного компонентів цементу, а також їх дисперсності. Встановлено, що на будівельно-технічні властивості ШПЦ і бетонів на його основі основні шлаки впливають значно позитивніше, ніж кислі.

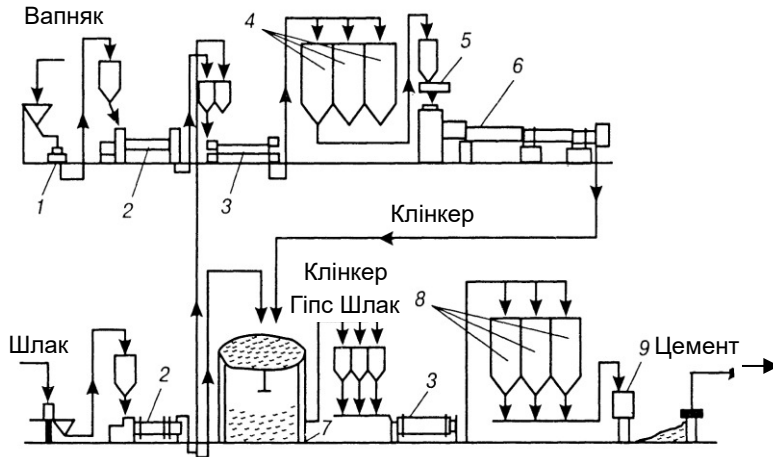
Зростанню міцності ШПЦ сприяє також застосування клінкеру з підвищеним вмістом найбільш активних мінералів ( $C_3S+C_3A=65...75\%$ ). При цьому для кислих шлаків бажано застосовувати алітові середньоалюмінатні клінкери ( $C_3S=60...70\%$ ;  $C_3A \leq 8\%$ ). Позитивний ефект досягається при використанні в сполученні з доменними шлаками низькотемпературного клінкеру, що містить до 5% вільного CaO, який служить лужним активатором.

У процесі гідратації і тверднення ШПЦ беруть участь шлакова і клінкерна складові. У початковий період процесу гідратації в результаті гідролізу мінералів-силікатів утворюється перенасичений розчин  $Ca(OH)_2$ , що у сполученні з гіпсом впливає на взаємодію з водою шлакового скла. Поряд зі звичайними продуктами при твердненні ШПЦ утворюються гелевидні гідратні сполуки з переважним вмістом низькоосновних гідросилікатів кальцію. Затверділий шлакопортландцементний камінь порівняно з портландцементним характеризується меншим вмістом кристалічного  $Ca(OH)_2$ , частково зв'язаного зернами шлаку, і більш щільною гідросилікатною гелевою структурою. Цими особливостями структури пояснюються його висока водонепроникність і стійкість до агресивних середовищ, що і визначає область застосування шлакопортландцементу.

Технологічна схема виробництва ШПЦ (рис. 2.1) передбачає сушіння гранульованого шлаку до залишкової вологості 1...2% і спільне подрібнення його з клінкером.

Залежно від розмелюваності клінкеру і шлаку, подрібнення до необхідної дисперсності можливе за двома схемами помелу. За першою клінкер попередньо подрібнюють спочатку в першому млині, а потім вже в другому спільно зі шлаком. Така схема раціональна при більш низькій розмелювальності шлаку, ніж клінкеру. Вона дає можливість забезпечити більш тонкий помел клінкеру, що прискорює тверднення ШПЦ. При приблизно однаковій розмелювальності шлаку і клінкеру раціональний їх одностадійний спільний помел. Одностадійний спільний помел недостатньо ефективний при застосуванні кислих шлаків. Для підвищення активності ШПЦ можливий також мокрий помел шлаків і наступне змішування шлакового шламу в

бетонозмішувачі з портландцементом. Позитивний ефект також досягається при введенні в процесі помелу шлаковмісних цементів добавок-пластифікаторів і прискорювачів тверднення.



**Рис. 2.1.** Схема виробництва шлакопортландцементу:

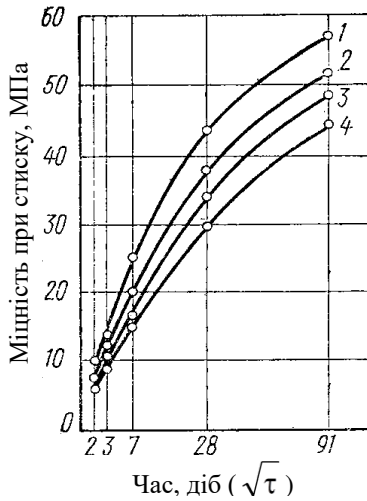
- 1 – дробарка; 2 – сушильний барабан; 3 – млин; 4 – змішуючі силоси;
- 5 – змішуючий шнек; 6 – обертова піч; 7 – склад клінкеру;
- 8 – цементні силоси; 9 – пакувальна машина

Цементна промисловість випускає звичайний, швидкотверднучий і сульфатостійкий шлакопортландцементи.

При виробництві *сульфатостійкого шлакопортландцементу* використовують клінкер із вмістом  $C_3A$  не більше 8% і шлак із вмістом  $Al_2O_3$  не більше 8%.

Для отримання *швидкотверднучого шлакопортландцементу* раціональний двохстадійний помел, тобто попереднє подрібнення клінкеру з наступним спільним помелом клінкеру і шлаку до питомої поверхні не менше  $4000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Двохстадійний помел забезпечує більш тонке подрібнення клінкерних зерен; він доцільний при використанні основних шлаків, по розмелювальності близьких до клінкеру. Кінцева міцність та інші

властивості шлакопортландцементу поліпшуються також і при більш тонкому подрібненні шлаку (рис. 2.2).



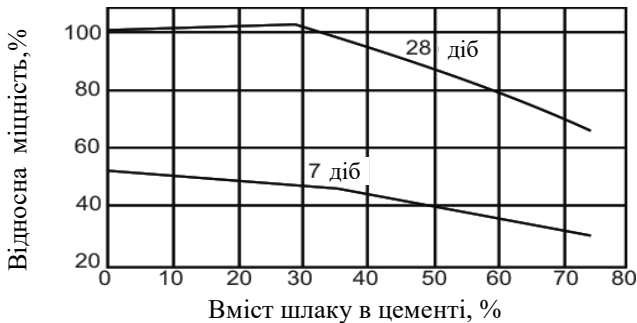
**Рис. 2.2.** Зміна міцності шлакопортландцементного каменю залежно від дисперсності шлаку.

Питома поверхня клінкерної частини постійна – 300 м<sup>2</sup>/кг;  
 питома поверхня шлаку (м<sup>2</sup>/кг): 1 – 450; 2 – 400; 3 – 350; 4 – 300

Дослідження на деяких цементних заводах показали, що при вмісті в швидкоотверднувачому ШПЦ шлаку 30...40% і питомій поверхні 3500 см<sup>2</sup>/г досягається міцність через 2...3 діб – 25...30 МПа при марці цементу 500. При питомій поверхні 4000 см<sup>2</sup>/г міцність цементу на стиск через 1 добу складає 15...20 МПа. При такій самій витраті цементу на 1м<sup>3</sup> бетону швидкоотверднувачий ШПЦ дає можливість на 10...30% скоротити тривалість тепловологісної обробки залізобетонних виробів, причому в більшості випадків міцність після пропарювання складає 70...90% марочної міцності. Після тепловологісної обробки бетони, виготовлені на швидкоотверднувачому ШПЦ, продовжують інтенсивно набирати міцність.

Шлакопортландцемент не чинить кородуючої дії на сталеву арматуру в залізобетонних виробках і міцно зчіплюється з нею.

Будівельно-технічні властивості ШПЦ характеризуються рядом особливостей порівняно з портландцементом: більш низькою густиною ( $2,8...3 \text{ г/см}^3$ ); дещо уповільненим тужавленням і наростанням міцності в початковий термін тверднення (рис. 2.3). Виготовляють наступні марки ШПЦ: М300; М400; М500. Швидкотверднучий ШПЦ через 2 доби має міцність на стиск не менше 15 МПа. Марка його повинна бути не менше М400. Для сульфатостійкого ШПЦ встановлені марки М300 і М400.



**Рис. 2.3.** Вплив гранульованого шлаку на міцність при стиску пластичного розчину. Міцність портландцементу у 28 діб прийнята за 100%

Для будівництва масивних споруд, що працюють у водному середовищі, крім високої стійкості ШПЦ до хімічної агресії, важливо його знижене тепловиділення, що досягає до 3 і 7 доби тверднення приблизно  $141...197 \text{ кДж/кг}$ .

Особливістю шлакопортландцементу, важливою для заводського виробництва збірного залізобетону, є інтенсивне зростання його міцності при пропарюванні, особливо в області високих температур. Найбільш інтенсивно зростає міцність при згині. Одночасно підвищуються морозо-, соле- і



тріщиностійкість. Характерно, що ефективність ШПЦ при тепловологісній обробці підвищується зі збільшенням кількості шлаку в цементі, що обумовлено утворенням при підвищеній температурі і луго-сульфатній активізації додаткової кількості гідросилікатів кальцію і формуванням щільної дрібнопористої структури цементного каменю.

Знижений вміст у ШПЦ вільного гідроксиду кальцію пояснює його більш високу стійкість проти агресивного впливу м'яких і сульфатних вод, а також до підвищених температур.

Морозостійкість ШПЦ нижче морозостійкості портландцементу; вона зменшується зі збільшенням вмісту шлаку. Бетони на ШПЦ зазвичай витримують 50...100 циклів поперемінного заморожування і відтавання. Істотно підвищити морозостійкість бетонів на ШПЦ можна введенням повітров'ягуючих речовин.

Шлакопортландцемент – ефективний в'язучий матеріал, його можна успішно застосовувати для бетонних і залізобетонних конструкцій, наземних, підземних і підводних споруд. Із застосуванням шлакопортландцементу зведені найбільші гідроелектростанції на Дніпрі, Єнісеї та ін. Шлакопортландцемент успішно застосовують для виробництва збірних залізобетонних конструкцій і виробів із застосуванням пропарювання.

**Пуцоланові та композиційні цементи.** До пуцоланових цементів (цементів IV типу) відносяться гідравлічні в'язучі, отримані шляхом сумісного тонкого помелу портландцементного клінкеру, необхідної кількості гіпсу та активних мінеральних добавок (окрім доменного чи електрофосфорного гранульованих шлаків). Допустимий вміст активних мінеральних добавок у пуцоланових цементів складає 21...35% для групи А і 36...55% – для групи Б.

Для пуцоланових цементів, що відносяться до групи сульфатостійких цементів (при вмісті  $C_3A$  в клінкері не більше 8%), вміст активних мінеральних добавок допускається понад 20 але не більше 40%.

У композиційні цементи (цементи V типу) вводять при сумісному помелі клінкеру добавку, яка складається з двох

компонентів, один з яких є пуцолановою чи близькою до неї добавкою (зола-виносу, глієж або мікрокремнезем), а інший – доменний гранульований шлак. Цементи цього типу групи А містять 36...60% композиції добавок, групи Б – 61...80%. Добавка шлаку в цементах групи А складає 18...40%, групи Б – 41...60%.

Технологія виробництва пуцоланових та композиційних цементів ідентична технології інших видів портландцементу і відрізняється лише підготовкою активних мінеральних добавок – їх подрібненням та сушкою. Тверднення цих видів цементу відбувається внаслідок процесів гідратації та гідролізу клінкерних фаз і хімічної взаємодії гідратних новоутворень з активними компонентами добавок. Активні добавки, зв'язуючи продукт гідролізу, переважно трикальцієвого силікату – гідроксид кальцію – у малорозчинні сполуки прискорюють процеси гідратації.

Зниження концентрації  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в рідкій фазі тверднучих пуцоланових і композиційних цементів призводить до утворення низькоосновних тоберморитоподібних гідросилікатів. При відповідному хімічному складі добавок можливим є утворення також додаткової кількості гідроалюмінатів та гідросульфалюмінатів.

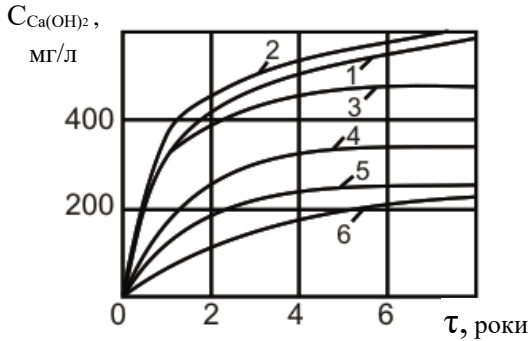
Підвищений вміст мінеральних добавок у цементах призводить до зменшення їх густини до 2,7...2,9 г/см<sup>3</sup> і відповідно більшому об'єму цементного тіста в бетонах і розчинах при постійній витраті цементу. По мірі зростання вмісту пуцоланових добавок нормальна густина цементів, особливо, що містять вологомісткі матеріали осадового походження (діатоміт, трепел, опока та ін.) збільшується. Підвищена водопотреба цементів, у свою чергу, обумовлює підвищення водопотреби бетонних і розчинових сумішей і, як наслідок, погіршення ряду будівельно-технічних властивостей матеріалів.

Добавка золи-виносу в цемент, хоча зазвичай дещо підвищує його нормальну гулоту, чинить на відміну від інших добавок пуцоланового типу помітну пластифікуючу дію на розчинові і бетонні суміші. На пластифікуючий ефект золи

впливає форма, стан поверхні частинок золи, їх дисперсність. Ряд дослідників вважає, що кулеподібні частинки золи можуть розглядатися як свого роду «шарикопідшипники» в суміші аналогічно бульбашкам емульгованого повітря. Більш крупні фракції золи містять невипалені вуглецеві частинки, що мають підвищене водопоглинання і їх пластифікуюча дія знижується.

Пуцоланові та композиційні цементы мають підвищену водоутримуючу здатність, завдяки розвинутій поверхні частинок добавок, їх високій адсорбційній здатності. Це сприяє однорідності і нерозшаровуваності бетонних і розчинових сумішей при їх транспортуванні. Зменшення седиментаційних процесів знижує об'єм відкритих, наскрізних пор у матеріалах, що є шляхами фільтрації води, і збільшує їх водонепроникність. Цьому сприяє також більший об'єм цементного каменю в бетонах і розчинах, завдяки меншій густині цементів, що містять мінеральні добавки, набухання гелевидних продуктів, утворених ними при гідратації. Висока непроникність і відсутність або низький вміст у затверділому цементному камені гідроксиду кальцію пояснюють більшу стійкість бетонів і розчинів на пуцоланових і композиційних цементах ніж на основі звичайних в м'яких і мінералізованих водах (рис. 2.4, табл. 2.3). Для забезпечення сульфатостійкості в клінкері, що використовується для отримання цементів, вміст  $C_3A$  має бути не більше 8%. За даними В.М. Москвіна висновок про високу сульфатостійкість пуцоланових і шлакопортландцементів може бути поширений на стійкість в розчинах сульфату кальцію з концентрацією не більше 10% і сульфату магнію з концентрацією не більше 1%.

Встановлено, що пуцоланові добавки запобігають розширенню бетону, яке викликане реакцією між лугами та заповнювачами.



**Рис. 2.4.** Швидкість вилугування  $\text{Ca(OH)}_2$  дистильованою водою з цементного каменю на різних цементах:

- 1 – портландцемент; 2 – піщаний портланд-цемент;  
 3 – гіпсошлаковий цемент; 4 – пуцолановий портландцемент;  
 5 – піщано-пуцолановий портландцемент;  
 6 – глиноземистий цемент

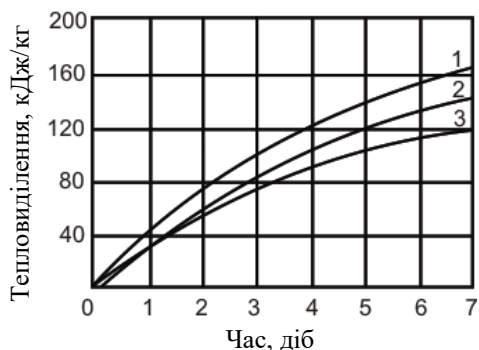
Таблиця 2.3

Кількість  $\text{CaO}$ , що вилугується з розчинів на різних цементах (за даними В.М. Москвіна)

Цемент	Вік зразка, діб	Кількість $\text{CaO}$ , г на кг в'язучого	
		у воді	у 0,15 %-ному розчині $\text{Na}_2\text{SO}_4$
Без добавок	30	27,2	33,1
Пуцолановий (30% трепелу)	90	15,3	18,7
Піщаний (30% піску)	90	31,4	37,4
Піщано-пуцолановий	90	9	13,2

Пуцоланові та композиційні цементи мають понижене тепловиділення, що дає можливість використовувати їх переважно для внутрішніх і підводних частин масивних гідротехнічних споруд. Порівняно невелике зниження тепловиділення виявляють цементи на основі високоалітового

клінкеру. До ефективних способів зниження тепловиділення відноситься розбавлення цементу тонкодисперсною золюю теплових електростанцій. В.В. Стольніков і В.В. Кінд, які проводили детальні дослідження гідротехнічного бетону на зольних цементах, встановили, що тепловиділення бетону на цементі з 25% золи-виносу ТЕС виявляється на 15...25% менше (рис. 2.5) порівняно з тепловиділенням бетону на чистоклінкерному цементі.

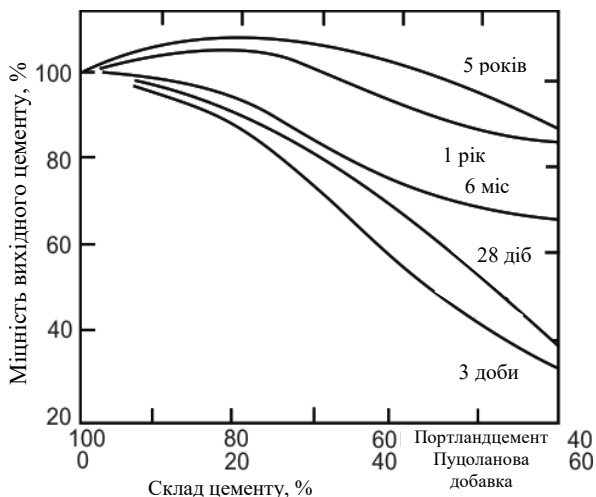


**Рис. 2.5.** Питоме тепловиділення цементів із доданням золи:  
 1 – чистоклінкерний портландцемент; 2 – цемент з 25% золи ТЕС;  
 3 – цемент з 30% золи ТЕС

Основними, окрім підвищеної водопотреби, недоліками пуцоланових і близьких до них композиційних цементів, є сповільнене зростання міцності, особливо в початкові строки тверднення, понижена повітростійкість характерна для цементів з доданнями осадового походження, підвищені деформації усадки і набухання, низька морозостійкість.

На рис. 2.6 приведені дані Ф.М. Лі про вплив на міцність бетону заміни частини портландцементу випаленим глинистим сланцем. З них простежується, що майже лінійно зменшуючи міцність бетонів у ранні строки тверднення, пуцоланова добавка при вмісті її до 40% у річному віці знижує міцність вже незначно, а в п'ятирічному віці відзначається навіть незначний приріст міцності. Згідно даних американських дослідників заміна

пиловидною золюю з низьким вмістом вугілля 30% маси портландцементу знижує міцність бетону, що тверднув у вологих умовах при 20°C на 35...40% до 28 діб, на 20% до 90 діб, на 10% до 180 діб і менше 10% – до 1 року.



**Рис. 2.6.** Вплив пуцоланової добавки на міцність бетону 1:2:4 з В/Ц=0,6, що зберігався у воді при 18°C

На міцність бетонів особливо в ранньому віці позитивно впливає підвищення дисперсності частинок золи і доведення їх розмірів до 5...30 мкм. За даними В.В. Стольнікова бетон на в'язучому з 30% золи Ангарської ТЕЦ з питомою поверхнею 5000 см<sup>2</sup>/г у віці 28 діб мав більш високу міцність при стиску і розтягу, ніж бетон на портландцементі без добавки. Сумісний помел дав можливість отримати композиційний цемент (35% портландцементу, 25% золи, 40% шлаку), міцність якого при стиску склала через 60 діб – 84%, а при розтягу – 90% міцності бетону на основі цементу без добавок.

Для пуцоланових і композиційних цементів характерна висока чутливість до впливу температурного фактору. При зниженні температури темп їх тверднення сповільнюється

більшою мірою, ніж звичайних цементів, а при підвищенні температури, навпаки, вони тверднуть більш інтенсивно. У загальному випадку при використанні змішаних в'язучих для бетонів, що піддають тепловологісній обробці, бажаними є високотемпературні режими пропарювання. Ці цементи небажано застосовувати в осінньо-зимовий період, при бетонуванні способом «термосу». Бетони на їх основі потребують більш тривалого вологісного тверднення для досягнення високої міцності.

При твердненні в умовах недостатньої вологості в бетонах і розчинах на пуцоланових і композиційних цементах розвиваються значні усадочні деформації. Це обумовлено їх підвищеним водовмістом і, як наслідок, розвитком значних капілярних сил при випаровуванні води. Крім того, присутність в цементному камені новоутворень переважно колоїдних розмірів у вигляді низькоосновних гідросилікатів призводить до порівняно високого вмісту адсорбційно-зв'язаної води, випаровування якої також сприяє розвитку усадочних деформацій. Адсорбційно-зв'язана вода з поверхні кристалів гідросилікатів починає видалятися при відносній вологості повітря менше 60%, а при вологості менше 45% видаляється вода, що знаходиться між шарами кристалічної структури гідросилікатів кальцію.

Величина усадки цементного каменю залежить від виду активних мінеральних добавок і особливо від їх водопотреби. Якщо, наприклад, усадка пуцоланового цементу, що вміщує трепел, приблизно в 1,5 рази вище усадки бездобавочного портландцементу, то для золомістких цементів усадка може бути практично такою ж, а при меншій водопотребі бетонних і розчинових сумішей навіть меншою.

Бетони і розчини з використанням пуцоланових і композиційних цементів за морозостійкістю поступаються портландцементним. Це характерно, особливо коли випробування розпочинаються в ранньому віці.

Зниження морозостійкості бетонів і розчинів при підвищеній водопотребі цементів пояснюється, перш за все, їх високою капілярною пористістю. Відомо також, що об'єм

резервних пор контракційного походження, що мають суттєвий вплив на морозостійкість, прямо пропорційний вмісту в бетонах клінкерної частини цементу і ступені її гідратації. Збільшення активності цементів і швидкості їх гідратації сприяє підвищенню морозостійкості бетонів. Введення ряду пуцолан в цемент, у тому числі золи-виносу знижує вміст повітря в бетонах з повітровтягуючими добавками. Застосування повітровтягуючих ПАР для бетонів на пуцоланових і композиційних цементах, так як і для цементів інших видів, є ефективним засобом підвищення їх морозостійкості.

Бетони на основі пуцоланових і композиційних цементів забезпечують достатню лужність середовища для пасивації сталеві арматури. Вони можуть застосовуватись за умови достатнього вмісту клінкерної складової і щільності для залізобетонних конструкцій.

Досвід практичного застосування пуцоланових та композиційних цементів показав, що найкращою галуззю їх застосування є підводні та підземні бетонні та залізобетонні споруди, які працюють в умовах постійного впливу прісних і мінералізованих вод. Ці цементи можна використовувати і для зведення наземних конструкцій, а також виготовлення будівельних розчинів, що знаходяться в умовах підвищеної вологості, для внутрішніх зон масивних бетонних гідротехнічних споруд, що не піддаються впливу заморожування і відтавання.

Дослідження, виконані в останні роки, показали можливість значного покращення всього комплексу будівельно-технічних властивостей бетонів і розчинів на змішаних – пуцоланових і композиційних цементах при введенні високоактивних мінеральних добавок типу мікрокремнезему і ефективних суперпластифікаторів. При цьому відкриваються можливості значного розширення галузі застосування даних цементів.



## 2.2. Цементи спеціального призначення

**Цементи з низькою та помірною екзотермією.** Ці цементи застосовують для зведення масивних гідротехнічних споруд. Реакції гідратації цементу, що відбуваються при його твердненні, є екзотермічними. Тепловиділення цементу залежить від мінералогічного складу і збільшується при вмісті підвищеної кількості найбільш активних мінералів – трикальцієвого алюмінату і трикальцієвого силікату (аліту). На нього впливає також тонкість помелу цементу, наявність в ньому мінеральних і органічних добавок. Підвищена екзотермія цементу має позитивне значення для бетонів, що тверднуть при низьких температурах. Цементи з низькою та помірною екзотермією застосовують для масивних гідротехнічних споруд, де можливе виникнення значних термічних градієнтів, що викликають появу тріщин у бетоні. До *низькотермічних* відносять цементи з величиною тепловиділення в 3-добовому віці не більше 230 Дж/г, в 7-добовому – не більше 270 Дж/г при випробуванні термосним методом. *Помірнотермічними* вважають цементи з величиною тепловиділення в 7-добовому віці не більше 315 Дж/г.

Цементи з нормованою екзотермією виготовляють за спеціальними технічними умовами для зведення гребель та інших масивних гідротехнічних споруд.

Вперше низькотермічний цемент був використаний при будівництві греблі Морріс на р.Сан-Габріель (США) у 1932 р. Згодом в США стандартизували п'ять типів портландцементу. Цементи типів II і IV відносяться відповідно до помірнотермічного і низькотермічного портландцементів. В цементі II-го типу вміст  $C_3S$  нормується не більше 50%,  $C_3A$  – 8%, IV-го типу –  $C_3S$  – не більше 35%,  $C_2S$  не менше 40% і  $C_3A$  – не більше 7%.

Тепловиділення типових американських цементів за даними Вербека і Фостера наведено в табл. 2.4.

Вперше технічні умови на цемент для гідротехнічного будівництва були розроблені в 1941 р для Верхнесвірської ГЕС. Потім вони розроблялися для більшості збудованих ГЕС. Наприклад, для будівництва Красноярської ГЕС постачався

портландцемент з вмістом  $C_3S$  45...50%,  $C_3A$  не більше 7% без мінеральних добавок. Для бетону, до якого не висувались підвищені вимоги за морозостійкістю використовувався також шлакопортландцемент з вмістом доменного гранульованого шлаку не більше 40%. Технічні умови для ряду інших ГЕС у зонах гребель, де не висувались вимоги за морозостійкістю, допускали застосування пуцоланових цементів.

Таблиця 2.4

Тепловідлення типових американських цементів

Тип і найменування портландцементу	Середня теплота гідратації при 21° С в Дж/г у віці					
	3 доби	7 діб	28 діб	3 міс	1 рік	6,5 років
Швидкотверднучий (тип III)	315	386,4	424,2	449,4	474,6	508,2
Звичайний (тип I)	256,2	336	403,2	436,8	457,8	491,4
Помірнотермічний (тип II)	197,4	256,2	336	369,6	399	411,6
Низькотермічний (тип IV)	172,2	210	277,2	315	340,2	357

Дослідженнями В.В. Стольнікова і Ц.Г. Гінзбурга було рекомендовано для гідротехнічного бетону два типи портландцементу, які мають наступний середній мінералогічний склад, %:

Цемент	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	CaO не більше	MgO не більше
Г-1	45	30	6	14	0,5	4
Г-2	54	259	9	9	0,5	4

Портландцемент типу Г-1 рекомендований для морозостійкого бетону зовнішніх зон гідроспоруд з введенням повітровтягуючих добавок. Клінкер такого складу може бути

також застосований при виготовленні змішаних цементів для внутрішніх і зовнішніх підводних зон масивних споруд.

Портландцемент типу Г-2 призначається переважно для тонкостінних збірних і попередньо напружених гідротехнічних конструкцій з введенням необхідних добавок ПАР.

За величиною тепловиділення до портландцементів із помірною і низькою екзотермією близькі сульфатостійкі цементи.

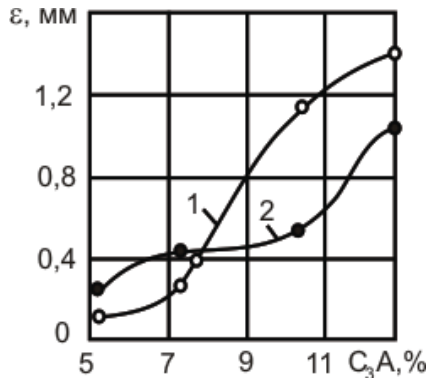
В ряді досліджень показана можливість отримання портландцементів, що поєднують тепловиділення з високою активністю. Особливо мале тепловиділення мають портландцементи, що містять фосфорний ангідрид ( $P_2O_5$ ), а також сполуки фтору ( $CaF_2$ ). Наприклад, при вмісті  $P_2O_5$  1,35% через 6 діб портландцемент мав тепловиділення 40 Дж/г, в той час як контрольний портландцемент 276 Дж/г. Понижене тепловиділення при порівняно високій активності характерне і для ряду складів в'язучих низької водопотреби (ВНВ).

**Сульфатостійкі цементи.** Цементи цієї групи призначені для отримання бетонів та розчинів, стійких до сульфатної корозії. Сульфатна корозія є найбільш розповсюдженою корозією бетону, що виникає при нагромадженні в порах в капілярах малорозчинних солей (корозія III виду за класифікацією В.М.Москвіна). Сульфатну корозію поділяють на два види: сульфоалюмінатну і гіпсову. При *сульфоалюмінатній корозії* під дією сульфатних вод у цементному камені утворюється еtringіт  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ . Кристалізація еtringіту супроводжується збільшенням об'єму приблизно в 4,76 рази. При вмісті у воді більше 1000 мг/л іонів  $SO_4^{2-}$  переважно розвивається *гіпсова корозія*, внаслідок відкладення гіпсу в капілярах цементного каменю.

Найбільша кількість сульфатів знаходиться в сильно мінералізованих ґрунтових водах південних регіонів і в морській воді. В останній, зокрема, при концентрації солей 33...35 г/л кількість  $SO_4^{2-}$  складає 2500...2700 мг/л. Сульфатні агресивні середовища характерні і для багатьох промислових підприємств. Якщо вміст сульфатів у воді перевищує 500 мг/л у перерахунку на  $SO_4^{2-}$  то довговічність бетонів і розчинів може бути

забезпечена застосуванням спеціальних сульфатостійких цементів.

Розробці сульфатостійких цементів передувала велика кількість досліджень, які показали, що найбільшу стійкість при дії сульфатних розчинів має цементний камінь з білогового малоалюмінатного цементу при вмісті  $C_3S < 50\%$  і  $C_3A < 5\%$ . Підвищений вміст трикальцієвого алюмінату  $C_3A$  є одною з головних можливих причин низької сульфатостійкості цементу. Це положення ілюструється на рис. 2.7 згідно даних В.М. Москвіна величиною деформації цементних зразків з різним вмістом  $C_3A$  в сульфатних розчинах. Однак, одне лише зниження вмісту  $C_3A$  у вихідному клінкері є недостатньою умовою високої сульфатостійкості цементу. При низькому вмісті  $C_3A$ , але підвищеній кількості  $C_3S$  утворюється значна кількість  $Ca(OH)_2$  при гідратації цементу і створюються сприятливі умови для кристалізації гіпсу поряд з еtringітом, що викликає сульфатну корозію бетонів.



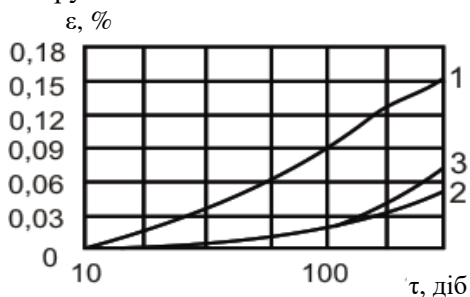
**Рис.2.7.** Залежність деформацій ( $\epsilon$ ) зразків в 5%-х розчинах сульфатів від вмісту  $C_3A$  в цементі: 1 –  $Na_2SO_4$ ; 2 –  $MgSO_4$

Утворення гідросульфоалюмінату кальцію у цементному камені розпочинається при концентрації сульфат-іона в агресивному розчині вже 250 мг/л, кристалізація гіпсу при наявності насиченого розчину  $Ca(OH)_2$  і концентрації  $SO_4^{2-}$  – 1055 мг/л.

Також встановлено, що сульфатостійкість бетонів прямо пов'язана з тонкістю помелу цементу і вмісту в ньому гіпсу. З підвищенням тонкості помелу цементу стає можливим введення більшої кількості гіпсу, який хімічно зв'язується в гідросульфоалюмінат кальцію у початковий період гідратації.

Високий вміст беліту і відповідно низький аліту обумовлює порівняно низьку активність сульфатостійкого портландцементу. Введення в портландцемент активної мінеральної добавки зв'язує  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , що виділився внаслідок гідролізу мінералів клінкеру і перш за все –  $\text{C}_3\text{S}$ . Зменшення концентрації гідроксиду кальцію виключає можливість утворення високоосновних гідроалюмінатів кальцію і відповідно продукту їх взаємодії з гіпсом – еtringіту. Експериментально встановлено, що цементи, які містять більше 50%  $\text{C}_3\text{S}$  при введенні активних мінеральних добавок, набувають таку ж сульфатостійкість як цементи без добавок при вмісті  $\text{C}_3\text{S} \leq 50\%$ .

Найбільшою мірою сульфатостійкість цементних розчинів і бетонів збільшують кремнеземисті добавки (рис. 2.8), зокрема мікрокремнезем, що характеризується високорозвиненою поверхнею і реакційною здатністю. Досліди показали, що цементно-піщані зразки з добавкою 10% мікрокремнезему після 5 міс. випробування у розчині  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  з концентрацією іону  $\text{SO}_4^{2-}$  1000 мг/л не мали проявів руйнування, в той час як без добавки були повністю зруйновані.



**Рис. 2.8.** Деформації розширення зразків цементно-піщаного розчину в середовищі сульфату натрію з концентрацією іону  $\text{SO}_4^{2-}$  10000 мг/л: 1 – цемент без добавок; 2 – з добавкою мікрокремнезему (20%)+суперпластифікатор C-3 (0,7%); 3 – з C-3 (0,7%)

Суттєвий вплив на сульфатостійкість цементів має мікроструктура клінкеру, цемент із швидко охолодженого клінкеру, що містить підвищену кількість скловидної фази і менше кристалічного  $C_3A$ , є більш сульфатостійким, ніж з клінкеру, охолодження якого відбувалось повільно. Введення в цемент активної мінеральної добавки призводить до покращення структури цементного каменю, що також сприяє підвищенню його сульфатостійкості.

Пропарювання і автоклавна обробка покращують сульфатостійкість бетонів. При тепловологісній обробці бетонів у автоклавах кристалізуються більш стійкі гідросилікати підвищеної основності та гідрогранати – гідроалюмосилікати, які відрізняються високою сульфатостійкістю. Крім того, при автоклавній обробці можливе зв'язування гідроксиду кальцію, який міститься в цементному камені, з кремнеземом заповнювачів.

Підвищення сульфатостійкості бетонів досягається при використанні портландцементу на основі *баріймісткого клінкеру*. Оксид барію, що входить до складу цементу, взаємодіє з сульфатами, утворюючи малорозчинний сульфат барію, який ущільнює структуру цементного каменю.

Серед нових способів отримання сульфатостійких цементів можна відзначити введення в цемент при помелі сполук стронцію в т.ч.  $SrSO_4$  замість гіпсу.

Сульфатостійкість цементного каменю визначають різними методами: за величиною набухання зразків при твердненні в сульфатних розчинах, за кількістю і хімічним складом вилугуваної речовини, зміні динамічного модуля пружності.

Поширено за пропозицією В.В. Кінда застосування *коефіцієнту стійкості*, що характеризує зниження міцності цементного розчину 1:3,5 з крупним піском при твердненні на протязі 6 міс. в 5%-ному розчині сульфату натрію або 1%-ному розчині сульфату магнію і при необхідності в інших агресивних середовищах.

Випуск сульфатостійкого цементу, запропонованого В.М. Юнгом, був розпочатий в 1927 р. на Брянському цементному

заводі. Вміст трикальцієвого алюмінату в цьому цементі складав всього лише близько 3,5%. Цього досягнули завдяки заміні глини в складі сировинної суміші трепелом. Спочатку сульфатостійкий цемент використовувався для будівництва морських портових споруд. В наш час значення сульфатостійких цементів зросло завдяки широким масштабам будівництва підземних і підводних споруд, залізобетонних трубопроводів, промислових споруд та ін. Сульфатостійкі цементи застосовують без спеціального захисту бетонів у середовищах, що містять до 4000 мг/л сульфат-іонів.

До групи сульфатостійких цементів, що випускаються цементною промисловістю, відносяться, окрім сульфатостійкого портландцементу, сульфатостійкий портландцемент з мінеральними добавками, сульфатостійкий шлакопортландцемент і пуцолановий портландцемент. Вимоги до сульфатостійких цементів наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Вимоги до сульфатостійких цементів

Показники	Сульфатостійкий портландцемент	Сульфатостійкий портландцемент з мінеральними добавками	Сульфатостійкий шлакопортландцемент	Пуцолановий портландцемент
<i>Характеристика клінкеру:</i>				
Вміст трикальцієвого силікату (C <sub>3</sub> S), %, не більше	50	не нормується		
<i>Характеристика цементу:</i>				
Вміст трикальцієвого алюмінату (C <sub>3</sub> A), % не більше	5	8	8	8

продовження табл. 2.5

Показники	Сульфатостійкий портландцемент	Сульфатостійкий портландцемент з мінеральними добавками	Сульфатостійкий шлакопортландцемент	Пуцолановий портландцемент
Сума трикальцієвого алюмінату і чотирьохкальцієвого алюмофериту ( $C_3A+C_4AF$ ), %, не більше	22	не нормується		
Вміст $Al_2O_3$ , %, не більше	5	5	5	5
Вміст $MgO$ , %, не більше	5	5	5	5
Вміст активних мінеральних добавок, % (шлаку і пуцолани для сульфатостійких портландцементу і портландцементу з мінеральними добавками, доменного шлаку для шлакопортландцементу і пуцолан для пуцоланового портландцементу)	не допускається	вище 10 і не більше 20	вище* 40 і не більше 60	вище 20 і не більше 40
Вміст $SO_3$ , %, не більше	3	3	4	3,5



продовження табл. 2.5

Показники	Сульфато- стійкий портланд- цемент	Сульфато- стійкий портланд- цемент з мінеральними добавками	Сульфато- стійкий шлако- портланд- цемент	Пуцолан- новий порт- ландце- мент
<i>Характеристика цементу:</i>				
Марки цементу	400	400, 500	300, 400	300, 400
Питома поверхня, см <sup>2</sup> /г, не менше	2500	2500**	2500	2500**
Вміст лужних оксидів (Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O) в перерахунку на Na <sub>2</sub> O	Встановлюється за згодою споживача			
Вміст Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в шлаках, %, не більше	-	8	12	-

\* В сульфатостійкому шлакопортландцементі допускається заміна шлаку пуцоланою або золою в кількості не більше 10% від маси цементу.

\*\* Для цементів, що містять добавки осадового походження, тонкість помелу визначають по залишку на ситі №008, який не повинен перевищувати 15% від маси проби.

До складу сульфатостійких цементів допускається введення пластифікуючих та гідрофобізуючих ПАР у кількості не більше 0,3% від маси цементу в перерахунку на суху речовину добавки. Добавки ПАР сприяють підвищенню сульфатостійкості бетонів і розчинів внаслідок збільшення їх щільності і зменшення капілярного всмоктування.

Сульфатостійкі портландцемент і портландцемент з мінеральними добавками можуть бути використані для бетонних і залізобетонних конструкцій, які поряд з дією сульфатних вод піддаються систематичному заморожуванню і відтаванню, зволоженню і висиханню. Сульфатостійкі шлакопортландцемент

і пуцолановий портландцементи застосовуються для бетонів, що експлуатуються переважно в підземних і підводних спорудах.

**Пластифіковані та гідрофобні цементи.** Дані різновиди портландцементу отримують при введенні в процесі їх подрібнення гідрофілізуючих (*пластифікований цемент*) або гідрофобізуючих (*гідрофобний цемент*) поверхнево-активних речовин (ПАР). Пластифікований і гідрофобний цементи були розроблені і почали виготовлятися в кінці 40-х, початку 50-х років минулого століття. В процесі помелу цементу ПАР адсорбуються на його зернах і надають йому ряд нових властивостей.

Гідрофілізуючі ПАР поглинаються на поверхні зерен цементу і утворюють гідрофільні плівки, сприяючи кращому змочуванню частинок водою, зменшенню їх зчеплення і підвищенню пластичності цементного тіста. З гідрофілізуючих ПАР широко застосовують технічні лігносульфонати (ЛСТ) зазвичай в кількості 0,15...0,35% від маси цементу. Раніше ці добавки були відомі під назвою ССБ (сульфітно-спиртова барда) і СДБ (сульфітно-дріжджева бражка). Вони першими були використані для отримання пластифікованого портландцементу. Добавки ЛСТ застосовуються також і безпосередньо при отриманні бетонних сумішей при введенні їх з водою замішування. В останні роки розроблені способи суттєвого покращення якості ЛСТ шляхом їх модифікування. Розроблені також технології отримання пластифікованих цементів із застосуванням сучасних пластифікуючих добавок – суперпластифікаторів.

Пластичність цементів визначають відповідно до величини розпливу конуса з цементно-піщаного розчину на струшуючому столику. Розчин з суміші пластифікованого портландцементу з стандартним піском складу 1:3 (за масою) при водоцементному відношенні рівному 0,4 після 30 струшувань на струшуючому столику повинен мати розплив конуса не менше 135 мм.

Застосування пластифікованого портландцементу дає можливість без збільшення витрати води отримати бетонну суміш більшої рухливості і полегшити її вкладання або при незмінній рухливості (табл. 2.6) і водоцементному відношенні

знизити витрату цементу. При збереженні встановленої витрати цементу і необхідної рухливості зменшується водоцементне відношення бетонної суміші, що призводить до підвищення міцності, морозостійкості та водонепроникності бетону.

Таблиця 2.6

Рухливість бетонних і розчинових сумішей на звичайному та пластифікованому портландцементях

Цемент	Розчин	Бетон		
	Розплив конуса, мм	Осадка конуса, см		
Звичайний	125...137	0,5...1	1...2	2...4
Пластифікований	165...182	2...3	3...6	6...12

Сучасний пластифікований цемент за міцнісними показниками практично не відрізняється від звичайного. Цей вид цементу може мати дещо сповільнені строки тужавлення. Для нього характерні менші деформації усадки і розширення.

При пропарюванні бетону на пластифікованому портландцементі бажано застосовувати більш м'які режими з подовженою попередньою витримкою.

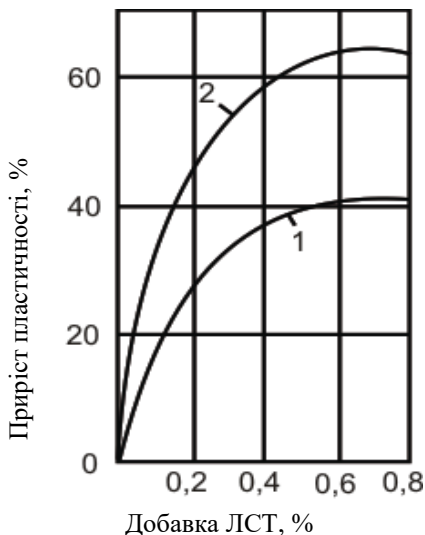
Добавки ПАР сприяють при застосуванні пластифікованого цементу в бетоні підвищеному повітрявтягуванню з утворенням переважно замкнутих пор, що позитивно впливає на стійкість бетону до циклічного заморожування і відтавання.

Застосування пластифікованого портландцементу при зведенні масивних споруд сповільнює швидкість підвищення температури внаслідок пониженої екзотерії бетону, що зменшує розвиток термічних напружень.

Покращенню властивостей бетонів і розчинів на пластифікованому цементі сприяє ефект адсорбційного модифікування добавками ПАР кристалічної структури цементного каменю, що супроводжується зменшенням розмірів та зміною форми кристалів гідратних новоутворень.

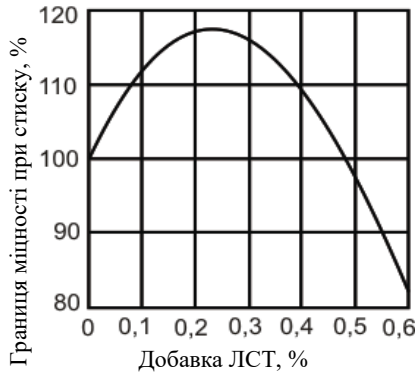
Зменшення капілярної пористості бетонів і розчинів на основі пластифікованого портландцементу, їх підвищена водонепроникність призводить до збільшення сульфатостійкості та стійкості до інших видів корозії.

Вплив добавок ПАР залежить від мінералогічного складу клінкеру, що обумовлено різною адсорбційною здатністю клінкерних мінералів. Так, за величиною адсорбційної здатності по відношенню до ЛСТ мінерали клінкеру розташовуються в наступний ряд  $C_3A > C_4AF > C_2S > C_3S$ . Найбільший ефект пластифікації бетонних і розчинових сумішей досягається при використанні алітового цементу (рис. 2.9).



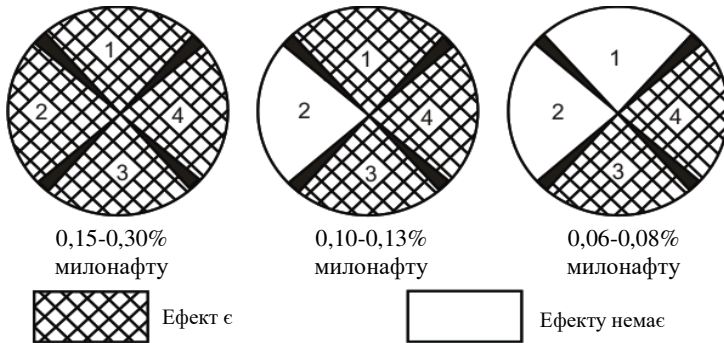
**Рис. 2.9.** Вплив вмісту добавки ЛСТ на пластичність цементів різного мінералогічного складу:  
1 – алюмінатний цемент; 2 – алітовий цемент

У пластифікованого портландцементу зростання міцності в початковий період тверднення виявляється дещо сповільненим, хоча до 28 добового віку відставання міцності зазвичай не спостерігається. Для досягнення максимально можливої міцності важливе значення має вибір оптимального вмісту пластифікуючої добавки (рис. 2.10).



**Рис. 2.10.** Вплив добавки ЛСТ на міцність розчину у віці 28 діб

Гідрофобний портландцемент запропонували М.І.Хігерович та Б.Г.Скрамтаєв. Його отримують при введенні в цемент у процесі помелу таких гідрофобізуючих добавок як асідол, милонафт, олеїнова кислота, кубові залишки синтетичних жирних кислот і т.д. Технологічний ефект при гідрофобізації цементу залежить від вмісту ПАР (рис.2.11).



**Рис. 2.11.** Технологічний ефект при гідрофобізації цементів (за М.І. Хігеровичем): 1 – інтенсифікація помелу; 2 – збереження активності; 3 – пластифікація розчинів і бетонів; 4 – підвищення стійкості бетонів та розчинів

Гідрофобізуючі добавки утворюють на зернах цементу надтонкі адсорбційні шари – незмочувані водою оболонки, що мають решітчасту будову. Краплина води на поверхні гідрофобного цементу не повинна поглинатися протягом 5 хв.

Гідрофобність портландцементу обумовлює його головну перевагу – високу збережуваність. Гідрофобні цементи не знижують активності протягом 1...2 років навіть у несприятливих умовах, в той час, коли звичайні цементи вже через 3...6 міс. втрачають до 30% і більше початкової міцності. При замішуванні і перемішуванні з водою цих цементів гідрофобні оболонки руйнуються, що забезпечує нормальне протікання процесів гідратації та тверднення.

В табл. 2.7 приведені дані про зміну активності звичайного і гідрофобного портландцементів після трирічного зберігання. З них випливає, що після багатьох місяців зберігання, активність гідрофобних цементів практично не змінюється.

Таблиця 2.7

Зміна активності портландцементів після трирічного зберігання у мішках

Вид цементу	Границя міцності, МПа, при випробуванні у терміни*		
	3 доби	7 діб	28 діб
Звичайний у свіжовиготовленому вигляді	$\frac{2,2}{34}$	$\frac{2,1}{38}$	$\frac{3,2}{53}$
Гідрофобний у свіжовиготовленому вигляді	$\frac{2,2}{29,5}$	$\frac{2,3}{29}$	$\frac{2,7}{48,7}$
Звичайний після трьох років зберігання	Повністю злежаний		
Гідрофобний після трьох років зберігання	$\frac{1,8}{18,8}$	$\frac{2,2}{27,1}$	$\frac{3,6}{42,9}$

\*Над ризикою приведені результати визначення границі міцності на згин, під ризикою – на стиск.

При тривалому зберіганні гідрофобних цементів може спостерігатися ефект *автоактивізації* – довільного підвищення активності. За даними М.І. Хігеровича, якщо для звичайного цементу після 30 міс. зберігання у відкритих мішках при

вологості повітря 60...70% активність знизилась на 67%, то для гідрофобного цементу з добавкою олеїнової кислоти вона навпаки збільшилась на 70%. Механізм автоактивізації гідрофобного цементу при його довготривалому зберіганні полягає в проникненні через решітчасті гідрофобні оболонки водяної пари і вуглекислого газу вглиб цементних зерен і хімічному диспергуванні цементу, що при цьому відбувається (рис. 2.12).



**Рис. 2.12.** Схематичне зображення змін, що відбуваються в зернах гідрофобного цементу при його зберіганні (а – решітчаста будова гідрофобних оболонки; б – гідрофобний цемент: 1 – свіжий; 2 – злежаний)

Гідрофобний цемент, хоча і дещо меншою мірою ніж пластифікований, підвищує пластичність бетонних сумішей і розчинів, що особливо відчувається в міру їх опіснення тобто збільшення кількості заповнювачів. В середньому зменшення водопотреби складає 8...10%. Характерно, що на відміну від гідрофобних пластифіковані цементу, навпаки краще пластифікують «жирні» суміші, що вміщують підвищену

кількість цементу. Гідрофобізуючі добавки діють як пластифікатори внаслідок адсорбційно-змащувальної дії тонких орієнтованих плівок. Такий ефект виникає в системах, коли цементне тісто розподілене тонким шаром між поверхнями зерен заповнювача. Гідрофілізуючі добавки типу ЛСТ пластифікують бетонні суміші і розчини внаслідок диспергуючої дії на частинки цементу і розрідження цементного тіста. Чим більше цементного тіста в розчинових і бетонних сумішах тим вище їх пластифікуюча дія.

Для розчинових і бетонних сумішей на основі гідрофобного цементу характерні понижене водовідділення і більш тривале збереження легкоукладальності. Цементно-піщані суміші на основі гідрофобних цементів за здатністю зберігати в часі однорідність і пластичність майже еквівалентні цементно-вапняно-піщаним сумішам.

При введенні в цемент гідрофобізуючих ПАР також як і гідрофілізуючих має місце адсорбційне модифікування структури цементного каменю, зменшуються капілярне всмоктування і водопоглинання, збільшується водонепроникність внаслідок зміни знаку змочування стінок пор і капілярів, зменшення їх розмірів. Сприятлива зміна структури цементного каменю, розчинів і бетонів при застосуванні гідрофобного цементу, втягнення певної кількості повітря сприяє суттєвому збільшенню морозостійкості. В досліджах Г.І. Горчакова зразки бетону на звичайному цементі після 300 циклів заморожування і відтавання практично зруйнувались, при введенні 0,2% від маси цементу добавки милонафту вони витримали більше 1200 циклів. При цьому гідрофобізований бетон був виготовлений із зменшеною витратою цементу при тому ж водоцементному відношенні, що й контрольний.

Сповільнення дифузійних процесів і поглинання сольових розчинів при гідрофобізації цементу сприяє підвищенню корозійної стійкості розчинів і бетонів.

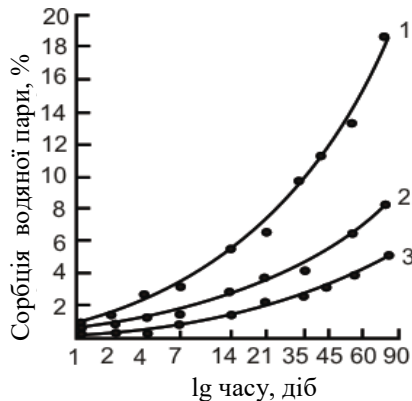
Одним з практичних наслідків сповільнення руху води і водних розчинів в гідрофобізованих цементних системах є зменшення утворення сольових нальотів. Такі нальоти (“висоли”), що з’являються на бетонних поверхнях і в цегляній



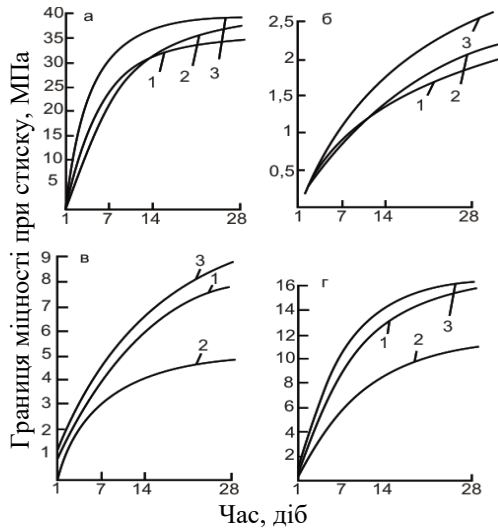
кладці, виникають при міграції розчинних солей і гідроксиду кальцію. Їх джерелом також можуть бути домішки в заповнювачах бетону і оксиди лужних металів у цементі. Висоли не лише погіршують зовнішній вигляд будівель і споруд, але й можуть бути причиною погіршення механічних та інших експлуатаційних властивостей матеріалів і конструкцій.

Активність гідрофобних цементів у 28-добовому віці зазвичай не нижче ніж у звичайних, однак у перші дні тверднення їх міцність, як правило, зростає дещо повільніше. Міцність лежалого гідрофобного цементу вища ніж звичайного як у більш пізні, так і у початкові терміни тверднення.

Переваги пластифікованих і гідрофобних цементів сумуються при введенні комплексних добавок, що містять ПАР гідрофілізуючого та гідрофобізуючого типів. Гідрофобізуючі добавки, які зазвичай є нерозчинними можна емульгувати гідрофілізуючими ПАР, наприклад, лігносульфонатами. Введення комплексних гідрофобно-пластифікуючих добавок дає можливість отримати *гідрофобно-пластифіковані цементи*, що мають універсальну пластифікуючу дію на бетонні і розчинні суміші різного складу і суттєво покращують ряд інших його властивостей (рис. 2.13, 2.14).



**Рис. 2.13.** Ізотерми сорбції водяної пари цементом при відносній вологості 100%: 1 – без добавки; 2 – з 0,1% милонафту + 0,1% ЛСТ; 3 – з 0,2% комплексних добавок (кубові залишки синтетичних жирних кислот + ЛСТ)



**Рис. 2.14.** Вплив добавок ПАР на міцність мономінеральних цементів:  
 а –  $C_3S$ ; б –  $C_2S$ ; в –  $C_3A$ ; г –  $C_4AF$ ;  
 1 – без добавки; 2 – з 0,2% ЛСТ; 3 – з 0,2% комплексних добавок  
 (кубічні залишки синтетичних жирних кислот + ЛСТ)

**Високоміцні цементи.** Ця група цементів призначена для виробництва високоміцних бетонів, що застосовуються для зведення відповідальних споруд, в т.ч. і гідротехнічного призначення. До високоміцних бетонів (High Strength concrete) відносять, звичайно, бетони з міцністю при стиску в 28-добовому віці 70...150 МПа. Євростандарт EN206 передбачає можливість виготовлення і застосування бетонів включаючи клас В115.

Розроблено наступні основні напрямки отримання високоміцних (ВМЦ) і швидкотверднучих (ШТЦ) цементів:

- послідовна оптимізація всіх переділів виробництва цементу при суворій регламентації технологічних параметрів;
- підвищення у складі клінкеру вмісту найбільш активних мінералів, їх легування шляхом введення в сировину суміш спеціальних добавок;
- введення в цемент спеціальних кристалізаційних добавок (затравок);

- синтез змішаних високоактивних цементів.

Для отримання ВМЦ і ШТЦ велике значення має тонкий помел і висока гомогенність сировинної суміші, оптимальний режим випалу клінкеру, правильний підбір виду і зольності палива, різке охолодження клінкеру. Велике значення для активності клінкеру має також його мікрокристалічна структура. Цемент покращеної якості отримують переважно при чіткій правильній кристалізації аліту, що характерно для так званої монаодластичної структури, яка утворюється при оптимальних умовах випалювання. Рання міцність портландцементу визначається вмістом зерен менше 10 мкм, а більш пізня – до 30 мкм. Для ШТЦ і ВМЦ вміст фракцій цементу розміром менше 30 мкм повинен складати не менше 65...75%, залежно від марки портландцементу він може досягати 80%.

Вперше в Україні на Здолбунівському цементному заводі отримано високоміцні особливо швидкотверднучі цементи (ОШТЦ) за рахунок суттєвого підвищення у клінкерній складовій вмісту трикальцієвого силікату та оптимізації зернового складу цементу.

Рекомендований зерновий склад високоміцних цементів (ВМЦ) і ОШТЦ наведений в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Зерновий склад особливо швидкотверднучих (ОШТЦ) і високоміцних (ВМЦ) цементів

Цемент марки	Питома поверхня, м <sup>2</sup> /кг	Вміст частинок, мкм, %			
		<5	5-30	30	>60
М600	близько 300	5-12	30-50	30-45	5
ОШТЦ	370-400	20-28	45-70	11-25	6
ВМЦ М700	320-400	15-2-5	45-70	20-35	10
ВМЦ М800	близько 600	15-30	55-75	3-25	1

Дослідження показали, що при підвищенні питомої поверхні цементу з 200 до 600 м<sup>2</sup>/кг при оптимальному вмісті гіпсу для кожного рівня дисперсності ступінь гідратації та міцність в 1...3 добовому віці зростають, в 28-добовому віці

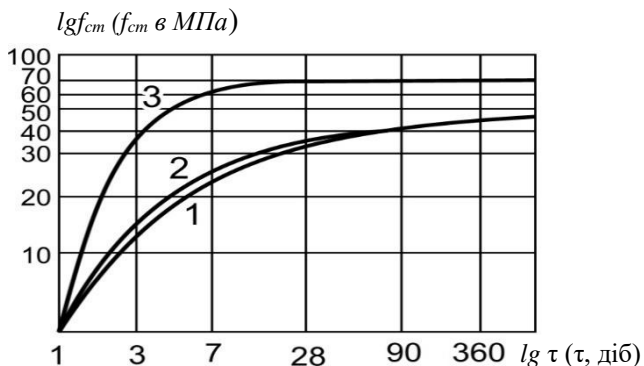
міцність збільшується лише до певної границі, а потім знижується.

Забезпечення необхідного зернового складу ШТЦ і ВМЦ можливе при помелі в млинах, що працюють в замкнутому циклі. При цьому, однак, має місце суттєве (до 40...50%) зниження продуктивності мелючих агрегатів.

У ряді країн розроблені надшвидкотверднучі цементи, що дають можливість вже через 2...6 год. після змішування досягти міцність при стиску 5...20 МПа, а в 28 діб 70...80 МПа і більше. До таких цементів можна віднести фтормісткий надшвидкотверднучий портландцемент. В якості сировинних матеріалів для нього використовуються вапняк, шлаки вторинної переплавки алюмінію, фторид кальцію і спеціальна добавка для утримання фтору в клінкері. Цемент, модифікований фтором, досягає через 6 год. нормального тверднення міцності на стиск 5...8 МПа. Застосування фтормісткого цементу дає можливість забезпечити при виробництві залізобетонних виробів необхідну розпалубочну міцність вже через 1 год. теплової обробки.

Перспективним способом отримання надшвидкотверднучих цементів є введення у склад сировинних сумішей сульфату кальцію в кількості близько 10%. Утворені при випалюванні сульфоалюмінати кальцію надають цементу здатність до швидкого тверднення, високу гідравлічну активність. Сировинним компонентом для виробництва клінкеру такого цементу можуть бути фосфогіпс та інші промислові відходи.

До перспективних видів в'язучих для високоміцних бетонів (рис. 2.15) можна віднести в'язучі низької водопотреби (ВНВ) і тонкомелені багатокомпонентні цементы (ТБЦ). Розвиток теоретичних уявлень про цементы з мінеральними добавками і добавками ПАР. розробка ефективних суперпластифікаторів цементних систем дали можливість запропонувати змішані в'язучі нового покоління, які характеризуються низькою водопотребою і високою міцністю при порівняно низькому масовому співвідношенні клінкерної складової і мінеральних добавок.



**Рис. 2.15.** Кінетика твердіння бетонів із суперпластифікатором С-3:  
 1 – без добавки; 2 – з С-3 при постійному В/Ц;  
 3 – з С-3 зі зниженим В/Ц

*В'яжучі низької водопотреби (ВНВ)* отримують сумісним тонким помелом клінкеру або готового портландцементу і активних мінеральних добавок у присутності порошкоподібного суперпластифікатора. Відмінними особливостями ВНВ є висока дисперсність ( $S_{num}=400...500 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), низька водопотреба (нормальна густина до 18%), висока активність (до 100 МПа і вище).

При тонкому помелі в'яжучого має місце механохімічна активація, внаслідок якої збільшується число активних центрів і нових вільних валентностей в одиниці об'єму клінкеру і зернах мінерального наповнювача, стає можливим утворення органо-мінеральних комплексів між тонкодисперсними мінералами і молекулами суперпластифікатора. В результаті різко збільшується пластифікуючий ефект добавок, міцність в'яжучого зростає на 2...3 марки.

*Тонкомелені багатоконпонентні цементы (ТБЦ)* – гідралічні в'яжучі речовини, отримані сумісним тонким помелом портландцементного клінкеру чи портландцементу й активних або інертних мінеральних добавок. Сумарний масовий вміст добавок у цементах даного виду може складати 20...50% і більше. Оптимальна дисперсність ТБЦ складає в середньому

450 м<sup>2</sup>/кг. Подальше збільшення тонкості помелу з урахуванням різко зростаючих енергозатрат і незначного підвищення міцності в'язучого є недоцільним.

Виробництво тонкомелених багатокомпонентних цементів може бути організоване як на цементних заводах, так і на підприємствах будіндустрії із застосуванням кульових, струменевих млинів або вібромлинів.

ТБЦ застосовують у бетонних сумішах і розчинах при введенні з водою замішування суперпластифікуючих добавок. При цьому, враховуючи значну кількість мінеральних добавок, вміст суперпластифікаторів відповідно зростає порівняно з необхідним для чистоклінкерних портландцементів.

**Алюмінатні та сульфоалюмінатні цементи.** До групи алюмінатних і сульфоалюмінатних цементів відносяться гідравлічні швидкотверднучі в'язучі, основні властивості яких обумовлені відповідно низькоосновними алюмінатами та сульфоалюмінатами кальцію.

До *алюмінатних* відносяться глиноземистий і високоглиноземистий цементи. Якщо у глиноземистих цементів вміст  $Al_2O_3$  знаходиться у межах 30...50%, то у високоглиноземистих він сягає до 70...80%.

Патент на отримання глиноземистого цементу був виданий у 1908 р. французькому винахіднику Біду. В ньому запропоновано отримання швидкотверднучого сульфатостійкого в'язучого шляхом плавлення суміші бокситу (або іншого глиноземовміщуючого матеріалу з низьким вмістом кремнезему) та вапна у співвідношенні, яке забезпечує отримання моноалюмінату кальцію  $CaO \cdot Al_2O_3$ .

Від інших мінеральних в'язучих глиноземистий цемент відрізняється, насамперед, високою міцністю, яка досягається в ранньому віці і обумовлена перевагою у його складі мінералу  $CaO \cdot Al_2O_3$  (СА). Уже через 1 добу він набирає міцність близьку до максимальної. Швидка гідратація цього цементу приводить до інтенсивного виділення ним тепла, що дає можливість йому інтенсивно тверднути при знижених температурах (5...10° С) на відміну від портландцементу. Глиноземистий цемент має більш високу сульфатостійкість, ніж всі інші мінеральні в'язучі. Ще

однією важливою особливістю глиноземистого цементу є стійкість при дії високих температур, що відкриває можливість виготовлення на його основі вогнетривких бетонів.

За вмістом  $Al_2O_3$  глиноземисті цементи підрозділяються на види: *глиноземистий цемент (ГЦ), високоглиноземистий цемент I (ВГЦ I), високоглиноземистий цемент II (ВГЦ II) і високоглиноземистий цемент III (ВГЦ III)*. Нормований хімічний склад цих цементів наведений у табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Хімічний склад глиноземистих цементів

Вид цементу	Вміст оксидів у %						
	$Al_2O_3$	CaO	$Fe_2O_3$	$SiO_2$	MgO	$SO_3$	TiO <sub>2</sub>
	не менше	не більше					
ГЦ	35	-	-	-	-	-	-
ВГЦ I	60	32	1,0	3,0	1,5	2,0	0,05
ВГЦ II	70	28	1,0	1,5	1,0	2,0	0,05
ВГЦ III	80	18	0,5	0,5	0,5	0,5	0,05

Глиноземовміщуючими сировинними матеріалами для отримання глиноземистого цементу є *боксити* – осадові гірські породи, що складаються, переважно з мінералів, представлених гідроксидом алюмінію.

У суміші з бокситами чи іншими глиноземовміщуючими компонентами використовують вапняки, а в окремих випадках випалене вапно. Шкідливими домішками у вапняках є оксиди  $SiO_2$  і MgO, вміст яких обмежується до 3% для  $SiO_2$  і 2% – для MgO.

Виробництво глиноземистих цементів може здійснюватися плавленням або спіканням шихти.

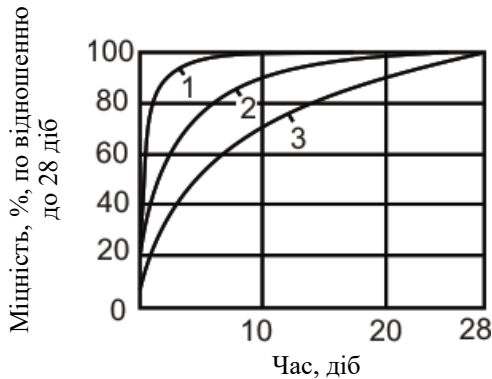
Вибір способу виробництва залежить, насамперед, від особливостей складу сировинної суміші. При використанні високозалістистих бокситів суміш має близькі температури спікання та плавлення і доцільно застосовувати спосіб плавлення, застосування малозалістистих бокситів дає можливість використовувати спосіб спікання.

Тонкість помелу глиноземистих цементів повинна забезпечувати залишок на ситі №008 не більше 10%. Для високоглиноземистих цементів додатково нормується питома поверхня, яка не повинна бути нижчою 300 м<sup>2</sup>/кг. Більш тонкий помел позитивно впливає на міцність, особливо для глиноземистих цементів із підвищеним вмістом оксидів заліза та кремнезему. В меншій мері він позначається на активності цементів із високим вмістом СаО.

При твердненні глиноземистих цементів вирішальним процесом є гідратація однокальцієвого алюмінату.

За міцністю на стиск (МПа) у віці 3 доби цементи поділяють на марки: для глиноземистого цементу – ГЦ-40; 50 і 60, високоглиноземистих – ВГЦ I – 35, ВГЦ II – 25 і 35, ВГЦ III – 25.

Крива зростання міцності глиноземистого цементу у порівнянні з портландцементом приведена на рис. 2.16.



**Рис. 2.16.** Крива зростання міцності різних цементів:

- 1 – глиноземистий цемент;
- 2 – швидкотверднучий портландцемент;
- 3 – звичайний портландцемент

Загальна кількість теплоти, яка виділяється глиноземистим цементом, приблизно така ж, як і портландцементом. Однак на відміну від останнього більша частина теплоти гідратації



глиноземистого цементу виділяється вже в перші 10 год. тверднення, а через 24 год. виділення теплоти стає незначним. Відповідно змінюється і температура бетону, що твердне, особливо в масивних конструкціях. Так само, як і для портландцементного бетону, для глиноземистого кількість теплоти, що виділилася, пропорційна витраті цементу і його активності.

Інтенсивне розігрівання бетону на глиноземистому цементі сприяє його твердненню та задовільному набору міцності при знижених температурах і достатньому теплообміні з навколишнім середовищем. Разом із тим, у зв'язку з можливістю значного розігріву не рекомендується укладати бетон на глиноземистому цементі шарами більше 30...45 см і через інтервали менше 24 год. Із цією ж метою рекомендується застосовувати охолоджені заповнювач і воду. Для запобігання спаду міцності поверхню бетону поливають після тужавлення цементу. Для утворення стійкого при підвищених температурах гідросульфатоміанату кальцію до складу глиноземистого цементу вводять до 20...25%  $\text{CaSO}_4$ .

Деформації глиноземистого цементу при твердненні мають такий же практично характер, як і портландцементу – у воді він набухає, на повітрі дає усадку. Однак по абсолютній величині усадочні деформації менші та швидше завершуються, ніж у портландцементі. Усадка при твердненні глиноземистого цементу в 2...2,5 рази менша ніж портландцементу.

Висока швидкість гідратації і характер продуктів тверднення обумовлюють низьку пористість цементного каменю, утвореного глиноземистим цементом, і, як наслідок, високу водонепроникність і морозостійкість.

Експлуатація багатьох споруд у різних країнах підтверджує високу сульфатостійкість бетонів на глиноземистому цементі. Є різні пояснення підвищеної сульфатостійкості цього виду цементу.

Глиноземистий цемент стійкіший за портландцемент по відношенню не лише до сульфатів, але й ряду інших агресивних середовищ: хлористих сполук, вуглекислих мінералізованих вод, деяких органічних кислот та ін. Разом із тим, він поступається за

стійкістю портландцементу в розчинах неорганічних кислот і лугів.

Бетон на глиноземистому цементі стійкий при температурі до 1300° С, а з заповнювачами з корунду та плавленого оксиду алюмінію до температури 1600° С і вище. Найбільш висока вогнетривкість досягається при застосуванні високоглиноземистих цементів, у складі яких переважає диалюмінат кальцію.

Насамперед доцільність застосування глиноземистого цементу виникає при аварійних і відбудовних роботах, терміновому ремонті спеціальних споруд, відповідальних залізобетонних конструкцій, промислових споруд і мостів. Його застосовують при зведенні підземних споруд, швидкісному тампонуванні нафтових і газових свердловин. Він ефективний у спорудах, які працюють у сульфатних, морських та інших агресивних середовищах. Цей вид цементу також застосовується при зимовому бетонуванні, для торкретування.

На основі глиноземистого та високоглиноземистого цементів виготовляють вогнетривкі бетони, які за своїми якісними показниками відносяться до кращих видів вогнетривких матеріалів.

Важливою галуззю застосування алюмінатних цементів є виготовлення на їх основі композиційних в'язучих, що розширюються при твердненні.

На основі глиноземистого клінкеру, який містить низькоосновні алюмінати кальцію, розроблена велика група розширних цементів. З них найчастіше застосовуються водонепроникний розширний цемент та розширний гіпсоглиноземистий цемент.

*Водонепроникний розширний цемент* (ВРЦ) отримують спільним помелом або ретельним змішуванням глиноземистого цементу, будівельного чи високоміцного гіпсу та високоосновного гідроалюмінату кальцію. ВРЦ розроблений В.В.Михайловим у 1935...1941 рр. Оптимальний склад ВРЦ: глиноземистий цемент – 70...76%, напівводний гіпс – 20...22%, високоосновний гідроалюмінат кальцію – 10...11%.

ВРЦ – швидкоутужавіюче в'яжуче. Його початок тужавлення повинен наставати не раніше 4 хв., кінець не пізніше 10 хв. від початку замішування. Для уповільнення тужавлення застосовують добавки оцтової, виннокам'яної кислот, бури, ЛСТ. За допомогою відповідних добавок вдається сповільнити початок тужавлення до 15...30 хв.

Лінійне розширення зразків, з цементного тіста нормальної густоти повинно складати при повітряному твердненні у віці 1 доба не менше 0,05%, у 28 діб – не менше 0,02%. При зануренні у воду через годину після замішування у віці 1 доба розширення складає не менше 0,2% і не більше 1%. Величина розширення ВРЦ регулюється зміною співвідношення його компонентів. Основне розширення цементу відбувається у першу добу.

Зразки ВРЦ із тіста нормальної густоти або розчину складу 1:2 через 1 добу після виготовлення повинні витримувати тиск води до 0,6 МПа без ознак фільтрації.

Через 6 год. ВРЦ набирає до 25% 28-добової міцності, 1 добу – 50%, 3 діб – 80% і 7 діб – 90%. У віці 28 діб міцність цього цементу складає близько 50 МПа.

*Гіпсоглиноземистий розширний цемент* (ГГРЦ) – високоміцне швидкотверднуче гідравлічне в'яжуче, отримане при спільному помелі глиноземистого клінкеру з природним двоводним гіпсом. Вміст гіпсу в ГГРЦ рекомендується в межах 30%. При замішуванні цього цементу водою спочатку кристалізуються гідроалюмінати кальцію, що взаємодіють з гіпсом, утворюючи гідросульфалюмінат кальцію, який викликає розширення тверднучого цементного каменю.

ГГРЦ був запропонований І.В. Кравченко, в промисловому масштабі почав виготовлятися з 1951 р. Володіючи перевагами ВРЦ, цей цемент має більш тривалі строки тужавлення і більш низьку вартість.

Гіпсоглиноземистий розширний цемент показав високу ефективність при виготовленні водонепроникних конструкцій, монолітних збірних залізобетонних споруд, тампонуванні нафтових свердловин. Цей вид цементу використовують також для захисту від радіоактивних випромінювань і виготовлення *гідратних бетонів*, ефективних для послаблення потоку

нейтронів. Затверділий цементний камінь на основі ГГРЦ хімічно зв'язує близько 30...32% води, глиноземистого цементу 26...28%, а звичайного портландцементу – 22...24%.

При вивченні взаємодії алюмінатів кальцію з гіпсом було встановлено, що при температурі 1200° С утворюється сполука  $n\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4$ , де значення  $n$  близьке до 3. Згодом можливість синтезу сульфатоалюмінатів кальцію (САК) у системі  $\text{CaO}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaSO}_4$  при нагріванні, вже починаючи з температури 800...1000° С, була підтверджена багатьма дослідниками.

Клінкер, що містить САК можна отримати з вапняку або крейди, гіпсу та бокситу. В якості глиноземовміщуючих компонентів можуть бути використані також шлаки вторинного переплавлення алюмінію, каоліни, алуніти та золи.

Швидкотверднучі високоміцні сульфоалюмінатні цементи, які містять близько 50% САК, уже через 2 год. після замішування мають міцність на стиск до 15 МПа, через 6 год – 30 МПа. Через одну добу стандартні зразки мають міцність на стиск 35...40 МПа, 3 доби – 50...55 МПа, 28 діб – 70...75 МПа.

У залежності від кількості САК у клінкері та вмісту гіпсу в цементі, змінюється лінійне розширення цементів і величина самонапруження. При зміні вмісту сульфоалюмінатної фази в клінкері від 20 до 50% лінійне розширення цементу за даними Т.В. Кузнєцової зменшилося від 0,44 до 0,22 у 2-х добовому віці, а самонапруження зросло від 1,9 до 5 МПа. Із збільшенням тривалості тверднення та при підвищеному вмісті САК зростає як лінійне розширення, так і самонапруження.

Сульфоалюмінатні цементи мають високу стійкість проти корозійної дії агресивних розчинів. Вони можуть успішно використовуватися при ремонті гідротехнічних споруд, замонолічувані швів.

### 3. ЗАПОВНЮВАЧІ, ДОБАВКИ, ВОДА ДЛЯ ЗАМІШУВАННЯ

#### 3.1. Заповнювачі бетону

Найважливішою складовою частиною бетону як композиційного матеріалу, що займає до 80% його об'єму, є заповнювачі. Формуючи каркас бетону, заповнювачі активно впливають на його властивості, знижуючи напруження від усадки, збільшуючи модуль пружності і зменшуючи повзучість, впливаючи на густину та інші властивості.

Основними класифікаційними ознаками заповнювачів бетону є: розмір і форма зерен, насипна густина, пористість зерен, походження і методи одержання, призначення (табл. 3.1). *Щільні заповнювачі бетону* представлені неорганічними матеріалами, а *пористі* – бувають як неорганічні, так і органічні. До останніх відносять відходи заготівлі і переробки деревини та інших матеріалів рослинного походження, а також пластмас, гуми й ін.

Технологія природних заповнювачів передбачає подрібнення і сортування гірських порід при одержанні щебеню або сортування гравійно-піщаної суміші при видобуванні гравію і піску. Щебінь одержують також подрібненням гравію або відходів промисловості – металургійних шлаків, відходів збагачення.

Піски розрізняють: звичайні, збагачені і фракціоновані, з відсівів подрібнення гірських порід. Піски разом із щебенем одержують також із відходів збагачення і інших промислових відходів.

Мінералогічний склад природних заповнювачів визначається умовами утворення гірських порід. Склад відходів збагачення корисних копалин визначається видом вихідних порід. Модифіковані заповнювачі одержують звичайно після термічного впливу на сировинні матеріали.

Для виготовлення штучних пористих заповнювачів застосовують як сировину глинисті, кремнеземисті і магматичні гірські породи й відходи промисловості – золу ТЕС, золошлакові

суміші, продукти вуглезбагачення, шлакові розплави, скляний бій.

Таблиця 3.1

Класифікація заповнювачів бетону

Класифікаційний показник	Вид заповнювачів	Характеристика класифікаційного показника
Розмір зерен	дрібний крупний	$\leq 5$ мм $> 5$ мм
Форма зерен	гравій щебінь	зерна окатаної форми зерна гострокутної форми
Насипна густина ( $\rho_0$ )	важкі легкі	$\rho_0 > 1100$ кг/м <sup>3</sup> $\rho_0 \leq 1100$ кг/м <sup>3</sup>
Пористість (П)	щільні пористі	$P \leq 10\%$ $P > 10\%$
Походження і методи одержання	природні  дроблені  штучні	Добуваються з природних родовищ Одержують подрібненням гірських порід Одержують із природної сировини або відходів промисловості за допомогою спеціальних технологій
Призначення	для важких, легких, жаростійких, кислотостійких, гідротехнічних, радіаційно- стійких та інших бетонів	Властивості заповнювачів повинні відповідати властивостям бетонів

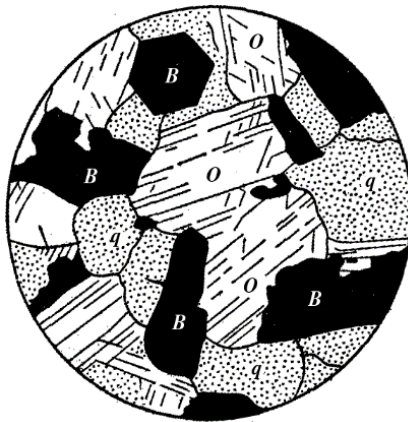
Природні пористі заповнювачі отримують із гірських порід як вулканічного, так і осадового походження (туф, пемза, вапняки-ракушники та ін.).

Найбільше поширення для виробництва щебеню отримали гірські породи:

- вивержені – інтрузивні (граніти, сієніти, діорити, габро, діабазы та ін.) і ефузивні (базальти, андезити, трахіти та ін.);
- осадові – карбонати, піщаники та ін.;
- метаморфічні – гнейси, кварцити, кристалічні сланці та ін.

Будову гірських порід характеризують їхньою *структурою* і *текстурою*. Під структурою розуміють розмір і форму зерен та спосіб зв'язку складових гірської породи, а текстурою – їхнє просторове розташування.

Для гірських порід, використовуваних при одержанні заповнювачів, характерні кристалічно-зерниста, афонітова (прихованокристалічна), склувата й уламкова цементована структури (рис. 3.1, 3.2). Основні текстури – масивна (неорієнтована), шарувата і сланцева (рис. 3.3, 3.4).



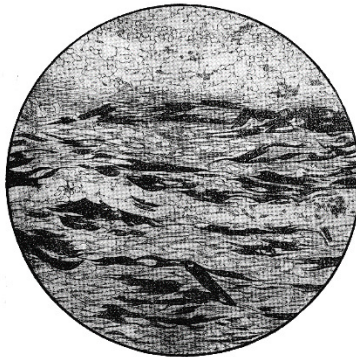
**Рис. 3.1.** Повнокристалічна структура граніту:  
O – ортоклаз; B – біотит; q – кварц



**Рис. 3.2.** Структура базальту



**Рис. 3.3.** Шарувата текстура гнейсу



**Рис. 3.4.** Шаруватий мусковіт – кварцевий сланець



Для будівельних гірських порід базовими вважаються параметри густини, механічні і спеціальні властивості. В табл. 3.2 наведені значення деяких показників базових властивостей ряду гірських порід, що переробляються на щебінь.

Таблиця 3.2  
Базові властивості будівельних гірських порід

Породи	Густина, г/см <sup>3</sup>	Границя міцності при стиску, МПа	Модуль пружності, 10 <sup>4</sup> МПа	Морозостійкість, цикли
Вивержені інтрузивні:				
граніти	2,53...2,7	100...260	5...8	100...300
габро	2,85...3,05	100...350	9...11	100...300
Ефузивні:				
порфіри	2,54...2,66	60...150	6...8	50...200
базальти	2,22...3,07	110...500	8...8,3	50...200
Метаморфічні:				
гнейси	2,0...2,5	10...200	6...7	25...200
кварцити	2,55...2,7	100...250	7...9	100...300
Осадкові:				
карбонатні	1,7...2,7	5...200	0,2...9	до 300
піщаники	2,0...2,5	10...250	1,4...5	15...300

Істинна густина порід, що використовують для заповнювачів важких бетонів, тобто густина їх в абсолютно щільному стані, змінюється у вузьких межах (табл. 3.2) і враховується при розрахунках їхньої пористості і складів бетонних сумішей.

Середня густина гірських порід або їх об'ємна маса залежить від пористості і змінюється в широких межах. Цей показник для гірських порід визначеного мінерального складу і структури може служити непрямою характеристикою їхньої міцності і довговічності.

Пористість вивержених порід звичайно не перевищує 1,5%, хоча для вивітрених порід вона може досягати 10% і більше; пористість осадових, особливо карбонатних порід досягає 40%.

Для виробництва щебеню використовують карбонатні породи, пористість яких знаходиться звичайно в діапазоні 5...15%.

Відкриту пористість гірських порід характеризує їхнє водопоглинання. Водопоглинання вивержених порід, що не зазнали процесів вивітрювання, звичайно не перевищує 0,7%, а осадових досягає 10% і більше.

З відкритої або т. зв. ефективною пористістю гірських порід корелюється їхня морозостійкість. Поряд із відкритою пористістю на морозостійкість гірських порід впливають і інші чинники: наявність замкнутих пор, вміст слабких включень та ін.

Важливими для заповнювачів є показники густини зерен і насипної густини.

Густина зерен практично ідентична середній густині гірських порід і характеризує відношення маси проби сухого щебеню або гравію до сумарного об'єму його зерен. Останній визначається звичайно зважуванням проби заповнювача у воді. Для заповнювачів із розвиненою поверхнею і великою відкритою пористістю рекомендується визначати густину зерен заповнювача в цементному тісті.

Насипна густина заповнювача визначається відношенням його маси до всього займаного ним об'єму, включаючи простір між зернами. В залежності від насипної густини в сухому стані крупні пористі заповнювачі поділяють на марки від 250 до 1000, а пористі піски від 100 до 1400. Об'єм міжзернового простору (пустотність) заповнювачів залежить від розмірів і форми зерен та від їхніх кількісних співвідношень.

При відомих значеннях насипної густини заповнювача ( $\rho_n$ ) і густини його зерен ( $\rho_3$ ) розрахункове значення пустотності (P):

$$P = \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_3} \right). \quad (3.1)$$

При змішуванні заповнювачів розрахункове значення пустотності можна визначити за формулою:

$$P = 1 - \frac{\rho_{\text{н}}^{\text{см}}}{m^{\text{см}}} [V_1(1 - P_1) + V_2(1 - P_2) + \dots + V_n(1 - P_n)], \quad (3.2)$$

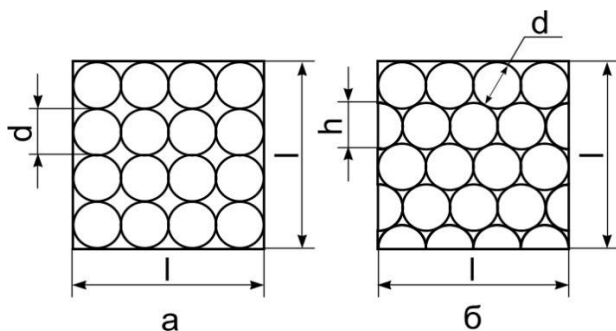
де  $m^{\text{см}}$  і  $\rho_{\text{н}}^{\text{см}}$  – маса суміші заповнювачів та її насипна густина;  
 $V_1, V_2, \dots, V_n$  – насипні об'єми фракцій, що змішуються;  
 $P_1, P_2, \dots, P_n$  – пустотність фракцій заповнювачів, що змішуються.

У 1914 р. Б. Ніколаєв теоретично проаналізував геометричну структуру простору, заповненого зернами сипучого матеріалу. Ним розрахована пустотність зерен різної геометричної форми при найбільш і найменш щільній укладці (табл. 3.3, рис. 3.5).

Таблиця 3.3

Пустотність сипучих матеріалів в залежності від форми зерен

Форма зерна	Пустотність, %		
	при найбільш щільній укладці	при найменш щільній укладці	середні значення
Куби	0	87,1	43,55
Октаедри	12,1	83,9	48,05
Додекаедри	14,1	60,7	37,4
Ікосаедри	10,3	59,9	35,1
Шари	26,2	47,6	36,9



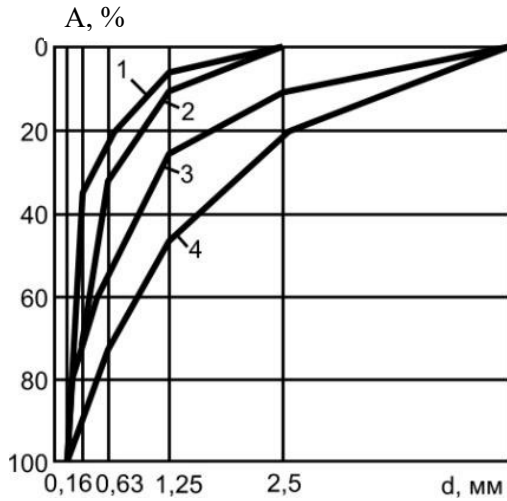
**Рис. 3.5.** Розміщення шароподібних зерен:  
а – при вкладанні рядами; б – при шаховому вкладанні

На практиці найбільш і найменш щільні укладки зерен малоїмовірні. Значення пустотності зростають із збільшенням лещадності зерен, особливо при застосуванні зерен подовженої форми. Застосування плоских і подовжених (голчастих) заповнювачів погіршує ущільнення бетонних сумішей, знижує міцність бетону і підвищує витрату цементу. Водночас є дані, що при інтенсивних вібросилового способу ущільнення застосування заповнювача з лещадних зерен дозволяє одержувати бетон із підвищеною міцністю при стиску і згині. До зерен лещадної форми відносять зерна, товщина або ширина яких менше довжини в 3 рази і більше. Вміст зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми відповідно до вимог стандарту не повинен перевищувати в щегені 15...35%.

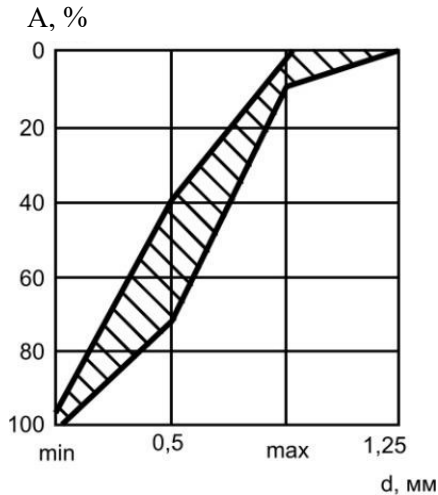
Заповнювач характеризують зерновим або гранулометричним складом, що визначають просіюванням проби через стандартні сита. При цьому розміри отворів сит, на яких залишається або проходить не менше 95% матеріалу, вважають, відповідно, найменшою і найбільшою крупністю заповнювача. Вибір граничної крупності заповнювача залежить від розмірів перетину конструкції і відстані між арматурними стержнями. Звичайно найбільша крупність заповнювача повинна бути не більше  $1/4$  мінімального розміру перетину конструкції і  $2/3$  відстані між арматурними елементами.

Заповнювач, зерна якого мають розміри в межах визначеного діапазону контрольних сит, називають *фракцією*. Характерні фракції крупного заповнювача: 5...10, 10...20, 20...40 і 40...70 мм.

Для реальних заповнювачів зерновий склад завжди відхиляється від ідеальної кривої, тому в стандартах, що вказують вимоги до крупного і дрібного заповнювачів, вказують рекомендовану область зернових складів (рис. 3.6, 3.7), вихід за межі яких приводить до істотної перевитрати цементу. Пустотність заповнювачів коливається від 20 до 50% і регулюється їхнім фракціонуванням із наступним змішуванням.



**Рис. 3.6.** Зерновий склад піску для бетонів:  
 1, 2 – нижня границя крупності, що допускається ( $M_{кр}=1,5$ ) і рекомендується ( $M_{кр}=2$ ); 3, 4 – верхня границя крупності, що рекомендується ( $M_{кр}=2,5$ ) і допускається ( $M_{кр}=2,25$ );  
 A – повний залишок на ситах розміром d



**Рис. 3.7.** Рекомендований склад крупного заповнювача

Інтегральною характеристикою крупності, що широко застосовують для оцінки якості піску як заповнювача бетонів, є *модуль крупності*:

$$M_k = \frac{A}{100}, \quad (3.3)$$

де  $A$  – сума повних залишків на контрольних ситах, %:

$$A = A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16} \quad (3.4)$$

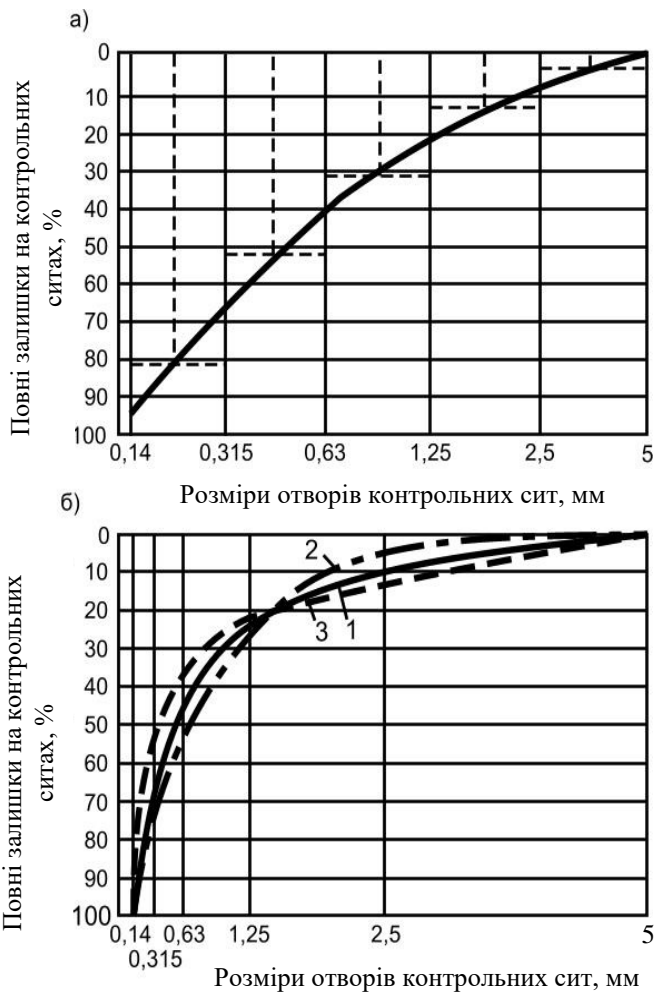
Повні залишки на кожному із сит знаходять, сумуючи часткові залишки на даному ситі і ситах із більш крупними отворами.

Модуль крупності піску характеризує площу над інтегральною кривою просіювання (рис. 3.8). Недоліком цього показника є те, що він неоднозначно характеризує зерновий склад: одному і тому ж значенню  $M_k$  можуть відповідати різні криві просіювання (рис. 3.8). Для обмеження області можливого варіювання кривих просіювання при оцінці якості піску разом з модулем крупності вказують додатково повний залишок на ситі №063 (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Групи пісків за крупністю

Група пісків	Модуль крупності, $M_k$	Повний залишок на ситі № 063, % за масою
Крупний	більше 2,5	більше 45
Средньої крупності	2,0...2,5	30...45
Дрібний	1,5...2,0	10...30
Дуже дрібний	1,0...1,5	до 10



**Рис. 3.8.** Інтегральні криві просіювання піску:  
 а – в напівлогарифмічній системі координат; б – варіанти кривих  
 просіювання (1-3) пісків з однаковим модулем крупності

Дуже дрібні піски рекомендується застосовувати лише для будівельних розчинів. З підвищенням значення  $M_k$ , як правило, зменшується водопотреба бетонних сумішей і необхідна витрата

цементу. При цьому варто враховувати поряд із  $M_k$  і пустотність піску, обумовлену його зерновим складом.

Піски з покращеним зерновим складом (збагачені піски) одержують із застосуванням спеціального збагачувального устаткування, їх поділяють на крупні і середні.

Фракціоновані піски (природний і подрібнений) випускають зазвичай у вигляді двох, що роздільно поставляються, фракцій із поділом по граничному зерну, що відповідає розмірам контрольних сит 1,25 і 0,63 мм.

Питому поверхню заповнювача можна визначити через середній розмір зерна  $d_{cp}$ :

$$U = \frac{N}{d_{cp}}, \quad (3.5)$$

де  $N$  – коефіцієнт, що залежить від форми зерна і рельєфу його поверхні.

В ідеальному випадку для полірованої кулі  $N = 6$ , для реальних сипучих матеріалів цей коефіцієнт значно вище.

В табл. 3.5 наведені значення питомої поверхні ( $U$ ,  $\text{см}^2/\text{см}^3$ ) і  $N$  для різних фракцій щебеню і гравію (за даними Ю.Я. Штаермана і Д.І. Тевзадзе).

Таблиця 3.5

Питома поверхня щебеню і гравію,  $\text{см}^2/\text{см}^3$

Найменування заповнювачів	Фракції							
	60...40		40...20		20...10		10...5	
	U	N	U	N	U	N	U	N
Гранітний щебінь	2,025	10,10	3,64	10,92	7,29	10,94	14,53	10,90
Базальтовий щебінь	2,14	10,70	3,84	11,52	7,29	10,94	14,39	10,79
Вапняковий щебінь	1,98	9,90	3,67	11,01	7,30	10,95	13,99	0,50
Щебінь із піщаника	2,07	10,35	3,78	11,34	7,13	10,69	13,62	10,19
Гравій річний	1,53	7,65	3,06	9,18	6,05	9,07	11,43	8,57



Для визначення розрахункової питомої поверхні заповнювачів можна використовувати різні емпіричні формули. Наприклад, для кварцового піску і гранітного щебеню питому поверхню можна розрахувати по формулах:

$$U_n = \frac{0,025}{\rho_n} (a_1 + 2a_2 + 4a_3 + 7,4a_4 + 15a_5 + 110a_6); \quad (3.6)$$

$$U_{щ} = \frac{0,0036}{\rho_{щ}} (0,55v_1 + v_2 + 2v_3 + 3,9v_4), \quad (3.7)$$

де  $a_1 \dots a_6$  – відсотковий вміст фракцій при стандартному розсіві;  $v_1 \dots v_4$  – відсотковий вміст фракцій 60...40, 40...20, 20...10 і 10...5 мм.

Питома поверхня суміші дрібного і крупного заповнювачів ( $U_3$ ) не залежить від взаємного розташування їхніх зерен і знаходиться із умови адитивності:

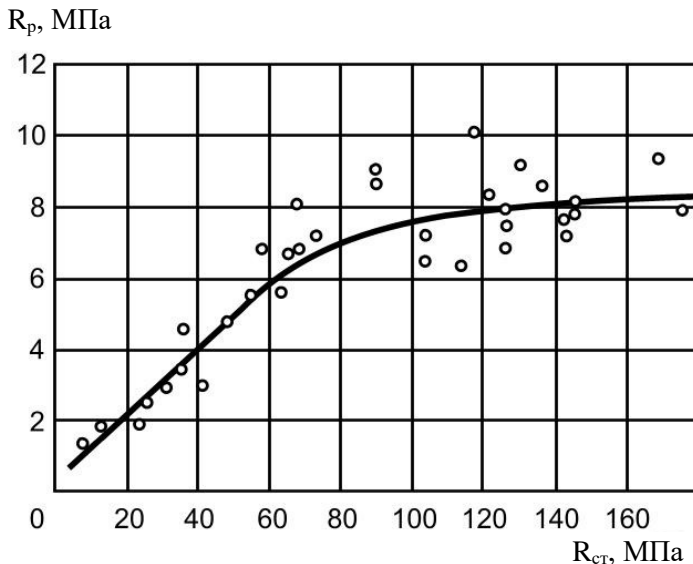
$$U_3 = U_{щ} + (U_n + U_{щ})r, \quad (3.8)$$

де  $U_n$  і  $U_{щ}$  – відповідно питома поверхні піску і щебеню (гравію);  $r$  – частка піску в суміші заповнювачів.

На якість заповнювачів істотно впливає вміст пиловидних, глинистих і мулистих домішок, що визначають звичайно способом відмулювання. До пиловидних відносять частинки крупністю понад 0,005 до 0,05 мм, до глинистих і мулистих – менше 0,005 мм. Обмеження вмісту домішок, що відмулюються у піску і щебені (гравії) обумовлено негативним впливом утворених ними плівок на зчеплення цементного каменю з заповнювачами, і як наслідок, на міцність, морозостійкість і інші властивості бетону, водопотребу бетонних сумішей. Вміст часток, що відмулюються у природному піску допускається до 3%, у збагаченому – 2%, у подрібненому до 5%. Вміст глини в грудках не повинен перевищувати 0,5%. Вміст частинок, що відмулюються у складі щебеню обмежується в межах 1...3%, у тому числі глини в грудках – не більше 0,25%.

Показником механічних властивостей гірських порід, що найбільш широко використовується, є їхня *міцність при стиску*. Границя міцності при стиску щільних невивітрених вивержених і метаморфічних порід звичайно перевищує 100 МПа. Міцність осадових порід змінюється в значних межах й істотно залежить від їхньої структури і пористості. Вона у великій мірі визначає область використання одержуваного з них щебеню.

Застосування вивержених порід із міцністю при стиску менше 80 МПа, метаморфічних – 60 МПа й осадових – 30 МПа допускається при техніко-економічному обґрунтуванні після проведення технологічних випробувань. Для оцінки умов роботи щебеню в будівельних конструкціях і визначення здатності до руйнування порід при вибуховому і механічному подрібненні визначають їх *міцність при розтягу*. Цей показник змінюється пропорційно міцності при стиску, починаючи з певних значень цей зв'язок порушується (рис. 3.9).

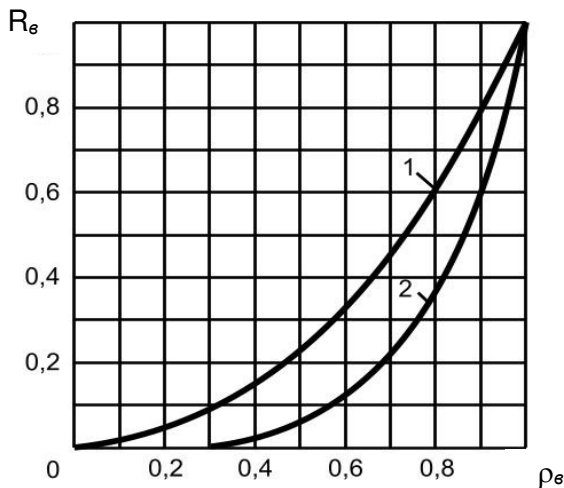


**Рис. 3.9.** Зв'язок границь міцності при стиску і розтягу карбонатних порід

Міцність щебеню і гравію характеризується їхньою маркою за міцністю, що обумовлена дробимістю при стиску (роздавлюванні) у циліндрі. Додатковою міцнісною характеристикою щебеню є його стиранисть у полочном барабані. Показник дробимісті визначають за втратами маси після роздавлювання проби матеріалу і просіюванні на ситі з розміром отвору вчетверо меншим найменшого розміру зерен випробувальної фракції. Орієнтовно, марці гравію і щебеню за дробимістю Др8 відповідає міцність при стиску понад 100, Др12 – понад 80 до 100, Др16 – понад 60 до 80 і Др24 від 40 до 60 МПа.

Міцність заповнювачів залежить від їхньої густини (рис. 3.10) і особливостей структури. Для переходу від міцності заповнювачів  $R$ , при густині  $\rho$  до міцності  $R_1$ , при густині  $\rho_1$  С.М. Іцковичем запропонована формула:

$$R = R_1 \left( \rho / \rho_1 \right)^n. \quad (3.9)$$



**Рис. 3.10.** Залежність відносної міцності  $R_в$  від відносної густини  $\rho_в$ :  
 1 – для матеріалів комірчастої структури;  
 2 – для матеріалів зернистої структури

Показник ступеня  $n$  для матеріалів зернистої структури в середньому складає близько 4, ніздрюватої – 2.

На міцність і довговічність конструкцій негативно впливають зерна слабких порід, що містяться в щебені і гравії. До слабких відносяться породи з границею міцності в насиченому водою стані до 20 МПа. Щебінь із природного каменю марок 120 і 140 може містити до 5%, марок 40...100 до 10% зерен слабких порід.

Ряд властивостей заповнювача часто визначають випробуванням у бетоні. Так, для визначення *модуля пружності* і *теплопровідності* заповнювачів випробують зразки з бетону і з розчину, відібраного з бетонної суміші, а потім виконують розрахунок за теоретичними формулами:

для модуля пружності (МПа):

$$E_3 = \sqrt[3]{\varphi} \frac{E - E_p \left(1 - \sqrt[3]{\varphi^2}\right)}{\varphi + \left(1 - \frac{E}{E_p}\right) \left(1 - \sqrt[3]{\varphi}\right)}, \quad (3.10)$$

для теплопровідності (Вт/м·°С):

$$\lambda_3 = \sqrt[3]{\varphi} \frac{\lambda_б - \lambda_p \left(1 - \sqrt[3]{\varphi^2}\right)}{\varphi + \left(1 - \frac{\lambda_б}{\lambda_p}\right) \left(1 - \sqrt[3]{\varphi^2}\right)}, \quad (3.11)$$

де  $E$ ,  $\lambda_б$ ,  $E_p$ ,  $\lambda_p$  – відповідно модулі пружності і теплопровідність бетону і розчину;

$\varphi$  – об'ємний вміст крупного заповнювача в бетоні.

На довговічність бетону в різних умовах експлуатації поряд із фізичними і фізико-механічними властивостями істотно впливають і хімічні властивості заповнювачів. Для ряду штучних

пористих заповнювачів можливі різні види *розпаду*: силікатний у результаті перетворень  $\beta\text{C}_2\text{S} \rightarrow \gamma\text{C}_2\text{S}$ , залістий – при дії води на домішки сірчастого заліза з утворенням гідроксиду заліза, вапняний – при гашенні включень вапна. При всіх видах розпаду проходження хімічних реакцій зв'язано з істотним збільшенням об'єму і виникаючими при цьому напруженнями. Для таких матеріалів як шлакова пемза, аглопорит, термоліт і ін. передбачені спеціальні випробування на стійкість до різних видів розпаду.

При визначенні петрографічного складу щебеню, гравію і піску вказують вміст шкідливих домішок, що негативно впливають на твердіння цементного каменю і сприяють його корозії. З числа поширених шкідливих домішок можна відзначити речовини, розчинні у воді, що викликають корозію арматури – сульфідів, сульфатів й ін., а також реакційноздатні мінерали, що взаємодіють із лугами цементу: аморфні різновиди кремнезему (опал, халцедон і ін.), гідрослюди, деякі цеоліти. При хімічному методі визначення реакційної здатності піску пробу з розчином їдкого натра витримують при 80°C протягом 24 год, а потім визначають масу кремнезему, що розчинився. *Реакційна здатність* заповнювачів оцінюється величиною відношення:  $S_c / R_c$ , де  $S_c$  – кількість  $\text{SiO}_2$  у розчині після випробування зразків;  $R_c$  – зменшення концентрації іонів  $\text{OH}^-$  (при взаємодії розчину  $\text{NaOH}$  із заповнювачем). Якщо відношення  $S_c/R_c > 1$ , то заповнювач можна вважати реакційноздатним і його застосування може привести до розвитку корозії бетону в результаті об'ємного розширення.

До заповнювачів бетону, як і інших будівельних матеріалів, висуваються вимоги за вмістом природних радіонуклідів. Для всіх видів будівництва можуть застосовуватися матеріали із сумарною питомою активністю природних радіонуклідів не більше 370 Бк/кг (I клас).

**Вимоги до заповнювачів гідротехнічного бетону.** До заповнювачів для гідротехнічного бетону також як і до цементів вимоги визначаються диференційовано залежно від експлуатаційних умов конструкцій і споруд. Найбільш жорсткі

вимоги пред'являються до бетону, що працює в умовах змінного рівня води.

Загальні вимоги до заповнювачів для гідротехнічних бетонів аналогічні вимогам до заповнювачів для інших видів важких бетонів. Крупний заповнювач – щебінь або гравій вибирають, враховуючи його зерновий склад, вміст глинистих і пиловидних частинок, інших шкідливих домішок, міцність і вміст зерен слабких порід, петрографічний склад і радіаційно-гігієнічну характеристику. При підборі складу бетону враховують також густину, пористість, водопоглинання та пустотність зерен заповнювача.

Для бетону в зоні змінного рівня води застосовують щебінь або гравій із середньою густиною зерен не нижче  $2,5 \text{ г/см}^3$  і водопоглинанням не більше 0,5% для заповнювачів з вивержених і метаморфічних порід і 1% – осадових порід. Для бетону внутрішньої, підводної та надводної зон густина зерен крупного заповнювача повинна бути не нижче  $2,3 \text{ г/см}^3$ , а водопоглинання не більше 0,8% для заповнювача з вивержених і метаморфічних порід, і 2% – осадових порід.

При будівництві масивних гідротехнічних споруд допускається застосування щебеню і гравію розміром від 120 до 150 мм і понад 150 мм, що вводяться безпосередньо при укладанні бетонної суміші.

Вміст окремих фракцій у крупному заповнювачі в складі бетону встановлюється за умови досягнення його найбільшої щільності і перебуває у встановлених межах (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Рекомендований склад суміші фракцій крупного заповнювача

Найбільша крупність заповнювача, мм	Вміст фракцій у крупному заповнювачі, %				
	від 5 (3) до 10мм	понад 10 до 20 мм	понад 20 до 40 мм	понад 40 до 80 мм	понад 80 до 120 мм
10	100	-	-	-	-
20	25...40	60...75	-	-	-
40	15...25	20...35	40...65	-	-
80	10...20	15...25	20...35	35...55	-
120	5...10	10...20	15...25	20...30	15...50

На якість заповнювачів суттєво впливає вміст пиловидних, глинистих і мулистих домішок, який визначають зазвичай способом відмулювання. До пиловидних відносять частинки крупністю понад 0,005 до 0,05 мм, до глинистих і мулистих – менше 0,005 мм. Обмеження вмісту відмулювальних домішок у заповнювачах обумовлено негативним впливом їх на водопотребу бетонних сумішей, а також утворених ними плівок на зчеплення цементного каменю із заповнювачами, і, як наслідок, на міцність, морозостійкість та інші властивості бетону. Для бетону гідротехнічних споруд вміст глинистих і пиловидних частинок у крупному заповнювачі (незалежно від виду породи), не повинен перевищувати 1% для бетону зони змінного рівня води та 2% для підводної і внутрішньої зон. При цьому для бетону, що експлуатується в зоні змінного рівня не допускається наявність у крупному заповнювачі глини у вигляді окремих грудок.

Морозостійкість крупних заповнювачів для всіх видів важких бетонів не може бути нижча нормованої марки бетону за морозостійкістю. Для гідротехнічного бетону, до якого пред'являються вимоги за морозостійкістю та кавітаційною стійкістю, використовують щебінь із вивержених порід марки за міцністю не нижче 1000. Необхідна морозостійкість щебеню і гравію нормується з урахуванням середньомісячної температури найбільш холодного місяця в році. Якщо остання коливається від 0 до мінус 10° С марка за морозостійкістю щебеню і гравію повинна бути не нижче F100, нижче мінус 10 – F200.

При виготовленні зносостійкого гідротехнічного бетону для щебеню і гравію визначається марка по стираності у поличному барабані, яка повинна бути не нижче Ст-I для заповнювачів з вивержених і метаморфічних порід та Ст-II – осадових порід.

Марка щебеню за міцністю з вивержених порід повинна бути не нижче 800, з метаморфічних порід не нижче 600 та осадових порід – не нижче 300. У щебеню та гравію для бетону в зоні змінного рівня вміст зерен слабких порід не допускається більше 5%.

Для піску, який виконує роль дрібного заповнювача бетону визначальними якісними показниками є зерновий склад, вміст пиловидних і глинистих (відмулювальних) частинок та петрографічна характеристика.

При невідповідності зернового складу природного піску рекомендованим вимогам застосовують коригувальні добавки. Для дрібного і дуже дрібного піску це може бути укрупнювальна добавка – більш крупніший пісок у т.ч. пісок з відсівів подрібнення природного каменю. Для крупного піску при необхідності коректування зернового складу застосовують, навпаки, пісок з меншим модулем крупності.

Для бетонів гідротехнічних споруд допускається застосовувати пісок з модулем крупності від 1,5 до 3,5 (повний залишок на ситі з розміром отворів 2,5 мм від 0 до 30%, 1,25 мм – від 0 до 55%, 0,63 мм – від 20 до 75%, 0,315 мм – від 40 до 90%, 0,16 мм – від 85 до 100%). При цьому дрібний пісок з модулем крупності рівним або меншим 2,0 використовується при обов'язковому застосуванні пластифікуючих поверхнево-активних добавок.

Вміст глинистих і пиловидних частинок, а також частинок слюди, які часто зустрічаються, при застосуванні піску для бетону гідротехнічних споруд устанавлюється з урахуванням його розташування стосовно води. Для бетону зони змінного рівня води вміст у піску глинистих і пиловидних частинок, а також слюди повинен бути відповідно не більшим 2 і 1%, надводної зони – 3 і 2%, підводної і внутрішньої – 5 та 3%.

Глинисті і пиловидні частинки, що знаходяться у піску, завдяки високорозвиненій поверхні, суттєво збільшують водопотребу бетонних сумішей і, обволікаючи зерна піску, зменшують його зчеплення із цементним каменем. Крім того, найбільш дрібні пиловидні частинки піску (< 0,08 мм) знижують морозостійкість бетону. Структуру бетону також погіршують домішки в піску слюди. Повна заміна піску слюдою знижує міцність цементно-піщаного розчину в декілька разів.

До числа шкідливих домішок у заповнювачах бетону, що викликають його корозію і погіршення якості поверхні, відносяться: аморфні різновиди діоксиду кремнію, розчинні в



лугах (халцедон, опал, кремій та ін.); сірка, сульфіді, сульфати, магнетит, гідроксиди заліза. Міцність і довговічність бетону зменшують такі домішки в заповнювачах як вугілля, графіт, горючі сланці, апатит, нефелін, фосфорит. Деякі домішки, які містять водорозчинні хлориди, сірку, сульфіді та сульфати, можуть викликати корозію арматури у бетоні.

Допустимий вміст шкідливих домішок у заповнювачах для гідротехнічних бетонів наведений в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Допустимий вміст шкідливих домішок у заповнювачах для важких бетонів

Вид домішок	Граничний вміст
Аморфні різновиди діоксиду кремнію, розчинні в лугах, сірка, сульфіді (крім піриту) у перерахунку на SO <sub>3</sub> для крупного заповнювача для дрібного заповнювача	не більше 50 моль/л  не більше 1,5% за масою не більше 1,0% за масою
Шаруваті силікати (слюди, гідрослюди, хлорити та ін.) для крупного заповнювача для дрібного заповнювача	не більше 15% за об'ємом не більше 2% за масою
Магнетит, гідрослюди, апатит, нефелін, фосфорит	не більше 15% за об'ємом (кожний окремо не більше 10%)
Галоїди в перерахунку на іон хлору для крупного заповнювача для дрібного заповнювача	не більше 0,1% за масою не більше 0,15% за масою
Азбестове волокно	не більше 0,25% за масою
Вугілля	не більше 1% за масою

У випадку, коли для забезпечення економічної ефективності виготовлення конструкцій і зведення споруд виникає необхідність застосування заповнювачів з показниками якості нижче зазначених вище, у спеціалізованих центрах виконується їх дослідження для обґрунтування можливості отримання бетону з нормованими властивостями.

### 3.2. Добавки в бетонну суміш

Найбільш універсальним і ефективним способом модифікування структури і регулювання властивостей бетону є введення в бетонну суміш додаткових компонентів – добавок. В даний час в економічно розвинених країнах майже весь бетон, який випускається, виготовляється із застосуванням різноманітних добавок. Номенклатура відомих добавок надзвичайно різноманітна. Добавки, як правило, виконують поліфункціональний вплив на бетонні суміші і затверділий бетон.

Поки не існує загальноприйнятої класифікації добавок. В технології бетону прийнято умовно поділяти добавки, що вводяться в бетонну суміш на хімічні та мінеральні. Під "хімічними" звичайно розуміють добавки різного хімічного складу і функціонального призначення, що вводяться в бетонну суміш у кількості до 10% від маси цементу.

В окрему групу виділяють дисперсні мінеральні добавки – речовини неорганічного походження, які можуть бути введені в значно більшій кількості, чим більшість хімічних добавок.

**Хімічні добавки.** Існує декілька систем класифікації хімічних добавок – за механізмом їхньої дії, хімічним складом, основному технологічному ефекту.

Найбільш зручною класифікацією хімічних добавок за механізмом їхньої дії при формуванні цементного каменю є класифікація, запропонована В.Б. Ратіновим і Т.І. Розенберг. Вона поділяє добавки на 4 класи:

1. Добавки, що змінюють розчинність в'язучих речовин;
2. Добавки, що реагують із в'язучими речовинами з утворенням важкорозчинних або малодисоційованих сполук;
3. Готові центри кристалізації (кристалічні затравки);
4. Органічні поверхнево-активні речовини.

Кожний із класів добавок ділиться на окремі групи. Так, добавки першого класу поділяють на такі, що містять і не містять однойменні з в'язучими іони.

Внаслідок зміни розчинності збільшується або зменшується перенасичення розчину, що впливає відповідно на швидкість гідратації і тверднення цементу.

Прискорення тверднення цементу групою добавок першого класу обумовлено збільшенням можливості виникнення зародків кристалогідратних новоутворень. Характерними представниками добавок цього класу є електроліти, що містять однойменні з в'язучими іони. До числа таких добавок належить також гіпс. На ефективність їх дії впливає радіус утворених ними іонів. При підвищеній концентрації добавок першого класу можливою є їх реакція з гідроксидом кальцію з утворенням подвійних солей. В результаті збільшується розчинність  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і силікатних мінералів цементного клінкеру, що відображається на кінетиці гідратації цементу.

Добавки-електроліти першого класу, які не містять однойменного з в'язучим іону (хлориди натрію і калію, нітрит натрію та ін.), при малих концентраціях підвищують перенасичення і прискорюють тверднення, а при великих можливим є протилежний ефект.

Добавки-неелектроліти, які не взаємодіють з цементом і продуктами його гідратації (наприклад, спирти), зазвичай понижують розчинність і відносяться до числа сповільнювачів тверднення.

В добавках другого класу виділяють добавки, що вступають із в'язучими речовинами в реакції приєднання й в обмінні реакції.

До добавок першої групи другого класу відносяться такі прискорювачі тверднення як хлорид і нітрат кальцію. На силікатні фази ці добавки діють як добавки першого класу. Внаслідок хімічної взаємодії добавок другого класу з гідроксидом кальцію цементного каменю також утворюються подвійні комплексні сполуки – *оксисолі*. Така взаємодія можлива при введенні підвищених дозувань добавок, наприклад, при зимовому бетонуванні.

Добавки третього класу полегшують виділення при гідратації цементу нових фаз із перенасичених розчинів. До них відносяться, наприклад, гідросульфат алюмінію кальцію, деякі сульфатомісткі тверді речовини («кренти») та ін. Ці добавки прискорюють тверднення цементу і підвищують його міцність, завдяки більш швидкій гідратації силікатних фаз, переважно аліту.

У добавках четвертого класу – ПАР – можна виділити чотири групи: що утворюють важкорозчинні або малодисоціюючі продукти, що коагулюють у присутності іонів електроліту, хімічно не взаємодіючі і взаємодіючі з гідроксидом кальцію, алюмінатами і лугами цементу. Всі добавки ПАР розділяють на добавки гідрофілізуючого та гідрофобізуючого типів.

Є різні класифікації добавок за основним ефектом їхньої дії. Поширена класифікація пропонує виділяти 4 класи добавок-модифікаторів: 1-ий – регулятори реологічних властивостей бетонних сумішей, їхньої здатності до збереження у часі; 2-ий – регулятори тужавлення і твердіння бетонних сумішей, кінетики їхнього тепловиділення; 3-ій – регулятори пористості бетону, що забезпечують його корозійну стійкість, морозостійкість, водонепроникність; 4-ий – що додають бетону спеціальні властивості, (гідрофобні, електропровідні, біоцидні і т.д.).

Інша класифікація добавок за технологічним ефектом, що досягається, запропонована Асоціацією стандартизації й випробувань матеріалів (ASTM) (табл. 3.8).

Таблиця 3.8

Класифікація хімічних добавок за ASTM

Тип	Технологічний ефект	Номер стандартів
A	Водозниження	C494
B	Уповільнення твердіння	C494
C	Прискорення твердіння	C494
D	Водозниження / уповільнення твердіння	C494
E	Водозниження / прискорення твердіння	C494
F	Значне водозниження / уповільнення твердіння	C494
	Пластифікування для литого бетону	C1017
	Пластифікування / уповільнення твердіння литого бетону	C1017
	Повітрявтягування	C260
	Добавки для торкрет-бетону	C1141

В європейських нормах (EN 934-2:2019) хімічні добавки пропонується розділяти як в залежності від технологічного ефекту, так і призначення (табл. 3.9).

Таблиця 3.9

Класифікація добавок за EN 934-2:2019

Призначення	Технологічний ефект
Зменшення кількості води – пластифікатори*	Зниження водовмісту в даній бетонній суміші без зміни консистенції або збільшення легкоукладальності без зміни водовмісту
Значне зменшення кількості води – суперпластифікатори**	Значне зниження водовмісту в даній бетонній суміші без зміни консистенції або значне збільшення легкоукладальності без зміни водовмісту
Збільшення зв'язності води в бетонній суміші	Запобігання втрат води за рахунок водовідділення
Повітрявтягування	Втягування в процесі перемішування бетонної суміші певної кількості дрібних, рівномірно розподілених бульбашок повітря, які залишаються в структурі затверділого бетону
Прискорення тужавлення	Скорочення тривалості періоду переходу суміші із пластичного в твердий стан
Прискорення твердіння	Збільшення швидкості зростання міцності бетону із зміною чи без зміни строків тужавлення
Уповільнення тужавлення	Збільшення тривалості періоду переходу суміші із пластичного в твердий стан
Ущільнення структури бетону	Зменшення капілярної адсорбції бетону
Уповільнення тужавлення / зниження водовмісту	Комбінація дій пластифікатора – зниження водовмісту (основний ефект) із уповільненням тужавлення (додатковий ефект)

Призначення	Технологічний ефект
Уповільнення тужавлення / значне зниження водовмісту	Комбінація дій суперпластифікатора – значне зниження водовмісту (основний ефект) із уповільненням тужавлення (додатковий ефект)
Прискорення тужавлення / зниження водовмісту	Комбінація дій добавки – зниження водовмісту (основний ефект) з прискоренням тужавлення (додатковий ефект)
Комплексна добавка	Вплив на декілька властивостей бетонної суміші і бетону

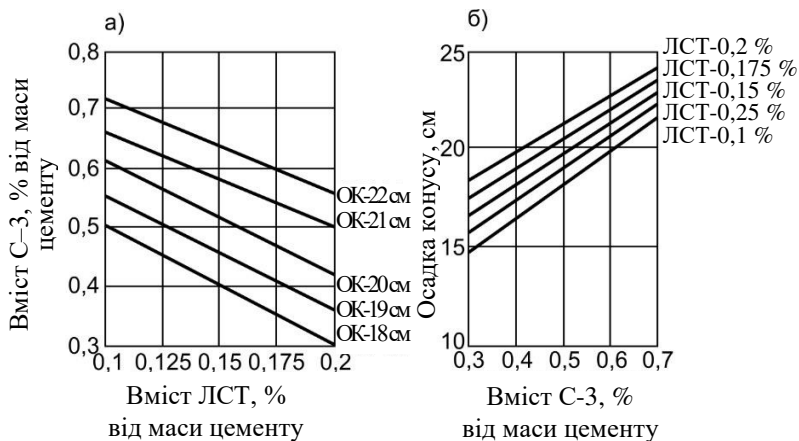
**Примітки:** \* пластифікатор знижує водовміст бетонної суміші на 5...12 %; \*\* суперпластифікатор знижує водовміст бетонної суміші на 12...30 % і більше.

Прагнення до універсалізації дії добавок і підсилення їхнього технічного ефекту зумовили широке поширення комплексних (композиційних) добавок. Комплексні добавки можна розділити на дві категорії. Перші представлені сумішами добавок, що належать до одного класу, а другі – до різних класів.

Всі комплексні поліфункціональні модифікатори (ПФМ) можна розділити на чотири групи: I – суміші електролітів; II – суміші ПАР; III – суміші електролітів і ПАР; IV – суміші хімічних і мінеральних добавок.

ПФМ першої групи дозволяють регулювати строки тужавлення, темпи твердіння, захисні властивості бетону стосовно арматури. Широке застосування ПФМ першої групи знаходять при виробництві бетонних робіт у зимовий час.

ПФМ другої групи застосовують для посилення пластифікуючого ефекту, додаткового повітрявтягування або газовиділення, гідрофобізації, економії дорогих суперпластифікаторів (рис. 3.11).

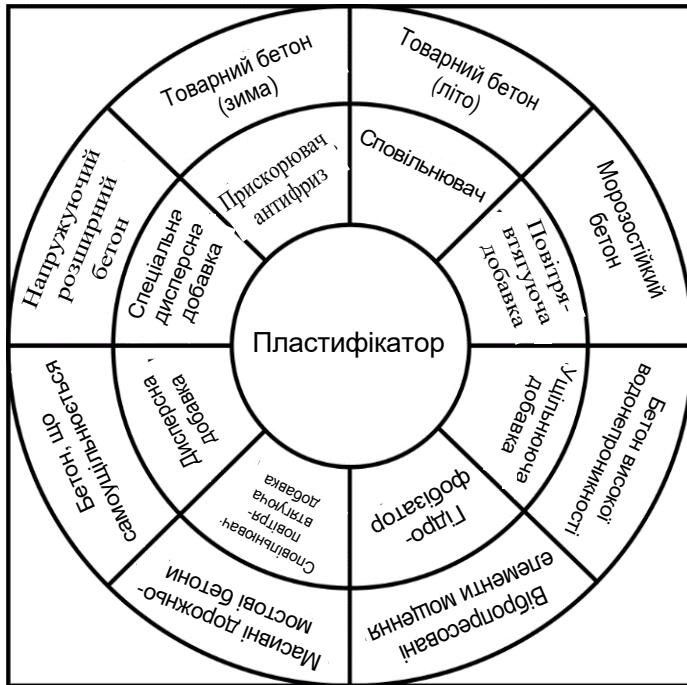


**Рис. 3.11.** Вибір оптимального співвідношення пластифікуючих компонентів в складі поліфункціонального модифікатора (ПФМ): а – залежність витрати суперпластифікатора С-3 в складі ПФМ від вмісту лігносульфонатів (ЛСТ) в рівнорухомих бетонних сумішах; б – залежність рухливості бетонних сумішей від вмісту С-3 у складі ПФМ

ПФМ третьої і четвертої груп створюють комплексний ефект пластифікації та регулювання темпу твердіння бетону, інших його будівельно-технічних властивостей. На рис. 3.12 наведена діаграма, запропонована О.В. Ушеровим-Маршаком, як одна з можливих схем формування комплексних добавок, що містять пластифікатори.

При одержанні комплексних ПФМ поряд із можливим адитивним і синергетичним впливом окремих компонентів, необхідно враховувати можливість хімічної взаємодії між ними, протікання коагуляційних та інших процесів, що утрудняють або роблять неможливим застосування таких добавок.

В технології гідротехнічного бетону найбільше поширення одержали *пластифікатори*, що покращують рухливість бетонної суміші без збільшення водовмісту.



**Рис. 3.12.** Діаграма формування комплексних добавок (за О.В. Ушеровим-Маршаком)

Вперше добавки пластифікатори були застосовані в 1949 р. при будівництві Верхньо-Свірської ГЕС. Основний об'єм бетону тут був покладений із застосуванням пластифікуючої добавки – сульфітно-спиртової барди (згідно до сучасної номенклатури – лігносульфонатів технічних (ЛСТ)), що дало можливість зекономити більше 11 тис.т. цементу. На цьому ж будівництві в дослідному порядку почав застосовуватися бетон із повітровтягувальною добавкою СНП (смола нейтралізована повітровтягувальна). Надалі практично при будівництві всіх великих гідротехнічних споруд застосовували пластифікучі та повітровтягувальні добавки.

Зниження витрати води без погіршення легкоукладальності бетонних сумішей дозволяє поліпшити ряд властивостей бетонів



– міцність, морозостійкість, непроникність і ін. Відповідно до ефективності пластифікуючої дії, тобто збільшення рухливості бетонної суміші без зниження міцності бетону, пластифікатори поділяють на 4 категорії (табл. 3.10).

Таблиця 3.10

Класифікація пластифікаторів бетонних сумішей

Категорія	Найменування	Пластифікуючий ефект, (збільшення ОК із 2...4 см), см	Зменшення кількості води, %
I	Суперпластифікатори	До 20 і більше	не менше 20
II	Пластифікатори	14...19	не менше 10
III	Пластифікатори	9...13	не менше 5
IV	Пластифікатори	8 і менше	менше 5

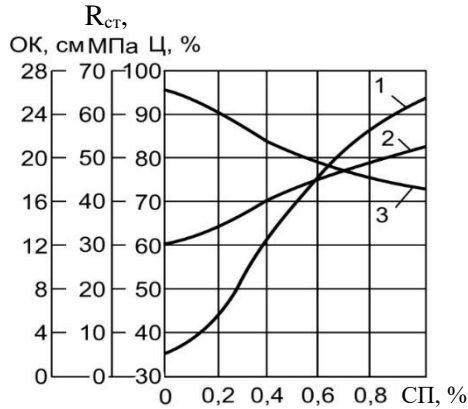
*Суперпластифікатори* (СП) почали застосовувати у виробництві бетону на початку 1970-х років. Завдяки їм виявилось можливим істотно покращити властивості бетону без збільшення витрати цементу, одержувати бетони з литих сумішей з ОК > 20 см (литі бетони) при помірному водовмісті, високоміцні бетони на звичайних портландцементях і заповнювачах з низькою проникністю, високою корозійною стійкістю і т.д. (рис. 3.13).

Введення СП є в даний час обов'язковою умовою виробництва високоякісних, високотехнологічних бетонів (High Performance Concrete, HPC).

Прийнята в даний час класифікація суперпластифікаторів (табл. 3.11) розділяє їх за складом і механізмом дії.

Механізм дії СП обумовлений комплексом фізико-хімічних процесів у системі цементне тісто-добавка. Він визначається головним чином (рис. 3.14):

1. Адсорбцією моно- або полімолекулярних ПАР на поверхні в основному гідратних новоутворень;
2. Колоїдно-хімічними явищами на межі поділу фаз.



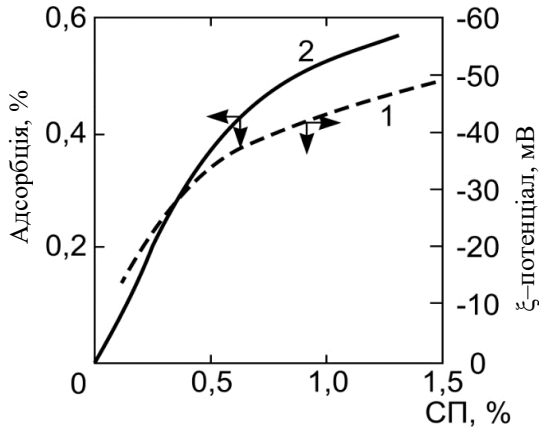
**Рис. 3.13.** Вплив вмісту суперпластифікатора на властивості бетону і бетонної суміші (за Ю.М. Баженовим):

1 – зміна рухливості суміші при введенні суперпластифікатора і постійних витратах цементу і води; 2 – підвищення міцності бетону при постійній рухливості суміші і витраті цементу за рахунок скорочення витрати води; 3 – зменшення витрати цементу в рівноміцних бетонах при однаковій рухливості бетонної суміші

Таблиця 3.11

Класифікація суперпластифікаторів

Позначення	Склад СП	Механізм дії	Відносна вартість полімеру, %
НФ	На основі сульфованих нафталінформальдегідних поліконденсатів	Електростатичний	40
МФ	На основі сульфованих меламіноформальдегідних поліконденсатів	Електростатичний	80
ЛСТ	На основі очищених від цукрів лігносульфонатів	Електростатичний	20
П	На основі полікарбоксилатів і поліакрилатів	Стеричний	100



**Рис. 3.14.** Залежність  $\xi$ -потенціалу (1) і ступеня адсорбції (2) цементного тіста від концентрації суперпластифікатора

В механізмі дії СП типів НФ, МФ, ЛСТ (табл. 3.11) переважає ефект електростатичного відштовхування часток цементу, обумовлений тим, що адсорбційні шари з молекул СП підвищують величину дзета-потенціалу на поверхні цементних часток. Величина дзета-потенціалу, що має негативний знак, залежить від адсорбційної спроможності СП. Збільшенню адсорбційної спроможності СП сприяє збільшення довжини вуглеводневого ланцюга і молекулярної маси. Адсорбція СП пропорційна концентрації їх у водному розчині. З мінералів цементу найбільшою адсорбційною здатністю володіє  $C_3A$ , найменшої –  $\beta-C_2S$ .

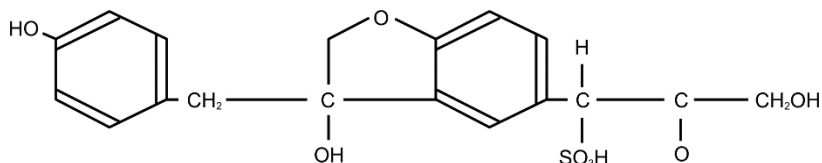
У механізмі дії СП типу П роль дзета-потенціалу менше, а взаємне відштовхування часток цементу забезпечується за рахунок т.зв. стеричного ефекту. Цей ефект обумовлений формами ланцюгів і характером зарядів на поверхні зерен цементу і гідратів.

Широко поширений СП "Розріджувач С-3" належить до групи СП нафталін-формальдегідного типу (НФ). Його виготовляють як у виді 20...40% - них розчинів, так і порошку. При дозуванні добавки 0,5...1% маси цементу він дозволяє збільшити рухливість бетонної суміші від 2...4 см до 20...22 см. В

умовах рівної рухливості сумішей бетони із СП С-3 в результаті зменшення В/Ц мають міцність у віці 28 діб на 30...50% вище, ніж бетони без добавки. При цьому істотно зростають щільність і водонепроникність, покращується ряд інших властивостей бетону.

Добавки СП нового покоління типу П на основі полікарбоксилатів забезпечують збільшення осадки конуса бетонної суміші від 3 см до 21...24 см при дозуванні всього 0,17...0,22% від маси цементу. Якщо бетонні суміші з добавками традиційних СП швидко втрачають рухливість, то суміші з добавками полікарбоксилатів знаходяться в пластичному стані 1,5...2 год. Висока здатність до зберігання бетонних сумішей із СП типу П робить їх особливо привабливими для монолітного будівництва і при тривалому транспортуванні. Як і інші СП, вони з успіхом застосовуються і при тепловологісній обробці бетону в індустрії збірного залізобетону.

До найбільш дешевих пластифікаторів відносяться ПАР на основі лігносульфонатів (рис. 3.15), що, як правило, являють собою відходи і побічні продукти промисловості. Широке застосування в технології бетону одержали відходи гідролізного виробництва – лігносульфонати технічні (ЛСТ), які вводять в бетонні суміші звичайно в кількості 0,15...0,25 % маси цементу. При введенні 0,8...1% ЛСТ може досягатися приблизно таке ж розжиження як і при звичайних дозах СП, однак міцність бетону зменшується в 1,5 рази і більше. Це є наслідком відповідного зменшення ступеню гідратації цементу і збільшення в 2...2,5 разів об'єму втягнутого повітря.



**Рис. 3.15.** Структурна формула молекули лігносульфонату

Стабілізуюча дія ЛСТ на процеси твердіння цементу зростає із збільшенням вмісту т.зв. редуцируючих речовин (РР),

представлених цукрами або вуглеводами як ксилоза, глюкоза, галактоза й ін. Очищення ЛСТ від РР можна робити за рахунок їхньої карамелізації при термічній обробці по спеціальному режиму або за допомогою екстракції кислим розчином ацетону.

В табл. 3.12 наведений склад деяких успішно апробованих в промисловості з виробництва бетону і збірного залізобетону модифікованих технічних лігносульфонатів.

Таблиця 3.12

Модифіковані технічні лігносульфонати

Скорочене найменування	Склад	Скорочене найменування	Склад
ЛТМ	Суміш ЛСТ із натрієвими або кальцієвими солями мінеральних кислот	ЛСТМ-2	Продукт, який отримується шляхом хімічного модифікування ЛСТ карбамідною смолою
		ЛСТМ-1	Продукт хімічної модифікації ЛСТ аміновміщуючими речовинами
ХДСК-1	Продукт обробки ЛСТ лугом при одночасному інтенсивному механічному впливі	МТС-1	Суміш ЛСТ і протиспінювача, в якості якого використовують вищі жирні спирти або кубові залишки їхнього виробництва
НІЛ-20	Суміш ЛСТ і продуктів гідратації портландцементу у вигляді тонкодисперсної суспензії	НІЛ-21	Модифікація ЛСТ протиспінювачем, що вводиться у водний розчин в процесі емульгування

Існує багато способів підвищення ефективності технічних лігносульфонатів як пластифікаторів бетонної суміші:

- фракціонування за молекулярною масою;
- зміна складу функціональних груп;
- конденсація з формальдегідом у кислотному або лужному середовищі;
- окислювання речовинами, що вміщують азот;
- механохімічна обробка.

Для послаблення впливу пластифікаторів типу ЛСТ на гідратацію цементу, крім зазначених вище способів їх хімічного і фізико-хімічного модифікування, широко застосовують композиції пластифікаторів з електролітами-прискорювачами твердіння – сульфатом натрію, форміатом кальцію, триетаноламіном і ін.

Поряд із технічними лігносульфонатами до пластифікаторів бетонних сумішей відносяться гідроксікарбоніві кислоти, гідроксиліровані полімери і ряд інших ПАР.

До пластифікуючих за механізмом дії наближаються повітрявтягувальні і газовиділяючі добавки, що також відносяться до поверхнево-активних речовин (ПАР). *Повітрявтягувальні (мікропіноутворюючі) добавки* збільшують вміст і сприяють зменшенню розмірів пухирців повітря в бетонних сумішах завдяки адсорбції на поверхні поділу "повітря – рідина" і зменшенню поверхневого натягу останньої. Молекули ПАР орієнтуються полярними групами у бік води, а неполярними – у бік пухирців повітря, що перешкоджає їхній коалесценції (злипання). В результаті забезпечується також гідрофобізація твердих часток. Із збільшенням вмісту добавок кількість втягнутого повітря зростає звичайно за параболічною залежністю.

Повітрявтягувальні добавки в залежності від хімічної природи розділяють на шість груп:

- 1) солі, одержувані з деревної смоли;
- 2) синтетичні миючі засоби;
- 3) солі лігносульфонових кислот;
- 4) солі нафтових кислот;
- 5) солі, які отримують з протеїнів;

б) солі органічних сульфокислот.

Накопичено великий досвід застосування в технології гідротехнічного бетону добавки першої групи, що отримується при нейтралізації їдким натром деревної смоли після екстракції з неї скипидару. Ця добавка, що представлена переважно абієтатом натрію, відома за назвою нейтралізований вінсол або смола нейтралізована повітрявтягувальна (СНП).

Основне призначення повітрявтягувальних добавок – радикальне підвищення морозостійкості бетону в результаті створення раціональної системи повітряних пухирців для вижимання частини води при заморожуванні. Добавки цього класу були запропоновані наприкінці 30-х років минулого сторіччя після виявлення ефекту підвищення морозостійкості дорожніх плит, виготовлених на цементі, при помелі якого вводилися присадки відповідних ПАР.

Поряд із підвищенням морозостійкості бетону повітрявтягувальні добавки покращують легкоукладальність бетонних сумішей, зменшують їхнє розшарування і водовідділення, підвищують сульфатостійкість і непроникність бетону.

Повітрявтягувальні добавки з високою піноутворюючою здатністю, застосовуються для виготовлення легких поризованих і пінобетонів. Об'єм втягнутого повітря в бетони в залежності від його функціонального призначення може знаходитися в широкій області: від 2...3 % для важких до 70...80 % для пінобетонів. На об'ємний вміст втягнутого повітря впливають багато чинників, обумовлених складом бетонної суміші і технологічними параметрами.

З підвищенням вмісту добавок, що вводяться у важкий бетон звичайно в межах 0,01...0,3 %, вміст втягнутого повітря збільшується в степеневій залежності. Він зростає також із збільшенням до визначеної межі рухливості бетонної суміші, зменшенням крупності крупного заповнювача, збільшенням частки піску в суміші заповнювачів. Встановлено, що максимальний вміст повітря забезпечують фракції піску від 150 до 600 мкм. Найявність в бетонній суміші високодисперсних матеріалів, таких як зола-виносу, пилюватих фракцій піску, а

також підвищення температури бетонної суміші приводить до зниження повітрявтягування і вимагає збільшення вмісту ПАР. Знижують вміст повітря в бетонній суміші також тривале перемішування і вібування.

*Газоутворюючі добавки* представлені в основному полігідросілоксанами, що відносяться до кремнійорганічних сполук (ГКР-94, ГКР-94М і ін.), а також алюмінієвою пудрою. В результаті взаємодії цих добавок із гідроксидом кальцію виділяється водень у вигляді дрібних газових пухирців. Із зростанням концентрації добавки, кількість утвореного газу збільшується практично лінійно. Кількість газу, що виділився, збільшується із зростанням вмісту лугів у цементі і водоцементного відношення.

Поряд з утворенням дрібних, рівномірно розподілених пор в бетоні при введенні полігідросілоксанів має місце гідрофобізація внутрішньої поверхні пор і капілярів. Вона особливо важлива для підвищення стійкості бетону в умовах капілярного підсмоктування, випаровування розчинів солей, а також періодичного зволоження і висушування, заморожування й відтавання.

В групу *прискорювачів твердіння бетону* входять, як правило, солі-електроліти, основним ефектом яких є прискорення твердіння (у ряді випадків і тужавлення) бетонних сумішей. З прискорювачів твердіння бетону в найбільшій мірі досліджений хлорид кальцію. Ця добавка була запропонована ще в 1885 р. У.Міллером і С.Ніколсом. Застосування хлориду кальцію в бетоні, однак, обмежено через прискорення корозії сталевій арматури і зниження стійкості цементного каменю в сульфатному середовищі. В деяких країнах застосування цієї добавки заборонено.

В якості прискорювача тужавлення і твердіння застосовують також сульфати натрію і калію, нітрати натрію і кальцію, хлорне залізо, хлорид і сульфат алюмінію й інші солі-електроліти.

Для запобігання корозії сталевій арматури запропоновані композиційні добавки, що об'єднують інгібітори з прискорювачами твердіння, наприклад, у вигляді нітрит-нітрату



хлориду кальцію й ін.

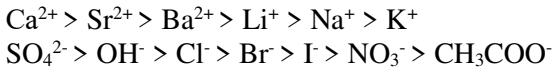
В останні роки встановлена прискорююча дія на твердіння цементу тіосульфату і роданіду натрію ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  і  $\text{NaSCH}$ ), що подібна з дією  $\text{CaCl}_2$ . Міцність бетону в ранні терміни твердіння зростає пропорційно концентрації цих добавок. Добавки тіосульфату і роданіду натрію не викликають корозії арматури в залізобетоні. Як тіосульфат, так і роданід натрію є порівняно дорогими добавками, тому практичний інтерес представляють суміші цих солей на базі промислових відходів, зокрема переробки коксового газу. Ці суміші в Україні виготовляються як добавки системи "Релаксол". Комбінація суміші тіосульфату і роданіду натрію із суперпластифікатором С-3 приводить до певного синергізму, тобто до посилення їх індивідуального прискорюючого і пластифікуючого впливу. Це дозволило запропонувати комплексні добавки "Реламікс" (табл. 3.13).

Таблиця 3.13

Порівняльна ефективність комплексних добавок

Добавка	Дозування, % маси цементу	Зберігання бетонної суміші, год	Підвищення міцності при нормальному твердінні, %		Показники довговічності	
			1...3 доби	7...28 діб	морозостійкість	водонепроникність
С-3	0,6	0,75...1,0	10...20	5...10	F300	W8
Реламікс-1	0,5	0,75...1,00,7	20...40	10...15	F400	W10
Реламікс-2	0,5	5...1,0	30...45	20...25	F500	W10
Реламікс-3	1,0	1,5...2,0	40...50	20...25	F500	W12

За даними В.С. Рамачандрана, за прискорюючим впливом на гідратацію  $C_3S$  катіони й аніони розташовуються в ряди:



Інші автори (Х. Мураками і Х. Танака) вважають, що за прискорюючим впливом найсильнішим з аніонів є  $Cl^-$ , йому декілька поступається  $S_2O_3^{2-}$ .

Хімічні добавки – прискорювачі вводять для підвищення ранньої міцності бетону, зменшення витрати цементу, скорочення часу теплової обробки виробів, зниження температури прогрівання і часу попереднього витримування. Ефективність введення прискорювачів твердіння тим вища, чим коротший цикл тепловологісної обробки, нижче марка цементу і клас бетону, температура ізотермічного прогріву.

Багато добавок – прискорювачів твердіння є також *протиморозними*, що забезпечують твердіння бетону при знижених, у тому числі і від'ємних температурах. Ефективне суміщення солей - прискорювачів твердіння бетону і речовин, що володіють антифрізними властивостями. Як протиморозні широко застосовують добавки на основі хлориду кальцію – суміші хлориду кальцію з хлоридом натрію, нітритом натрію, нітрит-нітратом кальцію й ін. Введення самого хлориду кальцію незначно знижує температуру замерзання води. В якості протиморозних добавок застосовують як електроліти, так і неелектроліти, що не чинять помітного прискорюючого впливу на твердіння бетону або належать до числа сповільнювачів тужавлення і твердіння: аміак, спирти, карбамід і ін.

Добавки можна віднести до протиморозних при зниженні ними температури замерзання води, їхнє дозування можна призначати у відсотках стосовно маси води замішування, концентрація протиморозних добавок призначається в залежності від розрахункової температури твердіння бетону (табл. 3.14).

Знижені дози протиморозних добавок застосовують при проведенні бетонних робіт з використанням утеплювачів і метода раннього заморожування. Останній дозволяє використовувати міцність бетону в замороженому стані із наступним набором

проектної міцності в міру підвищення температури. Ефективним є застосування протиморозних добавок в сполученні з електрообігрівом бетону. При такій технології зимового бетонування добавки-електроліти разом з прискоренням твердіння бетону підвищують електропровідність рідкої фази, що дозволяє вести електропрогрів при температурі нижче 0° С.

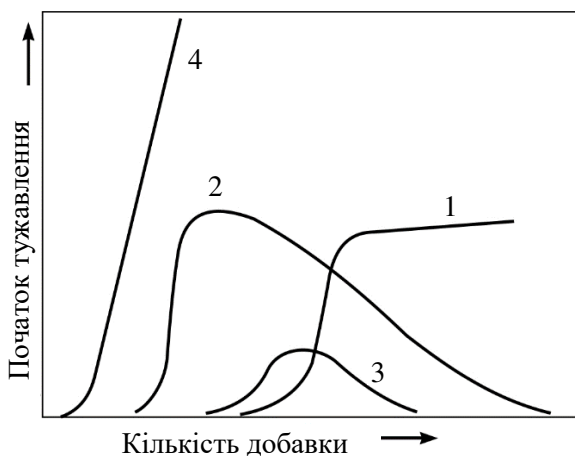
Таблиця 3.14  
Рекомендована концентрація протиморозних добавок

Розрахункова температура твердіння бетону, °С	Концентрація добавок, % до маси води замішування					
	нітрит натрію (НН)	суміш хлоридів кальцію і натрію (ХК+ХН)	нітрит-нітраг кальцію (ННК)	суміш нітрит-нітраг і нітрит-нітраг-сечовини (НК+С)	нітрит-нітраг-хлорид кальцію (ННХК)	поташ (П)
0...-5	8	(6+0)...(6+4)	9	8	6	10
-6...-10	12	(7+3)...(8+5)	16	15	12	12
-11...-16	16	(6+9)...(7+10)	-	18	15	16
-17...-20	-	(5+12)...(6+14)	-	22	18	20
-21...-25	-	-	-	-	22	25...30

Бетони з протиморозними добавками, що містять хлориди, а також поташ, не допускається застосовувати для попередньо напружених конструкцій. Хлоридні добавки забороняється застосовувати також для залізобетонних конструкцій із ненапруженою робочою арматурою діаметром до 5 мм, а також для конструкцій, що мають випуски арматури, як без спеціального захисту, так і з цинковими або комбінованими покриттями. Їх також не можна застосовувати в конструкціях, призначених для роботи в агресивних газових і водних середовищах, в зоні перемінного рівня води, при дії блукаючих постійних струмів і при наявності в заповнювачі включень реакційноздатного кремнезему.

В технологічній практиці поряд із прискоренням твердіння в ряді випадків виникає необхідність в *сповільнювачах тужавлення* (бетонування в жарку погоду, зберігання "життєздатності", транспортування бетонної суміші на далекі відстані й ін.). Одна з перших класифікацій сповільнювачів тужавлення запропонована Л. Форсенем у 1938 р. На основі вивчення концентрацій різних іонів у розчині в процесі реакції цементу з водою Форсен прийшов до висновку, що дія доданих солей тісно зв'язана з розчинністю глинозему. По теорії Форсена до сповільнювачів тужавлення відносяться речовини, що зменшують розчинність алюмінатів і утворюють напівпроникні покриття, які оточують частки цементу.

Форсен розділив сповільнювачі тужавлення на чотири групи відповідно до їхнього впливу на початок тужавлення (рис. 3.16).



**Рис. 3.16.** Дія різних сповільнювачів тужавлення (за Форсенем)

Основні види солей, що входять у ці групи:

1.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}(\text{ClO}_3)_2$ ,  $\text{CaS}_2$ .
2.  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CaBr}_2$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .
3.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .
4.  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_4\text{O}_7$ ,  $\text{Na}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ .

При застосуванні сповільнювачів першої групи розчинність глинозему залишається низькою, навіть якщо добавка вводиться у великій кількості. Добавки другої і третьої груп можуть діяти як сповільнювачі тужавлення лише при низьких концентраціях. Наприклад, невелика добавка хлориду кальцію діє в якості сповільнювача. При цьому можливо утворення подвійної солі  $3\text{Ca}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . При більш високому вмісті хлорид кальцію прискорює тужавлення і твердіння. Сповільнювачі тужавлення четвертої групи можуть затримувати тужавлення і твердіння цементу на невизначено довгий час, Форсен їх назвав "руйнівниками цементу". До них відносяться бура, різні цукри, гумусові речовини. До добавок цієї групи прирівнюють також продукти взаємодії протеїнів і альбумінів або триетаноламінових солей із розчинними кальцієвими солями лігносульфонової кислоти. Дослідження і практичний досвід показують, що "руйнівники" при оптимальних дозуваннях можна з успіхом використовувати для уповільнення тужавлення бетонних сумішей.

Багато пластифікуючих водознижуючих добавок, є одночасно і сповільнювачами тужавлення цементу. Відносячись до класу ПАР, ці добавки адсорбуються на поверхні цементних зерен і продуктах їхньої гідратації, що викликає певний екрануючий ефект і гальмує початкові процеси взаємодії цементу з водою.

Відповідно до класифікації добавок, запропонованої В.Б. Ратіновим і Т.І. Розенберґ, сповільнювачами тужавлення можуть бути добавки першого, другого і четвертого класів. Добавки першого класу є сповільнювачами в тому випадку, якщо вони знижують імовірність виникнення при гідратації цементу зародків нових фаз, другого класу – утворюють екрануючі плівки із продуктів їхньої взаємодії з цементом. При застосуванні добавок четвертого класу – ПАР в результаті адсорбції гальмується розчинення зерен, виникає дифузійний опір процесам гідратації.

**Мінеральні добавки.** Мінеральними добавками прийнято називати тонкодисперсні добавки з мінеральних матеріалів, що вводять в бетонні суміші в кількості звичайно більше 5% для

покращення або надання бетонам спеціальних властивостей. За походженням добавки цього типу бувають як природними, так і техногенними. Мінеральні добавки прийнято розділяти в залежності від їхньої пуцоланової активності на інертні й активні. У групу *активних добавок* або пуцолан, входять матеріали, здатні вступати при нормальній температурі в хімічну реакцію з гідроксидом кальцію з утворенням речовин, що володіють в'язучими властивостями. При твердінні бетонів джерелом гідроксиду кальцію є основні мінерали, що входять у портландцементний клінкер і зазнають гідролізу при впливі води.

Матеріали, що самоцементуються, які містять значну кількість оксиду кальцію поряд з кислотними оксидами (висококальцієві шлаки і золи) називають іноді активними гідравлічними добавками, підкреслюючи їхню здатність повільно твердіти у водному середовищі. Для більш повної реалізації в'язучого потенціалу таких добавок необхідна додаткова кількість вапна від зовнішнього джерела, яким може бути портландцемент або товарне вапно.

У практиці виробництва гідротехнічного бетону особливо для масивних споруд поширення набули тонкодисперсні *мінеральні добавки*, які вводять із цементом або безпосередньо в бетонні суміші для економії цементу і регулювання ряду властивостей бетону. В гідротехнічному будівництві є досвід застосування як інертних мінеральних добавок (тонкомелений пісок, граніт, вапняк, бентоніт, лес та ін.), так і активних (зола ТЕС, трас, опока, трепел, глієжі та ін.). В 30-х роках минулого століття на багатьох гідротехнічних об'єктах в бетонну суміш почали вводити активні мінеральні (пуцоланові) добавки. При будівництві Рибінського та Угліцького гідровузлів цемент отримували шляхом помелу 65% клінкеру і 35% кварцового піску, а в бетонну суміш додавали ще 20% трепелу. В наш час при будівництві великих гідротехнічних об'єктів найбільшого поширення набуло введення в бетонні суміші в якості активної мінеральної добавки *золи-виносу* теплових електростанцій.

В основу класифікації активних мінеральних добавок, прийнятої в європейських країнах і США, покладені їхня активність і хіміко-мінералогічний склад (табл. 3.15).

Таблиця 3.15

## Класифікація і характеристика мінеральних добавок

№	Класифікація		Хімічний і мінеральний склад	Характеристика
	Ознака	Матеріал		
1	В'язучі властивості	Швидко-охолоджені металургійні шлаки	Силікатне скло, що містить CaO, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Кристалічні компоненти – в невеликій кількості	Гранули з 5...15% вологи. Після висушування подрібнюються до розміру < 45 мкм. S <sub>пит.</sub> – 350...500 м <sup>2</sup> /кг (за Блейном)
2	В'язучі і пуцоланові властивості	Високо-кальцієва зола-виносу (CaO>10%)	Аморфний кремнезем, що містить CaO, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Кристалічні компоненти можуть бути присутні в виді SiO <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> A. Штучні гідравлічні добавки	10...15% часток розміром > 45 мкм. Більша частина – сферичної форми. S <sub>пит.</sub> – 400 м <sup>2</sup> /кг (за Блейном)
3	Висока пуцоланова активність	Мікрокремнезем	Мікрокремнезем аморфної модифікації	Порошок з часток сферичної форми d=0,1 мкм. S <sub>пит.</sub> ≈ 20 м <sup>2</sup> /кг (за БЕТ)
		Зола рисової лузги	Те саме	Частки <45 мкм з розвиненою комірчастою структурою. S <sub>пит.</sub> ≈ 60 м <sup>2</sup> /кг (за БЕТ)

продовження табл. 3.15

№	Класифікація		Хімічний і мінеральний склад	Характеристика
	Ознака	Матеріал		
4	Нормальна пуцоланова активність	Низкокальцієва зола-виносу (CaO<10%)	Силікатне скло, що містить $Al_2O_3$ , $Fe_2O_3$ , луги. Кристалічна речовина із $SiO_2$ , муліту, гематиту, магнетиту	Порошок із сферичних часток >45 мкм. Більшість часток >20 мкм. $S_{пит} \approx 250...350$ м <sup>2</sup> /кг (за Блейном)
		Природні матеріали, опока	Крім алюмосилікатного скла, містить кварц, польовий шпат, слюду	Більшість часток розмілена до розміру <45 мкм.
5	Слабка пуцоланова активність	Повільно охолоджені шлаки, золи гідровидалення, золошлаки	Кристалічні силікатні матеріали. Мало некристалічних компонентів	Подрібнюються додатково для надання пуцоланових властивостей

Активними мінеральними добавками вважають звичайно такими, якщо вони забезпечують кінець тужавлення тіста, виготовленого на основі добавки і гашеного вапна не пізніше, чим через 7 діб після замішування водою, а зразки з цього тіста зберігають водостійкість через 3 доби після закінчення тужавлення. Активність добавок вимірюють по кількості CaO в мг, поглиненого однонормальним розчином (1 н.р.) добавки з водного розчину вапна протягом 30 діб. Вона коливається від 50...100 для золи-виносу до 350...400 мг CaO на 1 г добавок для деяких природних матеріалів осадового походження (опока, трепел і ін.). Активність мінеральних добавок визначають також за допомогою мікрокалориметричного методу за значенням питомої



теплоємності і тепловиділення при їхньому змочуванні в полярних і неполярних рідинах з врахуванням коефіцієнту гідрофільності і ряду інших параметрів.

Хімічні методи визначення активності мінеральних добавок не можна вважати достатніми для оцінки їхньої якості. Найбільш надійним методом порівняльної оцінки мінеральних добавок є визначення міцності при стиску портландцементу при нормальних умовах або при прискоренні твердіння шляхом тепловологісної обробки.

З активних мінеральних добавок в бетонні суміші найбільш широко використовується зола-виносу. Зола-виносу – тонкодисперсний продукт високотемпературної обробки мінеральної частини кам'яного вугілля й інших видів твердого палива. Вона утворюється при їхньому спалюванні в пиловидному стані в топках котлів і осаджується у пиловловлюючих пристроях із димових труб. Найбільш ефективними золовловлювачами є електрофільтри, ККД яких 95...97%.

Зола-виносу складається в основному з часток розміром 5...100 мм. Її хіміко-мінералогічний склад відповідає складу мінеральної частини спалюваного палива. Наприклад, при згорянні кам'яного вугілля зола являє собою випалену глинисту речовину з включенням дисперсних часток кварцового піску, при згоранні сланців - мергель із домішками гіпсу і піску. При випалі мінеральної частини палива дегідратується глиниста речовина й утворюються низькоосновні алюмінати і силікати кальцію.

Основним компонентом золи-виносу є склоподібна алюмосилікатна фаза, що складає 40...65% усієї маси та має вигляд часток кулеподібної форми розміром до 100 мкм. З кристалічних фаз у золах можуть бути присутні  $\alpha$ -кварц і муліт, а при підвищеному вмісті  $Fe_2O_3$  також гематит. Кількісне співвідношення між  $\alpha$ -кварцом і мулітом визначається співвідношенням  $SiO_2/Al_2O_3$ . Із збільшенням останнього вміст  $\alpha$ -кварцу в кристалічній фазі зростає, а муліту падає. Відповідно дещо зростає активність зол з поглинання вапна. Золи, збагачені оксидами заліза, більш легкоплавкі, в них утворюється більше скла.

Скло в золах можна розглядати як матеріал, що містить аморфіти – утворення, близькі за складом і структурою до відповідних кристалічних фаз, але з високою питомою поверхнею – і неупорядковані глиноземисто-кремнеземисті прошарки між ними. Здатність склоподібної фази до гідратації і гідролізу пояснюється її мікроструктурою і високою проникністю аморфітів, що обумовлена пустотами між іонними угрупованнями. Активність проміжної аморфної речовини склоподібної фази визначається співвідношенням глинозему і кремнезему, чим воно більше, тим легше йде процес гідратації зольного скла в лужному і в сульфатно-лужному середовищі. В нейтральному середовищі зольне скло стійке. На гідралічну активність кальцієво-алюмосилікатного скла, що міститься в золі, позитивно впливають домішки оксидів магнію, заліза і деякі інші елементи.

Певною гідралічною активністю в золах, поряд із склоподібною фазою, володіє дегідратована й аморфізована глиниста речовина. Активність цієї фази залежить від мінералогічного складу глини, що входить у мінеральну частину палива, і підвищується при тепловій обробці. З підвищенням в золі вмісту аморфізованої глинистої речовини збільшується її водопотреба.

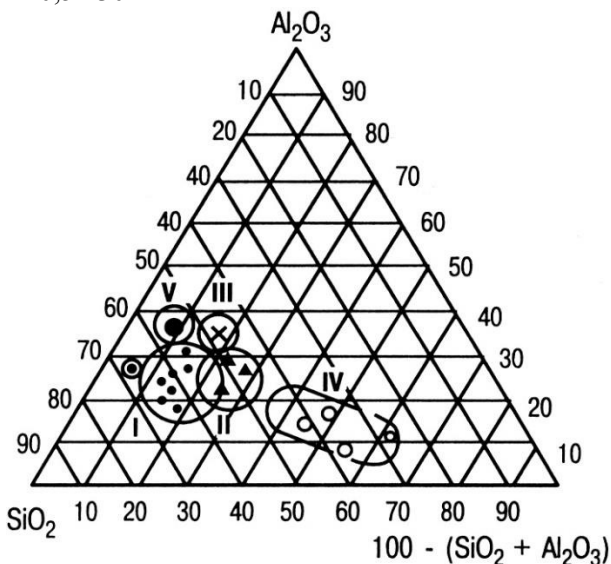
Якщо мінеральна частина палива містить значну кількість карбонатів, то в золі утворюються низькоосновні силікати і ферити кальцію, здатні взаємодіяти з водою.

В невеликій кількості в золи входять домішки: вільні оксиди кальцію і магнію, сульфати, сульфіді й ін.

В золах, як правило, міститься вуглець у вигляді різних модифікацій коксових залишків. Вміст їх залежить від виду спалюваного палива: для бурого вугілля і паливних сланців він складає менше 4%, кам'яного вугілля – 3...12, антрациту – 15...25%. Вміст часток, що не згоріли, у тонкодисперсних фракціях золи менше, ніж у грубодисперсних.

Хімічний склад золи-виносу коливається в залежності від складу вугільних родовищ (рис. 3.17). Вміст оксидів у золах різних ТЕС, % коливається в межах:  $\text{SiO}_2$  – 37...63;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 9...37;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 4...17;  $\text{CaO}$  – 1...32;  $\text{MgO}$  – 0,1...5;  $\text{SO}_3$  – 0,05...2,5;

$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  – 0,5...5. Втрати при прожарюванні, що характеризують вміст в золі вуглецевих часток, що не згоріли, складають 0,5...30%.



**Рис. 3.17.** Хімічний склад зол електростанцій, які працюють на вугіллі різних басейнів: I...V – відповідно Кузнецького, Донецького, Підмосковного, Канско–Ачинського, Екібастузьського

Важливими показниками якості золи є її дисперсність і зерновий склад. Дисперсність золи-виносу виражається звичайно питомою поверхнею, що визначається методом повітряпроникності, а також значеннями залишків на ситах при просіюванні. Прямої залежності між цими двома показниками немає. Питома поверхня зол-виносу складає 100...400 м<sup>2</sup>/м. У багатьох випадках вона наближається до питомої поверхні цементу. Золи, що містять більшу кількість незгорівших залишків палива, мають більш високі значення питомої поверхні.

Зерновий склад золи коливається в широких межах: розміри зерен 1...200 мкм. У золах-виносу вміст фракції більше 85 мкм звичайно не перевищує 20%. Біля 50% часток золи мають звичайно розміри 30...40 мкм. Більш крупні золи утворюються

при підвищеному вмісті в мінеральній частині палива оксидів-плавнів CaO і Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Дисперсність золи залежить від тонкості подрібнення пиловидного палива, із зменшенням тонкості подрібнення збільшується кількість часток, що не згоріли.

Для золи характерним є значний вміст часток, що мають дрібні замкнуті пори. Вони є результатом спучування розплавленої мінеральної маси газами, що виділяються при дегідратації глинистих мінералів, вапняку, гіпсу й органічних речовин. Пори можуть досягати 60% об'єму часток золи. Високий вміст мікропор у золі обумовлює і високе значення її дійсної питомої поверхні, виміри якої, виконані за адсорбцією азоту, показали, що вона на порядок вище питомої поверхні цементу. З високою дійсною питомою поверхнею золи зв'язані такі її властивості, як адсорбційна здатність, гігроскопічність, гідравлічна активність.

Інтегральною характеристикою хімічного складу зол служить модуль основності - відношення процентного вмісту основних оксидів до кислих:

$$m = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}. \quad (3.12)$$

Для основних зол  $m > 0,9$ , кислих –  $0,6 \dots 0,9$ , надкислих  $m < 0,6$ . В основних золах сумарний вміст CaO досягає 50, а у надкислих – 12%. Останні є найбільше поширеними.

За значенням питомої поверхні золи поділяють на тонко- ( $S_{\text{пит}} > 4000 \text{ см}^2/\text{г}$ ), середне- ( $S_{\text{пит}} = 2000 \dots 4000 \text{ см}^2/\text{г}$ ) і грубодисперсні ( $S_{\text{пит}} < 2000 \text{ см}^2/\text{г}$ ). При насипній густині менше  $800 \text{ кг}/\text{м}^3$  золи вважаються легкими;  $800 \dots 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$  – середньої густини і більше  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$  – важкими.

У залежності від області застосування золи поділяють на види: I – для залізобетонних конструкцій і виробів; II – для бетонних конструкцій і виробів; III – для конструкцій гідротехнічних споруд, а також на класи – для важкого (А) і легкого (Б) бетону.

Питома поверхня золи класу А повинна бути не менше 2800 см<sup>2</sup>/г, а золи класу Б – знаходиться в інтервалі 1500...4000 см<sup>2</sup>/г. Залишок на ситі №008 для золи класу А не повинен перевищувати 15% за масою.

За хімічним складом і вологістю зола повинна відповідати вимогам, зазначеним в табл. 3.16.

Таблиця 3.16

Вимоги до золи як до добавки в бетони

Показники	Значення показника для золи виду (класу)		
	I (А і Б)	II (А і Б)	III (А)
Вміст SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % за масою, не менше, для золи: антрацитової і кам'яновугільної буровугільної	70 50	Не нормується Те саме	70 50
Вміст сірчаних і сірчаноокислих сполук в перерахунку на SO <sub>3</sub> , % за масою, не більше	3	3,5	3
Вміст вільного оксиду кальцію (CaO), % за масою, не більше	3	5	2
Вміст оксиду магнію (MgO), % за масою, не більше	5	5	5
Втрати при прожарюванні, % за масою, не більше, для золи: антрацитової	15	20	5
кам'яновугільної	7	10	5
буровугільної	5	5	3
Вологість, % за масою, не більше	3	3	3

**Примітка.** У випадку використання золи для виготовлення конструкцій, до яких висувають естетичні вимоги, вміст лужних оксидів повинен бути в перерахунку на Na<sub>2</sub>O, % за масою, не більше, для золи: антрацитової і кам'яновугільної – 3; буровугільної – 1,5.

Стандарт вимагає, щоб зола-виносу забезпечувала рівномірність зміни об'єму суміші цементу і золи при випробуванні зразків кип'ятінням у воді. Якщо забезпечується

рівномірність зміни об'єму зразків при іспиті їх в автоклаві при тиску (2,1±0,1) МПа, допускається вміст у золі вільних оксидів кальцію і магнію в кількостях, що перевищують зазначені в табл. 3.16. Зразки вважаються витримавшими випробування, якщо значення їхнього відносного подовження не перевищує для бетону на портландцементі 0,5, на шлакопортландцементі – 0,2 %.

Більшістю стандартів на золу-виносу також обмежуються її вологість, хімічний склад і дисперсність. Встановлювані при цьому значення основних показників змінюються у визначених межах: вологість – не більше 1...3%, втрати при прожарюванні – не більше 5...12 %, вміст SiO<sub>2</sub> – не менше 40...45 %, SO<sub>3</sub> – не більше 2,5...5 %, дисперсність – не менше 1250...4250 см<sup>2</sup>/г.

Стандарт США встановлює склад і вимоги до трьох класів мінеральних добавок, що вводять в бетонну суміш (табл. 3.17):

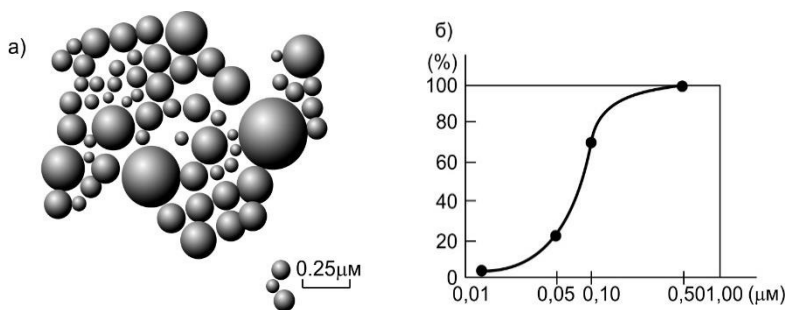
- клас N - сирі й випалені натуральні пуцолани (діатоміти, сланці, туфи, попели, пемза);
- клас F – зола-виносу, яку отримують при спалюванні антрациту або бітумінозного вугілля;
- клас C – зола-виносу, яку отримують із бурого вугілля.

Таблиця 3.17

Вимоги до пуцоланових добавок і золи-виносу (стандарт США)

Показники	Клас мінеральної добавки		
	N	F	C
Мінімальний вміст SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	70	70	50
Вміст SO <sub>3</sub> , %, не більше	4	5	5
Вологість, %, не більше	3	3	3
Втрати при прожарюванні, %, не більше	10	6	6
Залишок на ситі з розміром отворів 45 мкм, %, не більше	34	34	34
Величина активності, %, не менше в 7 діб	75	75	75
Автоклавне розширення або усадка, %, не більше	0,8	0,8	0,8

До високоактивних мінеральних добавок у бетон, все ширше застосовуваним в останні десятиріччя, відносяться ультрадисперсні продукти газоочищення металургійних електродугових печей, т.зв. *мікрокремнезем* (МК). Він містить частки сферичної форми із середнім діаметром 0,1 мкм (рис. 3.18) і питомою поверхнею 15...25 м<sup>2</sup>/г і вище. Його насипна густина – 150...250 кг/м<sup>3</sup>. За хімічним складом МК представлений в основному некристалічним кремнеземом, вміст котрого звичайно перевищує 85 і досягає 98%. Мікрокремнезем як добавка в бетони був уперше запропонований на початку 50<sup>х</sup>, а почав масово використовуватися з початку 70<sup>х</sup> років минулого сторіччя в Норвегії, а потім і інших країнах. Відповідно до норвезьких норм, кількість діоксиду кремнію в МК повинна бути не менше 85%, а дозування добавки в бетон – не вище 10% маси цементу. Унікальна питома поверхня (до 2000 м<sup>2</sup>/кг) у сполученні з аморфізованою структурою часток, наявністю таких домішок як карбід кремнію, що мають високу поверхневу енергію, обумовлюють високу структуруючу і реакційну здатність цього матеріалу в порівнянні з іншими активними мінеральними добавками. Вміст МК у бетонах рекомендується в кількості 20...50 кг/м<sup>3</sup>.



**Рис. 3.18.** Основні характеристики мікрокремнезему:  
а – форма і розмір зерен; б – крива зернового складу

Мікрокремнезем через надзвичайно високу дисперсність й аморфну структуру часток викликає істотне збільшення

водопотреби бетонних сумішей, тому його застосовують у комбінації із суперпластифікаторами.

Дослідження показали, що з позицій коефіцієнту ефективності, який враховує витрату цементу, суперпластифікатора і МК із різних видів мікрокремнеземистих добавок, найкращими є відходи виробництва кристалічного кремнію і феросиліцію, які містять  $\text{SiO}_2$  у кількості вище 89%. Менш ефективні відходи виробництва силікомарганцю і ферохрому.

Транспортувати МК в неущільненому пиловидному стані досить складно, тому його звичайно гранулюють або застосовують у вигляді водної суспензії (пасти).

Поряд із МК в якості ефективних модифікаторів бетону за певних умов (висока дисперсність, комбінація із суперпластифікаторами й ін.) можуть служити й інші мінеральні матеріали – метакаолін, цеоліти й ін.

### **3.3. Вода для замішування бетонної суміші**

Вода для замішування є активним компонентом, що забезпечує твердіння цементного каменю і необхідну легкоукладальність бетонної суміші.

Для замішування бетонних сумішей рекомендується застосовувати воду з водневим показником рН у межах 4...12,5. Важливе значення має визначення у воді шкідливих домішок, що перешкоджають нормальному тужавленню і твердінню цементу і сприяють утворенню в бетоні речовин, що знижують його міцність і довговічність. До сповільнення швидкості процесів гідратації і зниженню міцності бетону приводять домішки у воді ряду органічних речовин: цукрів, фенолу, нафтопродуктів, жирів, масел і ін. Вміст органічних ПАР, цукрів і фенолу не повинен перевищувати 10 мг/л. Домішки у воді нафтопродуктів і жирів осідають на поверхні зерен цементу і заповнювачів при замішуванні бетонної суміші і погіршують якість контактної зони. Розчинні солі при підвищеній концентрації кристалізуються в порах цементного каменю й утворюють на поверхні бетону висоли.



Максимально допустимий вміст у воді для замішування бетонів і розчинів шкідливих домішок наведено в табл. 3.18.

Таблиця 3.18

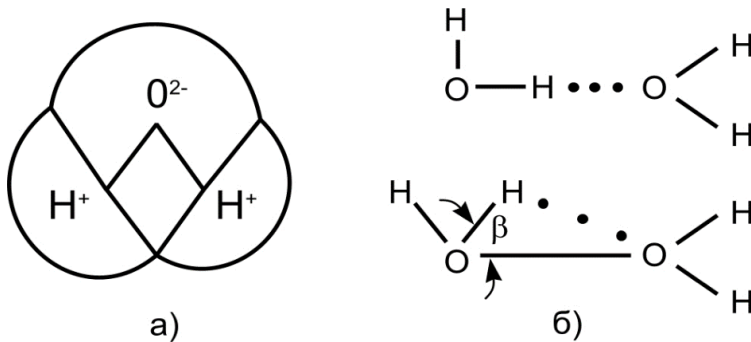
Максимально допустимий вміст шкідливих домішок у воді, мл/л

Призначення води	Розчинні солі	Іони $SO_4^{2-}$	Іони $Cl^-$	Зважені частки
1. Виготовлення напружених залізобетонних конструкцій	2	0,6	0,35	0,2
2. Виготовлення бетонних і залізобетонних конструкцій із ненапруженою арматурою	5	2,7	1,2	0,2
3. Виготовлення бетонних неармованих конструкцій, до яких ставляться вимоги з обмеження утворення висолів, а також бетону і залізобетону підводної і внутрішньої зони масивних споруд	10	2,7	3,5	0,3
4. Для промивання заповнювачів	5	2,7	1,2	0,5
5. Для поливання робочих швів при перервах у бетонуванні, поверхні стиків, які підлягають омонолічуванню	1,0	0,5	0,35	0,2
6. Для поливання бетонних і залізобетонних конструкцій	5	2,7	1,2	0,5
7. Для поливання бетонних конструкцій при можливості появи вицвітів, висолів	3,5	2,7	2,0	0,5

Підвищені вимоги (такі ж, як і для попередньо напружених залізобетонних конструкцій) висувають для води замішування бетону на глиноземистому цементі.

Морську воду незалежно від вмісту солей забороняється застосовувати для замішування залізобетонних конструкцій при бетонуванні конструкцій, де неприпустимі сольові висоли на лицьових поверхнях, а також коли залізобетонні конструкції знаходяться в умовах жаркого клімату і періодично зволожуються. Забороняється застосовувати також болотні води, багаті органічними домішками, стічні і промислові води з домішками кислот.

За сучасними уявленнями вода має тривимірну сітку молекул, з'єднаних водневими зв'язками. Молекула води являє собою комбінацію двох ядер атома водню й одного ядра кисню, розташованих у кутах рівнобедреного трикутника і занурених в електронну хмару, складену з 10 електронів при загальному радіусі молекули  $1,38 \cdot 10^{-8}$  см. Кожна молекула може утворювати до чотирьох водневих зв'язків, спрямованих до вершин правильного тетраедра (рис. 3.19). Ця сітка існує у всьому інтервалі температур і тисків, в якому вода знаходиться в рідкому стані.



**Рис. 3.19.** Будова молекули води (а) і типи водневих зв'язків в димерах води (б)

Водневі зв'язки приблизно в 10...15 раз слабші ковалентних. Мала енергія водневих зв'язків у порівнянні із внутрішньомолекулярними дозволяє їх легко руйнувати і відновлювати, робить ці зв'язки залежними від температури,

тиску, рН, іонної сили і складу середовища. Відповідно до полімеризаційної теорії, молекули води можуть існувати у формі  $(\text{H}_2\text{O})$  – гідролей (одиначні молекули),  $(\text{H}_2\text{O})_2$  – дигідролей (подвійні молекули),  $(\text{H}_2\text{O})_3$  – тригідролей (потрійні молекули). Співвідношення між асоціатами молекул залежить від температури. У пароподібному стані вода складається переважно із молекул гідролі, а в замерзломому – із молекул тригідролі.

Водневі зв'язки води переважно позначаються на адгезійних властивостях цементного тіста і його здатності твердіти. При деструктуванні води можливі її активація і збільшення інтенсивності взаємодії в цементних системах. Зміна внутрішньої енергії води відбувається відповідно до загальних законів термодинаміки. При високій швидкості імпульсних впливів збільшується поляризація води і концентрація іонів – активних компонентів середовища в реакціях гідратації цементів.

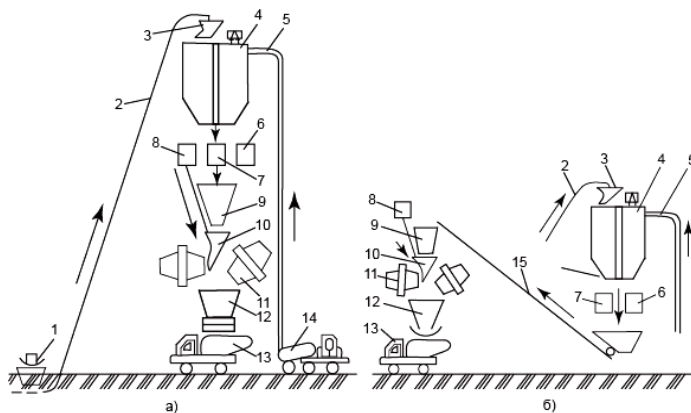
На властивості води істотно впливають не тільки домішки у вигляді розчинів колоїдів або суспензій, але і розчинені гази. Останні адсорбуються поверхнею вихідного в'язучого і скорочують площу його поверхні, доступної для води замішування. Як показано роботами І.М. Грушко, бетони, отримані із сумішей, замішаних деаерованою водою, характеризуються підвищеною густиною і меншою дискретністю структури. Деаерація води дозволяє зменшити водопоглинання, збільшити міцність і морозостійкість бетону на 30...40%.

Багатьма дослідниками показаний активуючий вплив на воду замішування магнітної й ультразвукової обробки. При цьому ефективність такої активації залежить від наявності домішок у воді. На ефективність впливу магнітної й ультразвукової обробки води позитивно впливає її деаерація і вибір оптимальних фізичних параметрів: інтенсивності коливань ультразвукового поля, швидкості руху суспензій в зоні ультразвукової обробки й ін. Позитивний вплив робить також направлена зміна складу води замішування і ступеня насичення водних розчинів хімічними сполуками.

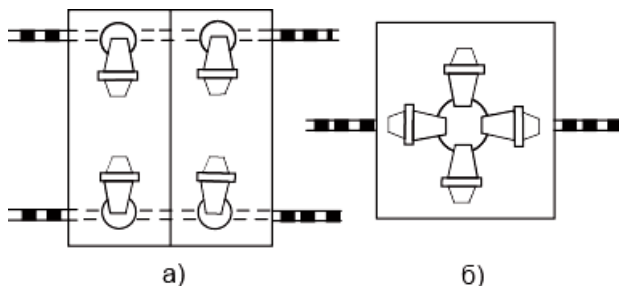
## 4. ВИРОБНИЦТВО, ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

### 4.1. Виробництво бетонних сумішей

Виробництво бетонних сумішей на сучасних бетонних заводах складається з ряду транспортно-складських, допоміжних і технологічних процесів. До основних технологічних операцій відносяться: дозування цементу, води, заповнювачів і добавок і їхнє перемішування до досягнення однорідної суміші заданого складу. Бетонні заводи й установки класифікують: за конструкцією – на *стаціонарні й інвентарні збірно-разбірні і пересувні (мобільні)*; за принципом роботи – на підприємства *циклічної і безперервної дії*; за компонованням обладнання – на *партерні (двоступінчасті) і висотні (одноступінчасті)* (рис. 4.1); за схемою розташування змішувальних машин у плані – на *лінійні і гніздові* (рис. 4.2); за способом керування – на *механізовані та автоматизовані*.



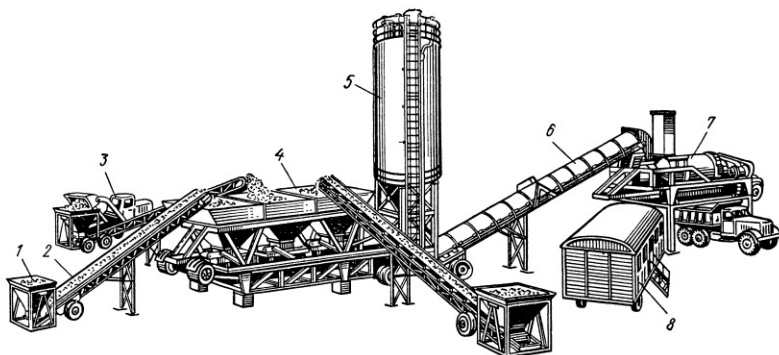
**Рис. 4.1.** Схеми компоновання бетонозмішувальних установок:  
а – висотна (вертикальна); б – партерна (двоступінчаста): 1 – конвеєр складу заповнювачів; 2 – конвеєр подачі заповнювачів у витратні бункери; 3 – поворотна направляюча; 4 – витратний бункер; 5 – труба пневмоподачі цементу; 6, 7, 8 – дозатори цементу, заповнювачів, води; 9, 10 – розподільні воронки; 11 – бетонозмішувач; 12 – роздатковий бункер; 13 – автобетоновоз; 14 – автоцементовоз; 15 – скіповий підйомник або конвеєр



**Рис. 4.2.** Схеми одноступінчастих бетонозмішувальних установок:  
 а – двосекційна з двома бетонозмішувачами в кожній секції;  
 б – односекційна гніздового типу з чотирма бетонозмішувачами

Бетонні заводи циклічної дії складаються зі складів заповнювачів, цементу та необхідних добавок, пристроїв для транспортування цих матеріалів зі складу, витратних бункерів, дозаторів та змішувачів циклічної дії. Бетонні заводи безперервної дії мають той самий склад вузлів та механізмів, але для дозування та змішування матеріалів на них застосовується обладнання безперервної дії.

Схема бетонозмішувальної установки безперервної дії представлена на рис. 4.3.

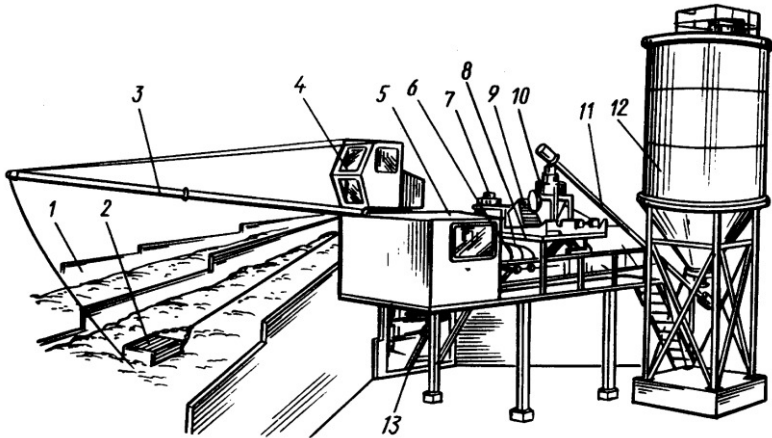


**Рис. 4.3.** Автоматизована бетонозмішувальна установка безперервної дії СБ – 109: 1 – приймальна лійка; 2 – похилий стрічковий конвеєр; 3 – навантажувач; 4 – бункери заповнювачів; 5 – силос для цементу; 6 – похилий стрічковий конвеєр у кожусі; 7 – змішувач; 8 – пересувний вагон

В умовах сучасних темпів будівництва все більш ефективними стають мобільні бетонні заводи. Вони дозволяють здійснювати оперативне перебезування з одного будівельного майданчика на інший, наближаючи виробництво бетонної суміші до місця укладання.

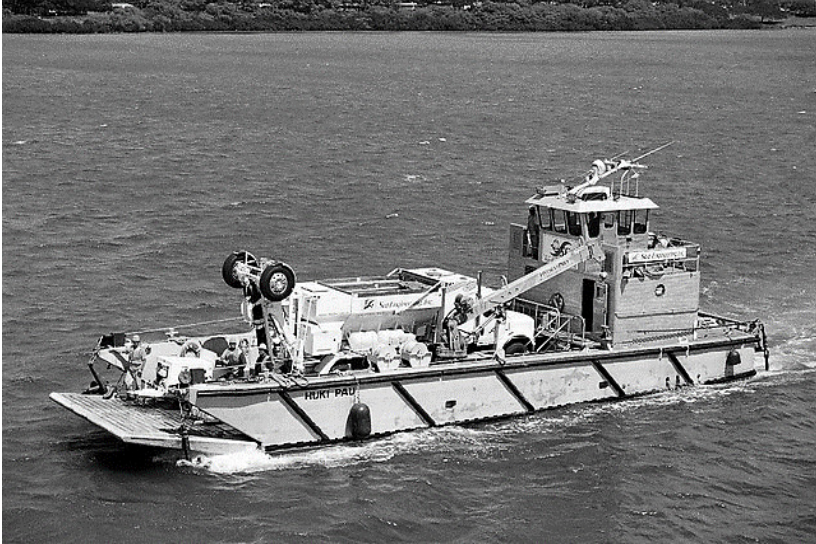
Мобільні установки, як правило, представляють автоматизований комплекс подавальних та змішувальних пристроїв, змонтованих в компактний агрегат (рис. 4.4, 4.5). Такі установки випускають в модульному виконанні або у вигляді моноблоку. Вони можуть бути легко переміщені в інше місце та адаптовані до зовнішніх умов. Розгортання мобільних заводів виконується протягом одного дня, вони не вимагають спеціальних фундаментів.

Бетонозмішувальні установки циклічної дії з періодично повторюваними технологічними операціями кращі для підприємств із багатомарочною продукцією. Установки безперервної дії ефективні при масовому виробництві одномарочної бетонної суміші, зокрема в гідротехнічному будівництві.



**Рис. 4.4.** Бетонозмішувальна установка СБ-134:

- 1 – склад заповнювачів; 2 – ківш; 3 – стріла; 4, 5 – кабіна;
- 6 – змішувач; 7, 10 – дозатори води і цементу; 8 – рама; 9 – воронка;
- 11 – конвеєр; 12 – смінь для зберігання цементу; 13 – направляюча

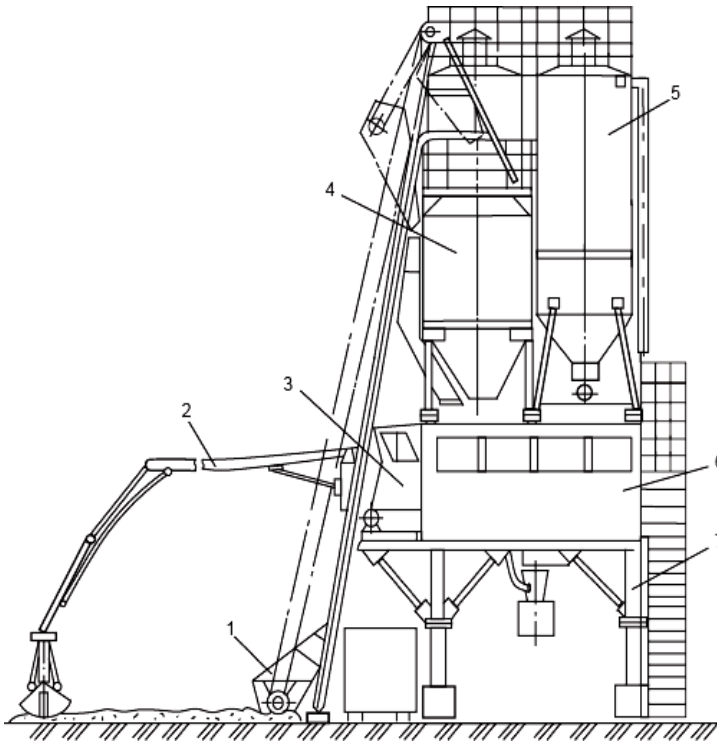


**Рис. 4.5.** Мобільний бетонний завод для гідротехнічних робіт, змонтований на баржі

Бетонні заводи, розраховані на довгострокову експлуатацію, проектують за одноступінчатою або вертикальною схемою. За такою схемою здійснюється однократний підйом матеріалів у витратні бункери з наступним гравітаційним проходженням аж до вивантаження готової бетонної суміші в транспортні засоби.

В даний час одержали поширення стаціонарні заводи для виробництва бетонів і розчинів баштового типу (рис. 4.6).

За двоступінчастою або партерною схемою матеріали піднімають в два прийоми – спочатку у витратні бункери, а потім в завантажувальні пристрої змішувачів. Основною перевагою вертикального компонування є менша площа, необхідна для бетонозмішувальної установки, партерної схеми – менша висота. При партерній схемі полегшується монтаж, однак зростає число одиниць приймального обладнання для матеріалів і перевантажень останніх. Партерні установки є кращими для мобільних заводів, які часто перебазуються.



**Рис. 4.6.** Бетонозмішувальна установка баштового типу:

- 1 – підйомник для подачі заповнювачів; 2 – завантажувач заповнювачів; 3 – кабіна управління; 4 – бункер для заповнювачів; 5 – бункер для цементу; 6 – блок змішувальний; 7 – каркас основи

При лінійному розташуванні кожному змішувачеві необхідний один комплект дозаторів з витратними бункерами, при гніздовому розташуванні один комплект дозаторів забезпечує роботу декількох змішувачів. В останньому випадку раціональним є масове виготовлення бетону обмеженого числа складів, можливе завантаження транспортних засобів великої вантажопідйомності, зниження витрат на будівництво та експлуатацію заводів. Лінійне розташування бетонозмішувачів дозволяє одночасно видавати на транспортні засоби суміші різних складів.



На сучасних бетонних заводах більшість основних технологічних операцій автоматизована. При частковій автоматизації використовуються засоби автоматичного контролю та управління окремими параметрами. При комплексній автоматизації весь технологічний процес цілком автоматизований, тобто всі механізми і транспортні засоби забезпечені засобами автоматичного контролю і керування та зосереджені на пульті керування. Автоматичне керування полягає в тому, що відповідні пристрої забезпечують своєчасний початок, необхідну послідовність і припинення окремих операцій, що складають технологічний процес. Автоматично здійснюється корекція складів сумішей в залежності від фактичної вологості заповнювачів, а також їхній перерахунок на необхідний об'єм замісу. Комплексна автоматизація здійснюється програмним керуванням з регулюванням всіх основних технологічних процесів із застосуванням мікропроцесорів і електронно-обчислювальних машин. Пам'ять ЕОМ автоматизованих систем керування дозволяє готувати в автоматичному режимі велику кількість сумішей з різними рецептурами, які містять до 8...10 компонентів бетону в тому числі декількох хімічних добавок, враховувати витрату матеріалів, об'єм виготовленого бетону, а також проводити розрахунки з постачальниками і споживачами.

Бетонні заводи включають бетонозмішувальну установку, яка складається з витратних ємностей для вихідних матеріалів, дозаторів, бетонозмішувачів і різного допоміжного обладнання, склади основних компонентів бетонної суміші; внутрішньозаводські транспортні технологічні комунікації (конвеєри, цементопроводи, повітряпроводи й ін.).

Залежно від конкретних потреб і особливостей будівництва до складу бетонних заводів можуть входити додаткові установки та обладнання для сортування заповнювачів, приготування добавок і ін.

Річну продуктивність бетонного заводу циклічної дії визначають за формулою:

$$\Pi^{\text{ц}} = \frac{T_{\text{к.ф}}}{T_{\text{ц}}} V_{\text{б}} n K_{\text{в}}, \quad (4.1)$$

де  $T_{\text{к.ф}}$  – корисний (розрахунковий) фонд часу, год;  
 $T_{\text{ц}}$  – тривалість циклу приготування одного замісу, год;  
 $V_{\text{б}}$  – об'єм змішувача по виходу бетонної суміші;  
 $n$  – кількість змішувачів;  
 $K_{\text{в}}$  – коефіцієнт використання змішувачів у часі, приймають рівним 0,8...0,9.

На великих гідровузлах бетонна суміш виготовляється на центральному бетонному заводі або заводі-автоматі з програмним керуванням із змішувачами ємністю не менше 1000 л. Використовуються, як правило, бетонні заводи циклічної дії у поєднанні із заводами безперервної дії. Заводи обладнуються пристроями для введення в бетонну суміш хімічних добавок з роздільними трактами їх дозування, а при необхідності і мінеральних добавок, а також пристроями для підігріву та охолодження компонентів бетонної суміші.

## 4.2. Транспортування та ущільнення бетонної суміші

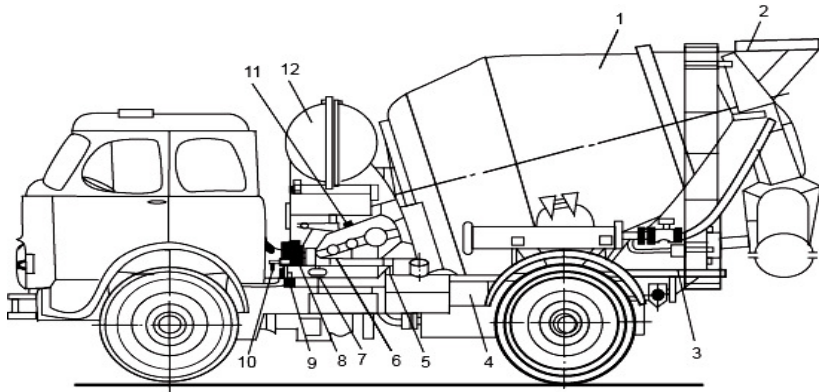
**Транспортування бетонної суміші.** Існує різноманіття способів транспортування бетонної суміші до місця укладання. На заводах товарного бетону суміш перевозять на об'єкти, розташовані на значній відстані спеціалізованим автомобільним транспортом (автосамоскидами, автобетоновозами, автобетонозмішувачами), на об'єкти розташовані близько до заводу – за допомогою насосного транспорту, стрічкових конвеєрів, вузькоколіїної залізниці. На заводах збірного залізобетону суміш транспортують стрічковими конвеєрами, самохідними роздавальними бункерами, бадьями і по трубах за допомогою стиснутого повітря.

На будівельному об'єкті доставку бетонної суміші від місця її розвантаження до місця укладання здійснюють кранами за схемою "кран-баддя", підйомниками, конвеєрами, а також бетононасосами і пневмонагнітачами по трубопроводах.

*Бетоновози* мають на відміну від звичайних самоскидів

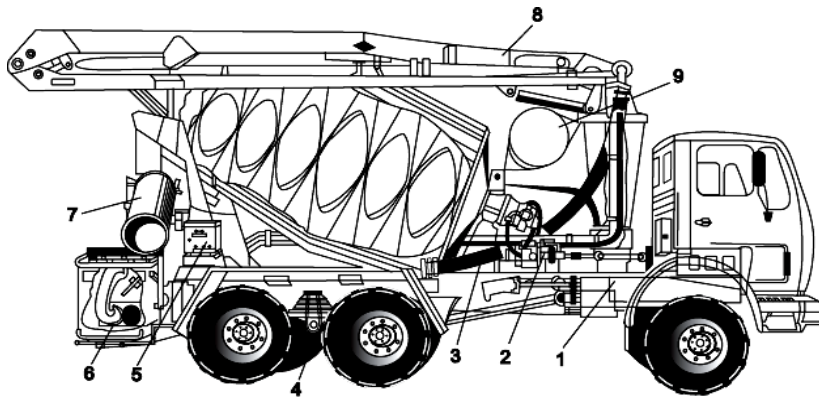
глибокий кузов з плавним сполученням бортів і днища. Конструкція кузова забезпечує мінімальне розшарування бетонної суміші, запобігає втраті її при транспортуванні, впливу опадів, зменшує залишок суміші на днищі. Застосування бетоновозів дозволяє вирішити задачу надійного перевезення готової бетонної суміші на відстань до 25...30 км. При великих відстанях необхідно враховувати зниження рухливості бетонної суміші, збільшуючи відповідно її значення при приготуванні. Розроблено конструкцію бетоновоза, що дозволяє транспортувати суміші при температурі 0...-10<sup>0</sup>С. При завантаженому кузові бетоновоза для запобігання промерзання бетону в порожнину, утворену стінкою кузова і зовнішньою обшивкою подають вихлопні газы.

*Автобетонозмішувачі* (рис. 4.7, 4.8) являють собою змішувальні барабани, змонтовані на шасі автомобіля або на напівпричепі. Застосування автобетонозмішувачів у порівнянні з бетоновозами дозволяє збільшити відстань транспортування без зниження якості бетонної суміші і забезпечувати її порціонне розвантаження і дозовану подачу безпосередньо в конструкцію. В автобетонозмішувачах можна перевозити як сухі, так і готові суміші. Під час перевезення сухої суміші на шляху проходження в барабан надходить вода з водяного бачка. Початок перемішування призначають не раніше чим за 5–10 хв до доставки на пункт призначення. Дальність транспортування сухої суміші складає 100 – 120 км. При перевезеннях на відстань до 80 – 100 км більш економічно транспортувати в автобетонозмішувачах готову суміш, збурюючи її, щоб уникнути розшарування, обертанням барабана. Вибираючи відповідну частоту обертання барабана і періодичність перемішування можна запобігти зменшенню рухливості суміші і досягти (при високій швидкості обертання) певний пластифікуючий ефект. Серійно випускають автобетонозмішувачі місткістю 2,5 – 9 м<sup>3</sup>. В зимових умовах необхідну температуру бетонної суміші можна підтримувати, розігрівуючи її парою безпосередньо в барабані автобетонозмішувача. З цією метою використовують пересувні парогенератори. Освоєно випуск автобетонозмішувачів, оснащених виносним стрічковим конвеєром.



**Рис. 4.7.** Автобетонозмішувач СБ-69Б:

- 1 – барабан; 2 – завантажувально-розвантажувальний пристрій;
- 3 – рама; 4 – шасі; 5 – контрольно-вимірювальні прилади; 6 – привод;
- 7 – муфта; 8 - 11 – механізми управління подачею палива з муфтою зчеплення, редуктором та декомпресором; 12 – бак для води

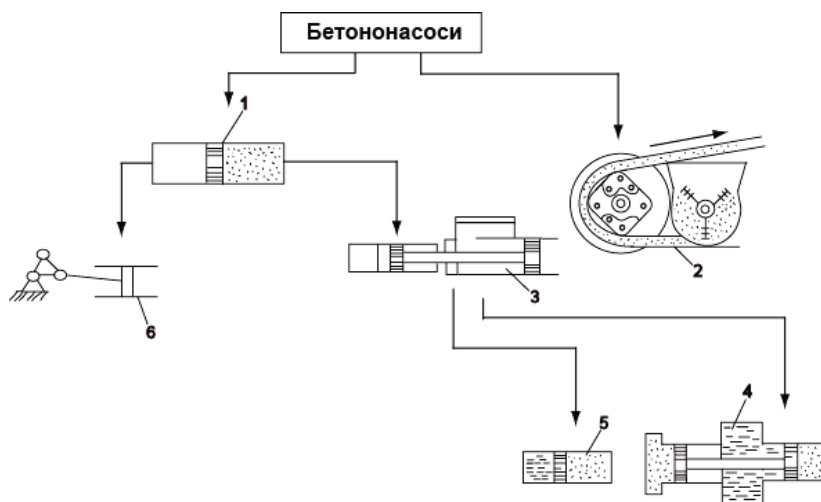


**Рис. 4.8.** Автобетононасос – автобетонозмішувач, змонтовані на спільному шасі:

- 1 – шасі автомобіля; 2 – гідропривод; 3 – гнучкий бетоновод;
- 4 – барабан автобетонозмішувача; 5 – пульт управління;
- 6 – бетононасос; 7 – роздатковий лоток автобетонозмішувача;
- 8 – маніпулятор (гнучка шарнірносполучена стріла); 9 – бак для води

Трубопровідний транспорт застосовують в основному для переміщення і розподілу бетонної суміші в межах споруджуваного об'єкта. Його перевагами є можливість безперевантажувальної доставки бетонної суміші безпосередньо до місця укладання без погіршення її якості в тому числі у важкодоступні для інших видів транспорту місця; можливість напірного бетонування, наприклад, різного роду стиків, замоноличування обробок тунелів, бетонування тонкостінних конструкцій; можливість бетонування масивних конструкцій без влаштування естакад і ін.

Подача бетонної суміші по трубопроводах здійснюється пневматично або бетононасосами (рис. 4.9). За допомогою пневмонагнітачів за рахунок стиснутого повітря бетонна суміш може транспортуватися по трубах-бетоноводах на відстань 200 – 400 м. Розроблені пневмоустановки для транспортування жорстких сумішей.



**Рис. 4.9.** Класифікація бетононасосів:

- 1 – поршневі бетононасоси; 2 – безпоршневі; 3 – з гідроприводом;
- 4 – з робочою рідиною – мастилом; 5 – з робочою рідиною – водою;
- 6 – з механічним приводом

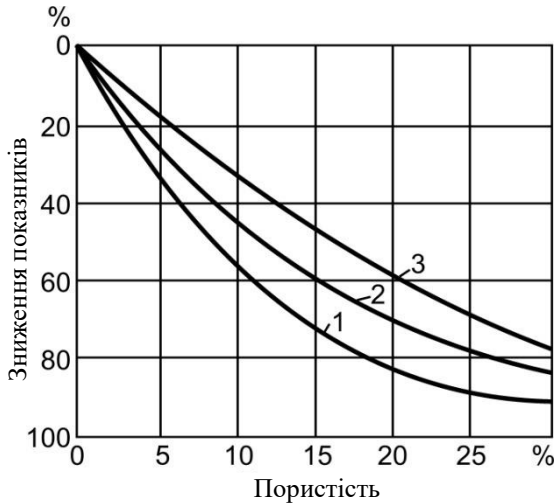
Для транспортування сухої суміші в зваженому стані використовують цемент-пушки, розчиномети та набризк-машини. Ці ж механізми використовують і для бетонування методом торкретування.

Бетононасос був запропонований в 1913 м С. Корнелем і М. Ки (США). Сучасні *бетононасоси* дозволяють транспортувати бетонну суміш на відстань до 1000 м і більше по горизонталі і до 300 м по вертикалі. Бетононасоси мають, як правило, гідравлічний привод, що забезпечує плавне регулювання об'ємної подачі і гарантований тиск на суміш. Бетонні суміші, що перекачуються по трубах, повинні мати підвищену зв'язність, здатність переміщуватися без розшарування та утворення пробок під дією зовнішніх сил. Це досягається достатнім об'ємом у суміші цементного тіста. Рекомендована рухливість перекачуваної бетонної суміші знаходиться в межах 5 – 15 см за осадкою конуса. Залежно від легкоукладальності бетонної суміші підбирають параметри бетононасосів. Ефективне застосування пластифікуючих та дисперсних мінеральних добавок.

При підборі складу бетонної суміші, призначеної для перекачування необхідно враховувати гранулометричний склад заповнювачів, співвідношення між об'ємом крупних заповнювачів і розчиновою частиною суміші, витрату і вид цементу та ін.

**Ущільнення бетонної суміші.** Досягнення необхідних якісних показників бетону можливе лише при ретельному ущільненні бетонних сумішей. При надходженні зі змішувача бетонна суміш має досить велику кількість повітряних пор. Жорсткі суміші утворюють нестійкі рихлі структури з великими повітряними порожнинами. Відношення для них об'єму повітряних пор до загального об'єму суміші досягає 40...50%. Пластичні суміші майже повністю водонасичені, вміст повітря в них може не перевищувати 5...20%. У середньому на кожний процент повітряних пор припадає 5...6% падіння міцності (рис. 4.10). Ці дані отримані для бетонів з вмістом цементного каменю 300...500 л/м<sup>3</sup>. При зниженні витрати цементу недоущільнення позначається на міцності ще помітніше і може

дійти до 7...8% на 1% повітря, що зберігається. Недоуцільнення негативно позначається і на ряді інших властивостей затверділого бетону.



**Рис. 4.10.** Вплив пористості бетонної суміші на міцність при стиску (1), міцність при розтягу (2), динамічний модуль пружності (3) (за даними О.А. Савінова)

Ступінь ущільнення бетонної суміші визначається коефіцієнтом ущільнення:

$$K_y = 1 - \Pi, \quad (4.2)$$

де  $\Pi$  – пористість ущільненої суміші.

Формулу (4.2) можна перетворити, знайшовши пористість з виразу:

$$\Pi = 1 - \frac{\rho_\phi}{\rho_p}, \quad (4.3)$$

де  $\rho_p$  – розрахункове значення густини бетонної суміші без врахування залишкового повітря;

$\rho_\phi$  – фактична густина суміші, що досягнена при ущільненні.

Тоді:

$$K_y = \frac{\rho_{\phi}}{\rho_p}. \quad (4.4)$$

При якісному формуванні виробів з рухливих бетонних сумішей досягається  $K_y \geq 0,98$ , для жорстких і дрібнозернистих сумішей  $K_y \geq 0,96$ .

Для бетонних сумішей, що знаходяться в статичному стані, характерна наявність сухого тертя між твердими компонентами. Тертя зростає зі зменшенням вмісту розчину в бетонній суміші, зменшенням кількості води замішування, застосуванні заповнювачів гострокутної форми. Сили внутрішнього тертя зменшуються до мінімуму при механічних впливах на бетонну суміш, припинення цих впливів призводить до відновлення внутрішнього тертя. Здатність до тиксотропного розрідження під впливом механічних дій характерна для багатьох колоїдних систем, утворення яких відбувається за рахунок сил Ван-дер-Ваальса, у тому числі і цементного тіста. При механічних впливах і особливо при вібруванні відбувається різке зниження опору зсуву і бетонна суміш починає відповідати законам гідростатики. Під дією градієнта швидкості, що розвивається при віброущільненні, в'язкість суміші знижується на кілька порядків.

Основні способи механічного впливу на бетонну суміш з метою її ущільнення і формування виробів можна розділити на 3 групи:

- статичні (пресування, прокатування, вакуумування),
- динамічні (вібрування, трамбування),
- комбіновані (вібропресування, вібровакуумування, віброштампування й ін.).

Динамічні впливи при ущільненні бетонної суміші використовуються з 1860 р., тоді при застосуванні жорстких сумішей почали використовувати трамбування. Найбільш поширеним способом ущільнення бетонних сумішей є *вібрування*. Вібрування бетонної суміші при зведенні великих об'єктів почали застосовувати за пропозицією Р. Фрейсине в 1917 р. Широко в будівництві вібрація стала застосовуватися з 30 років ХХ сторіччя.

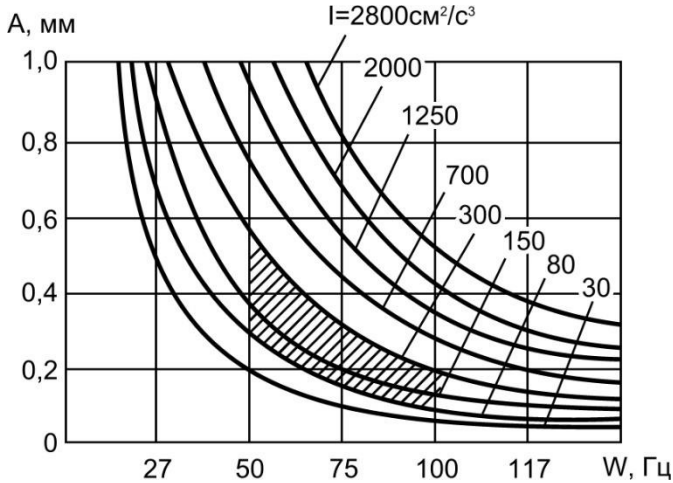


О.С. Десов і В.Н. Шмигальський запропонували як критерій ефективності вібрування параметр *інтенсивності коливань* (рис. 4.11):

$$I = A^2 W^3, \quad (4.5)$$

де  $A$  – амплітуда коливань;

$W$  – частота коливань.



**Рис. 4.11.** Залежність між амплітудами ( $A$ ) та частотами коливань ( $W$ ) різної інтенсивності ( $I$ ) вібрації

Зі зменшенням крупності заповнювача відповідно збільшується частота коливань. Так, наприклад, при крупності заповнювача 40 мм оптимальна частота дорівнює 38 Гц, при крупності зерен 20 мм – 50 Гц, а при максимальних розмірах зерен 10 мм – 100 Гц. Для ущільнення дрібнозернистих бетонних сумішей у густоармованих конструкціях доцільно застосовувати вібрування з частотою 100...133 Гц. Збільшення частоти коливань дозволяє в цілому ряді випадків зменшити тривалість вібрування і збільшити радіус дії вібратора.

Застосування різночастотних режимів вібрації дозволяє поліпшити ущільнення різного за крупністю заповнювача. Для кожної бетонної суміші при прийнятих параметрах коливань

існує оптимальна тривалість вібрування. При недостатній його тривалості спостерігається недоуцільнення бетону і зниження його міцності; занадто тривале вібрування не дає помітного підвищення щільності і міцності бетону і може викликати розшарування пластичних сумішей. Звичайно рекомендується тривалість вібрування приймати вдвічі більшою за показник жорсткості бетонної суміші, визначеної на стандартному лабораторному майданчику.

Сучасне віброуцільнююче устаткування має різноманітну конструкцію. Основними елементами вібромашин є інерційні вібробуджувачі дебалансного або самобалансного типу. Як робочі для віброобладнання звичайно застосовуються частоти 50 Гц і вище (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Характеристика основного віброобладнання для уцільнення бетонних сумішей

Віброобладнання	Частота, Гц	Амплітуда, мм	Прискорення, м/с <sup>2</sup>
Навісні електромеханічні і пневматичні вібратори	50...100	0,1...0,3	30...40
Глибинні і навісні електромеханічні вібратори	100...200 50...100	0,1...0,4 0,1...0,3	100...200 30...40
Вібромайданчики і вібромайданчики з привантаженням	50	0,3...0,7	30...40
Вібронасадки	50	0,4...0,7	30...40
Віброштампи	50	0,4...0,7	30...40

Для уцільнення рухливих сумішей із запобіганням їхньої розшаровуваності застосовують вібраційне устаткування, яке забезпечує ефективні низькочастотні симетричні режими зі зменшенням рівня шуму. Час уцільнення і показник розчиновідділення бетонних сумішей при низьких частотах у 1,5...2 рази менший в порівнянні з частотою 50 Гц. Для

ущільнення жорстких і наджорстких сумішей запропоновані ефективні низькочастотні ударно-вібраційні режими з частотою 15...30 Гц.

При низькочастотних асиметричних режимах більш інтенсивно виявляється ефект пластифікації бетонних сумішей добавками ПАР, істотно поліпшується якість поверхні виробів.

Поряд з динамічними для ущільнення сумішей застосовують і статичні силові впливи. Їхня величина, як правило, не перевищує 0,015...0,02 МПа. Привантаження у сполученні з вібруванням дозволяє істотно скорочувати тривалість формування жорстких бетонних сумішей, поліпшує рівномірність ущільнення, перешкоджає розшаруванню сумішей особливо на легких заповнювачах.

Для ущільнення наджорстких сумішей ефективно *вібропресування*, широко використовуване для виготовлення дрібноштучних виробів. Тиск ущільнення при вібропресуванні ( $Q$ ) залежить від тиску привантаження, товщини шару бетонної суміші і прискорення віброколивача:

$$Q = \rho_0 h + Q_1 + \rho_0 h A W^2 / g, \quad (4.6)$$

де  $\rho_0$  – густина бетонної суміші;

$h$  – висота виробу;

$Q_1$  – тиск привантаження на бетон;

$A W^2$  – прискорення при вібруванні;

$g$  – прискорення сили тяжіння.

Найбільш високі властивості вібропресованого бетону досягаються при оптимальному сполученні тиску, що пресує, і часу його витримування.

До різновидів вібропресування можна віднести *віброштампування* і *силовий вібропрокат*. При першому способі вібраційний вплив і статичний тиск створюються одним робочим органом – віброштампом, при другому вібрування комбінується з механічним тиском на бетон вібровалків прокатного стану.

*Вібропротяжна технологія* дозволяє виконувати безперервне безопалубне формування за допомогою спеціальних агрегатів, що включають віробункер, живильник і

віброформуєчий пристрій. Роль статичного тиску здійснює підпір суміші у віробункері та її опір при формоутворенні.

При *вібровакуумуванні* в бетонній суміші, попередньо ущільненої вібруванням, за допомогою вакуумних пристроїв створюється розрідження і, завдяки різниці тисків, з бетону відсмоктується повітря і надлишкова вода. При вакуумуванні також виникає пресуючий ефект від тиску вакуум-щита на поверхню оброблюваного шару бетонної суміші. Цей ефект підсилюють додатковим тиском (*вакуум-пресування*). При вакуумуванні відсмоктується звичайно 15...20% води замішування і до 80% повітря, яке утримується в бетонній суміші, що дає можливість підвищити міцність бетону на 40...60% через 2-3 дні і на 20...25% у 28-добовому віці. Глибина вакуумування бетону не перевищує 10...12 см, тому цей спосіб ефективний для тонкостінних конструкцій. Можливе застосування способу вібровакуумування для поліпшення якості поверхневого шару ("загартування") конструкцій.

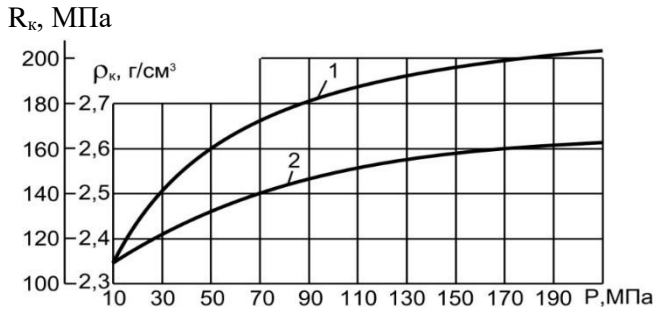
З безвібраційних способів ущільнення застосовують пресування, роликве формування, центрифугування і литтєве формування.

Спосіб *пресування* заснований на ущільненні бетонної суміші з виділенням вільної води при об'ємному обтисненні виробів, що формуються. При цьому доцільно застосовувати жорсткі суміші з малим водовмістом. Можливе використання і рухливих сумішей, коли статичним тиском іноді в сполученні з електроосмосом здійснюється відтиснення надлишку води. Видалення рідкої фази з бетонної суміші при пресуванні супроводжується фільтраційними процесами, які визначаються градієнтами тиску, розміром капілярів і ін.

Роль тиску полягає не тільки в зниженні водоцементного відношення (В/Ц) – основного параметру, що впливає на міцність бетону. Додатковий приріст міцності пресованих бетонів забезпечується за рахунок формування більш якісної структури і, зокрема, зменшення радіуса пор, усунення макродефектів контактної зони і дефектів, зв'язаних із седиментаційними процесами.

Інтенсивне зростання міцності цементного каменю

відбувається до пресуючого тиску 100 МПа, на практиці тиск пресування звичайно не перевищує 10...15МПа (рис. 4.12).



**Рис. 4.12.** Залежність міцності (1) і густини (2) цементного каменю від тиску пресування (P)

Високі фізико-механічні властивості бетону забезпечуються також при *термосилової технології*, заснованій на комплексному впливі зовнішнього тиску і нагрівання. При цьому бетон знаходиться під дією тиску і температури до набуття критичної міцності, здатної витримувати напруження, що виникають при знятті тиску.

При формуванні виробів трубчастого перетину ефективний спосіб розподілу й ущільнення бетонної суміші *центрифугуванням*. Відцентрова сила, яка розвивається у формі, пропорційна масі (m) і радіусу обертання (r), а також квадрату кутової швидкості (ω):

$$N = r\omega^2 m. \quad (4.7)$$

Ефективним способом зменшення витрати цементу (до 25...30%) і підвищення однорідності структури центрифугованого бетону є застосування *віброцентрифугування*. Віброцентрифугуванням можна формувати вироби кільцевого перерізу з бетонної суміші при початковому В/Ц цементного тіста близькому до його нормальній густоті (K<sub>н.г.</sub>), у той час як при пошаровому центрифугуванні воно складає (1,2...1,3)K<sub>н.г.</sub>

Віброцентрифугуванням вдається підвищити міцність бетону при одношаровому формуванні приблизно на таку ж величину як при тришаровому центрифугуванні.

До безвібраційних способів ущільнення відноситься бетонування *набризком*, при якому бетонна суміш ущільнюється під дією інтенсивних інерційних сил. Характерним для методу набризку є сполучення в єдиному виробничому процесі транспортування, укладання й ущільнення бетонної суміші при повній механізації всіх технологічних операцій. На практиці метод набризку реалізується із застосуванням пневматичних апаратів у вигляді "сухого" або "мокрого" торкретування і шприц-бетонування. "Сухе" *торкретування* полягає в нанесенні на поверхню під тиском стиснутого повітря одного або декількох шарів цементно-піщаного розчину, який подається по шлангу у вигляді сухої суміші, що заміщується водою при виході із сопла. "Мокре" торкретування (спосіб *пневмобетону*) відрізняється застосуванням готових цементно-піщаних розчинів, диспергованих в окремі гранули, що транспортуються в зваженому стані. *Шприц-бетонування* полягає у введенні в суху суміш крупного заповнювача – щебеню або гравію фракції до 25...30 мм, добавок-прискорювачів тужавлення і твердіння й ін. В останні роки шприц-бетон відомий більше під загальною назвою *набризк-бетон*.

Набризк-бетон відрізняється підвищеними показниками густини, міцності, водонепроникності. Набризк-бетонування є одним з найбільш надійних способів нанесення захисних покриттів на бетонні поверхні, що піддаються впливу агресивних середовищ і низьких температур.

Набризк-бетон у гідротехнічному будівництві застосовують при кріпленні гірничих виробок, укосів будівельних котлованів і берегових споруд, облицюванні каналів, басейнів та інш.

У сучасних умовах при масовому застосуванні суперпластифікуючих добавок усе більшого поширення набувають укладання та ущільнення литих та самоущільнювальних бетонних сумішей. *Литтєва технологія* передбачає застосування литих бетонних сумішей з осадкою

конуса (ОК) – 18...26 см, що укладаються під дією сил гравітації без або з застосуванням нетривалого віброущільнення. При підборі складів литого бетону для лабораторної оцінки зв'язності і нерозшаровуваності суміші може слугувати величина тангенса кута внутрішнього тертя:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{30 - \text{ОК}}{D_p / 2}, \quad (4.8)$$

де ОК – осадка нормального конуса;

$D_p$  – розплив нормального конуса.

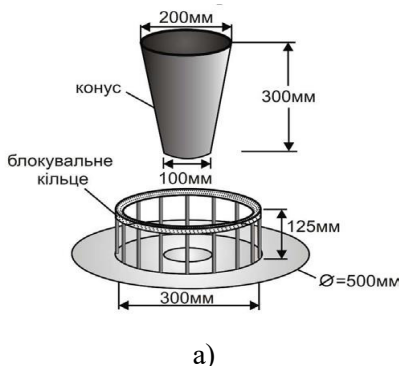
Цей показник для литої суміші, яка не розшаровується, повинний бути не менше 0,25. Застосування литих сумішей з добавками суперпластифікаторів дозволяє скоротити час ущільнення до 20...50% часу необхідного для ущільнення звичайних бетонів. При віброущільненні литих сумішей ефективно застосування вібромайданчиків з низькочастотними (до 25 Гц) режимами віброколивань, що знижують розшарування бетонних сумішей.

При використанні бетононасосів застосування литих сумішей із суперпластифікаторами знижує опір перекачуванню на 25...70%, підвищує коефіцієнт заповнення транспортних циліндрів на 5...6%. Це дозволяє знизити споживану бетононасосом потужність на 8...10% або збільшити напір у порівнянні з роботою на звичайних бетонних сумішах (ОК = 8...10 см).

В результаті проведених науково-дослідних робіт вченими Токійського університету в кінці 80-х років минулого століття був розроблений склад бетону, який був настільки рухомим, що не вимагав вібраційного ущільнення – *самоущільнюваний бетон* (SCC – self – compacting concrete).

Створення самоущільнюваного бетону (СУБ), перш за все, пов'язано з розробкою і впровадженням в практику нового покоління суперпластифікаторів на основі поліакрилатів і полікарбоксилатів.

Для бетонів, що самоущільнюються, рухомість визначається за розпливом конуса (рис. 4.13). Залежно від рухомості бетонних сумішей встановлюють класи СУБ та області їх застосування.



**Рис. 4.13.** Визначення розпливу конуса бетонних сумішей, які самоущільнюються: а – схеми і розміри лабораторного обладнання; б – бетонна суміш після завершення процесу розтікання

Таблиця 4.2

Класи СУБ за розпливом конуса

Клас	Діаметр розпливу конуса, мм	Область застосування
SF1	550-650	Неармовані або малоармовані бетонні конструкції – плити перекриттів, трубопроводи, облицювання тунелів, фундаментів.
SF2	660-750	Більшість звичайних споруд – колони, стіни.
SF3	760-850 (EN12350-8)	Вертикальні елементи, густоармовані конструкції складних форм, торкретування.

Для отримання максимального розпливу конуса бажано використовувати щебінь фракції 3...8 см.

СУБ класифікують також по в'язкості, схильності до закупорювання і стабільності до седиментації.

Самоущільнювальний бетон набирає популярність за рахунок високої технологічності, економії енерго- та працезатрат, можливість відмови від використання спеціального обладнання, підвищення швидкості виконання робіт.



## 5. БЕТОННІ СУМІШІ. ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

### 5.1. Легкоукладальність і водопотреба

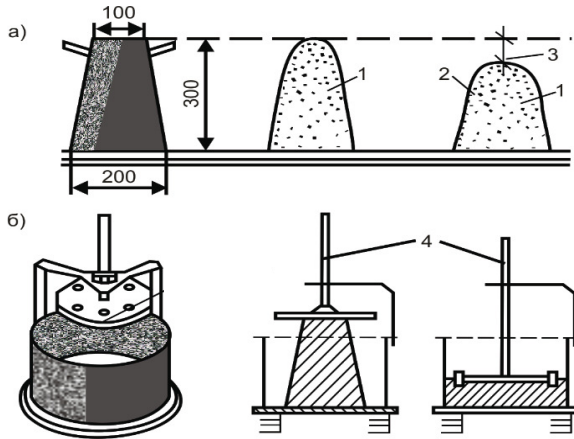
**Легкоукладальність.** До основних технологічних властивостей бетонних сумішей можна віднести їх легкоукладальність та здатність зберігати однорідність і не розшаровуватися. Під *легкоукладальністю* бетонних сумішей розуміють їхню здатність заповнювати форму або опалубку й ущільнюватися під впливом механічних зусиль.

У сучасній технології бетону терміном "легкоукладальність" поєднують звичайно показники рухливості і жорсткості бетонної суміші. Ці показники тісно зв'язані з реологічними властивостями бетонної суміші – в'язкістю і граничним напруженням зсуву. При достатній простоті вимірювання ці показники дозволяють оцінити зміну пластичності сумішей при зміні різних технологічних факторів, їхню відповідність умовам формування й ущільнення.

Мірою легкоукладальності рухливих сумішей є показник *осадки нормального конусу* (конусу Абрамса) в см зі свіжосформованої бетонної суміші (рис. 5.1). Для жорстких бетонних сумішей мірою легкоукладальності є показник жорсткості в с, який визначається часом, необхідним для розтікання і перетворення під дією вібрування в рівновеликий циліндр конуса з бетонної суміші (*метод Вебе*) (рис. 5.1). Залежно від показників рухливості за осадкою конуса і жорсткості по Вебе встановлені марки бетонної суміші за легкоукладальністю (табл. 5.1). Для самоущільнювальних сумішей легкоукладальність визначається розпливом конуса (рис. 4.13) залежно від якого встановлюються класи (табл. 4.2).

Поряд із зазначеними, запропонований ряд інших методів оцінки легкоукладальності бетонних сумішей, заснованих на вимірюванні розпливу конуса, часу витікання, пенетрації кульки, зануренні циліндричного тіла з напівкруглою голівкою, що падає з визначеної висоти й ін. Для оцінки легкоукладальності жорстких сумішей запропоновано вимірювати енергію,

необхідну для їх ущільнення, наприклад за потужністю, що споживається вібромайданчиком. Можна також використовувати метод вимірювання електропровідності бетонної суміші, що ущільнюється, динаміки ущільнення по зміні рівня суміші у посудині, визначення коефіцієнту ущільнення як відношення об'ємної маси суміші, ущільненої певним способом до її теоретичного значення та ін.



**Рис. 5.1.** Визначення легкоукладальності бетонної суміші (ОК та Ж):  
 а) прилад (конус) для визначення рухомості бетонної суміші:  
 1 – жорстка суміш; 2 – рухома суміш; 3 – осадка конусу;  
 б) прилад для визначення жорсткості бетонної суміші;  
 4 – схема випробування

Марки бетонної суміші за легкоукладальністю відповідно з EN 206-1:2000 (ДСТУ Б В.2.7-176:2008) наведені в табл. 5.2.

На показники легкоукладальності впливають тривалість і температура витримування суміші до укладання.

Зміна легкоукладальності бетонної суміші при її витримуванні обумовлена гідратацією цементу і зміною коагуляційної структури, поглинанням води заповнювачами і її випаруванням. Зміна легкоукладальності в часі залежить від мінералогічного складу і тонкості помелу цементу, виду і вмісту добавок, густини і вологості заповнювачів, водовмісту суміші.

Таблиця 5.1

## Марки бетонної суміші за легкоукладальністю

Марка	Норма легкоукладальності по показнику		
	жорсткості, с	рухливості, см	
		осадка конуса	розплив конуса
Надзорські суміші			
НЖ3	більш 100	-	-
НЖ2	51...100	-	-
НЖ1	50 і менш	-	-
Жорсткі суміші			
Ж4	31...60	-	-
Ж5	21...30	-	-
Ж2	11...20	-	-
Ж1	5...10	-	-
Рухливі суміші			
P1	4 і менш	1...4	-
P2	-	5...9	-
P3	-	10...15	-
P4	-	16...20	26...30...30
P5	-	21 і більш	31 і більш

Таблиця 5.2

## Марки бетонної суміші за EN 206-1:2000

(ДСТУ Б В.2.7-176:2008)

Марка	Показник	Марка	Показник
Осадка конуса, мм		Ступінь ущільнення	
S1	10...40	C0	$\geq 1,46$
S2	50...90	C1	1,45...1,26
S3	100...150	C2	1,25...1,11
S4	160...210	C3	1,10...1,04
S5	$\geq 220$	C4	$< 1,04$
Час Вебе, с		Діаметр розпливу конуса, мм	
V0	$\geq 31$	F1	$\leq 340$
V1	30...21	F2	350...410
V2	20...11	F3	420...480
V3	10...6	F4	490...550
V4	5...3	F5	560...620
		F6	$\geq 630$

При порівнюваних умовах темп втрати рухливості збільшується зі зменшенням В/Ц цементного тіста в бетонній суміші.

В.М. Пунагін показав, що рухливість бетонних сумішей у часі змінюється відповідно до формули:

$$S_{k\tau} = S_{k_0} (1 - k\tau), \quad (5.1)$$

де  $S_{k_0}$  – осадка конуса бетонної суміші, визначена безпосередньо після перемішування суміші ( $\tau = 0$ );

$S_{k\tau}$  – осадка конуса бетонної суміші через час  $\tau$  після замісу, см;

$k$  – коефіцієнт відносної зміни рухливості суміші, що залежить від температури навколишнього повітря.

Для бетонів на основі портландцементу:

$$k = t/32, \quad (5.2)$$

де  $t$  – середня температура повітря за час  $\tau$ .

Залежність (5.2) не враховує особливостей матеріалів, виду добавок, а також справедлива лише при  $k > 1$ . На зміні рухливості в часі повинні позначатися, очевидно, всі фактори, що визначають швидкість гідратації цементу. Крім В/Ц і температури, до числа таких факторів відносяться активність, дисперсність цементу й ін.

Для прогнозування можливої "життєздатності" бетонної суміші, тобто часу збереження її легкоукладальності запропоноване поняття "початку тужавлення бетонної суміші". *Початок тужавлення бетонної суміші* – умовне поняття, що означає період, протягом якого можливі технологічні операції по її переробці. Розрахунок періоду початку тужавлення бетонних сумішей рекомендується здійснювати за формулою:

$$H_\tau = \varphi_t \left[ \tau_{п.т} + 14,5 \left( \frac{В}{Ц} \right)_\phi - K_{н.г} \right], \quad (5.3)$$

де  $H_\tau$  – початок тужавлення бетонної суміші, год;

$\tau_{п.т}$  – початок тужавлення цементного тіста нормальної густоти ( $K_{н.г}$ ) при 20° С, год;

$(V/C)_ф$  – фактичне В/Ц з врахуванням води, адсорбованої заповнювачем;

$\phi_t$  – коефіцієнт, що враховує вплив температури.

Підвищення температури бетонної суміші, особливо вище  $30^\circ \text{C}$ , призводить до істотного збільшення темпу падіння рухливості. При підвищенні температури бетонної суміші на кожні  $5^\circ \text{C}$  в діапазоні  $20...35^\circ \text{C}$  водопотреба, необхідна для підтримки стабільної легкоукладальності, зростає на  $2...4\%$ . При збільшенні рухливості суміші підвищення водопотреби з ростом температури зростає.

Запропонована лінійна залежність для зв'язку осадки конуса (ОК) і вмісту "вільної" або "мобільної" води в бетонній суміші ( $V_c$ ):

$$OK = nV_b. \quad (5.4)$$

Загальний водовміст бетонної суміші складається з вільної води  $V_b$ , води, утримуваної цементом  $V_c$  і заповнювачами  $V_3$ :

$$V = V_b + V_c + V_3. \quad (5.5)$$

Для відшукування складових рівняння (5.5) пропонуються залежності:

$$V_b = \frac{1}{n}OK, \quad (5.6)$$

$$V_c = \alpha_c C / \rho_c, \quad (5.7)$$

де  $n$ ,  $\alpha_c$  і  $\alpha_3$  – емпіричні коефіцієнти.

$$V_3 = \alpha_3 (1000 - V - C / \rho_c). \quad (5.8)$$

Лінійні залежності, однак, справедливі лише у вузьких межах зміни показників легкоукладальності.

Нормальна густина цементного тіста істотно впливає на його реологічні властивості. Як правило, збільшення нормальної густоти цементу на  $1\%$  підвищує водопотребу бетонної суміші на  $1,5...3\%$ . Однак у ряді випадків навіть при однаковій нормальній

густоті водопотреба бетонних сумішей на різних портландцементях може відрізнитися на 5...10%, що можна пояснити додатковим впливом мінералогічного складу і тонкості помелу.

Вплив заповнювачів на легкоукладальність і водопотребу бетонних сумішей пов'язаний з їхньою питомою поверхнею і пустотністю. Обидва ці показники впливають на товщину прошарку цементного тіста на зернах заповнювачів – одного з головних фізичних параметрів, що визначають рухливість бетонної суміші.

Питома поверхня і пустотність заповнювачів визначаються їх крупністю, формою, зерновим складом, вмістом часток, що відмучуються. Питому поверхню заповнювачів можна розрахувати в залежності від їхнього зернового складу по довідкових таблицях і емпіричних формулах. Значення питомої поверхні суміші заповнювачів ( $U_3$ ) не залежить від розташування зерен у просторі. Його можна знайти з умови адитивності:

$$U_3 = U_{\text{щ}} + (U_n - U_{\text{щ}})r, \quad (5.9)$$

де  $U_n$  і  $U_{\text{щ}}$  – питомі поверхні дрібного і крупного заповнювачів;  
 $r$  – частка піску в суміші заповнювачів.

Відомий ряд рекомендацій, що зв'язують показники легкоукладальності з товщиною шару цементного тіста на зернах заповнювача ( $\delta$ ). Ю.М. Баженовим запропонований в якості структурного критерію рухливості бетонної суміші відношення величини  $\delta$  до загальної поверхні зерен заповнювача. Цей критерій справедливий лише при певній консистенції цементного тіста.

Найбільш ефективним способом підвищення легкоукладальності бетонних сумішей є введення пластифікуючих добавок ПАР. Добавки пластифікаторів істотно змінюють реологічні характеристики бетонних сумішей навіть при практично незруйнованій структурі, зменшують граничне напруження зсуву, ефективну в'язкість і модуль пружності зсуву.

При використанні ряду пластифікаторів перевага віддається використанню низькоалюмінатних цементів

(табл. 5.3). Збільшення в цементі вмісту алюмінатної фази викликає необхідність підвищення дози добавок.

Таблиця 5.3

Покращення легкоукладальності бетонних сумішей при введенні пластифікуючих добавок

Цемент	Рухливість бетонної суміші без добавки, см	Покращення легкоукладальності бетонної суміші, %, при введенні поширених пластифікуючих добавок
Швидкотверднучий або високоалюмінатний портландцемент (вміст С <sub>3</sub> А більше 10%)	0	120...160
	1...3	140...220
	4...6	160...240
Середньоалюмінатний портландцемент (вміст С <sub>3</sub> А від 6 до 10%)	0	140...180
	1...3	160...240
	4...6	180...260
Сульфатостійкий або низькоалюмінатний портландцемент (вміст С <sub>3</sub> А менше 6%)	0	160...200
	1...3	180...260
	4...6	200...280
Шлако- або пуцолановий портландцемент	0	180...220
	1...3	200...280
	4...6	220...300

**Водопотреба.** Вода вже в перші хвилини після замішування утримується структурними елементами бетонної суміші хімічними, фізико-хімічними і фізико-механічними зв'язками.

Хімічно, переважно в результаті іонної взаємодії, вода зв'язується в стехіометричних співвідношеннях з мінералами цементу в процесі гідратації. У початковий період твердіння (до 1 год) частина цементу, що прореагував, не перевищує 1% і відповідно кількість *хімічно зв'язаної води* є незначною.

*Фізико-хімічний зв'язок* води в бетонній суміші характерний в основному в адсорбційних плівках, утворених на поверхні твердих часток ненасиченими ван-дер-ваальсовими силами. Товщина адсорбційних водних плівок, що володіють властивостями псевдопружного твердого тіла, зменшується зі збільшенням дисперсності твердих часток. Так, для піску із середньою крупністю зерен 1,65 мм вона складає 0,285 мкм, 0,3 мм – 0,114 мкм. На зернах цементу і гідратних новоутворень товщина адсорбційного шару води складає від декількох одиниць до декількох тисяч молекулярних діаметрів. Незавжди підраховувати, знаючи питому поверхню заповнювачів, що кількість адсорбційно зв'язаної води, що зв'язується, у бетонній суміші, складає 2...4 л, тобто 1...3% усієї води замішування при використанні абсолютно сухих матеріалів.

Слідом за утворенням адсорбційних плівок в міру зволоження відбувається змочування часток цементу і заповнювачів водою. Змочування водою є властивістю гідрофільних твердих поверхонь і обумовлене поверхневим натягом. Поверхневий натяг твердих тіл визначають непрямими експериментальними методами або обчислюють теоретично на підставі сучасної електростатичної теорії кристалічної ґратки, розвинутої М. Борном і Я.І. Френкелем. Величина поверхневого натягу різних твердих тіл різна, але завжди значно більша чим рідин. Наприклад, розрахункові значення поверхневої енергії для MgO і CaCO<sub>3</sub> рівні відповідно  $1300 \cdot 10^{-7}$  і  $380 \cdot 10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup>, а експериментально визначені  $1200 \cdot 10^{-7}$  і  $230 \cdot 10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup>.

У порівнянні з адсорбційною *вода змочування* утримується значно слабкіше і включає дифузійний шар, що складається з молекул здатних пересуватися від однієї частин до іншої до встановлення рівноваги. Для дифузної води характерна менша швидкість пересування в порівнянні зі швидкістю підняття води в капілярах. Оптимальний відносний водовміст цементу (максимальна вологоємність), що умовно відповідає його повному змочуванню при звичайних умовах (без введення пластифікаторів, пресуючих впливів і ін.), відповідає приблизно  $K_{м.в} = 0,876 K_{н.г}$ , де  $K_{н.г}$  – водоцементне відношення цементного тіста нормальної густоти. При оптимальній вологості цементне



тісто характеризується постійними реологічними параметрами – граничним напруженням зсуву ( $\tau_0 = 1040$  Па) і коефіцієнтом в'язкості ( $K_B = 20$  Па·с), а також має сингулярну точку на кривій електроопору.

Не враховуючи незначну кількість гідратної води, можна записати рівняння водного балансу бетонної суміші:

$$V = XK_{н.г}Ц + K_{з.п}П + K_{з.щ}Щ + V_{погл} + V_B, \quad (5.10)$$

де  $V$  – водовміст, обумовлений необхідною легкоукладальністю суміші,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$Ц$ ,  $П$  і  $Щ$  – витрати відповідно цементу, піску і щебеню (гравію),  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$K_{н.г}$ ,  $K_{з.п}$ ,  $K_{з.щ}$  – нормальна густина (у долях одиниці) і коефіцієнти змочування дрібного і крупного заповнювачів;

$X = (V/Ц)_T / K_{н.г}$  – відносний показник зволоження цементного тіста в бетонній суміші ( $(V/Ц)_T$  – водоцементне відношення цементного тіста);

$V_{погл}$  – вода, поглинена порами заповнювачів,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$V_B$  – вода, механічно утримувана в поровому просторі між зернами заповнювачів, покритими цементним тістом,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Залежно від прийнятого способу формування і ступеня зволоження бетонна суміш може мати незв'язний (пухкоземлистий) або зв'язний стан, що характеризується різним ступенем пластичності. Для цементного тіста критерії зв'язності  $K_{м.в} = 0,876K_{н.г}$  і  $K_{г.р} = 1,65K_{н.г}$ , що характеризують відповідно максимальну вологоємність і водоутримуючу здатність, були запропоновані Й.М. Ахвердовим і підтверджені багатьма дослідниками. Ступінь зв'язності бетонних сумішей можна характеризувати граничним напруженням зсуву розчинової складової ( $\tau_{г.р}$ ) і коефіцієнтом внутрішнього тертя. Зв'язні бетонні (розчинні) суміші характеризуються  $\tau_{г.р} = (4..8) \cdot 10^2 \text{ Н}/\text{м}^2$ , коефіцієнт їх внутрішнього тертя  $f = \text{tg } \varphi$  ( $\varphi$  - кут внутрішнього тертя) коливається від 0,87 до 0,25.

Мінімально необхідна для сумішей, що формуються, кількість води орієнтовно дорівнює:

$$B_{\min} = X_{m.в.} K_{н.г} Ц + K_{з.п} П + K_{з.щ} Щ + B_{погл.}, \quad (5.11)$$

де  $X_{m.в.}$  – відносний вологовміст цементного тіста, що відповідає максимальній вологоємності цементу, при якій він практично не містить в комірках між обводненими частками капілярну вологу ( $X_{m.в} \leq 0,876$ ).

*Коефіцієнти змочування*  $K_{з.п}$  і  $K_{з.щ}$  характеризують питому кількість води, утримуваної відповідно дрібним і крупним заповнювачами в плівковому стані на своїй поверхні. Вони залежать від величини поверхневої енергії, крупності і рельєфу поверхні зерен заповнювачів.

Запропоновані різні методики визначення коефіцієнтів змочування – випробуванням безпосередньо зволжених піску і щебеню (гравію) або цементного розчину (бетону) з визначеною консистенцією цементного тіста. При деякій вологості піску стрибкоподібно змінюється електричний опір, що може свідчити про зменшення енергії зв'язку води з піском після його повного змочування.

За даними М.Г. Елбакідзе та Й.М. Ахвердова коефіцієнт змочування кварцового піску з врахуванням водопоглинання в залежності від крупності фракції коливається від 0,72 (5-2,5 мм) до 5,04% (0,3-0,15 мм), гранітного щебеню від 1,21 (5-10 мм) до 0,75% (40-60 мм). Змочування завершується рівновагою, при якому бетонна суміш набуває пухко-землистого стану. При цьому розрахункове  $B/C$  такої суміші (при  $B_{погл} = 0$ ) дорівнює:

$$(B / C)_6^0 = 0,876 K_{н.г} + \frac{K_{з.п} П + K_{з.щ} Щ}{C}. \quad (5.12)$$

Неважко підрахувати, що значення  $(B/C)_6^0 = 0,25...0,35$ .

При інтенсивних механічних впливах, наприклад, пресуванні або вібропресуванні, частина води змочування відтискається і  $(B/C)_6^0$  зменшується. Величина  $K_{м.у}$  при тиску 50 МПа знижується майже до 0,1. В гарячепресованих зразках цементного каменю Рой і Гоуда досягли  $B/C = 0,093$ . За даними

Й.М. Ахвердова об'єм води змочування на поверхні заповнювача в міру підвищення тиску пресування може наближатися до адсорбційного. Істотне зменшення  $K_{м.в}$  можна досягти і за рахунок застосування ефективних ПАР – суперпластифікаторів. Це доводить практика одержання в'язучих низької водопотреби (ВНВ) при спільному подрібненні клінкера і мінеральних добавок із введенням підвищених доз сухих суперпластифікаторів.

Третьою стадією зволоження після адсорбування і змочування є заповнення водою капілярно-пористого простору бетонної суміші. *Капілярна вода* так само, як і вода змочування, відноситься до фізико-механічної, але обумовлена капілярним тиском, що виникає в порах. Основна маса пор в бетонній суміші відноситься до макрокапілярів ( $r > 10^{-5}$  см), вони заповнюються водою при безпосередньому зіткненні з нею і віддають її в атмосфері, насиченій водяними парами. Для відносно великих пор (як правило більш  $10^{-3}$  см) капілярний тиск є незначним і поведінка води в них визначається в основному впливом сили тяжіння.

Цементне тісто насичується водою до деякого граничного В/Ц, що характеризує його водоутримуючу здатність. При подальшому збільшенні В/Ц механічно утримувана вода розсуває частки бетонної суміші, збільшуючи її рухливість, однак погіршуючи цілий ряд технічних властивостей бетону.

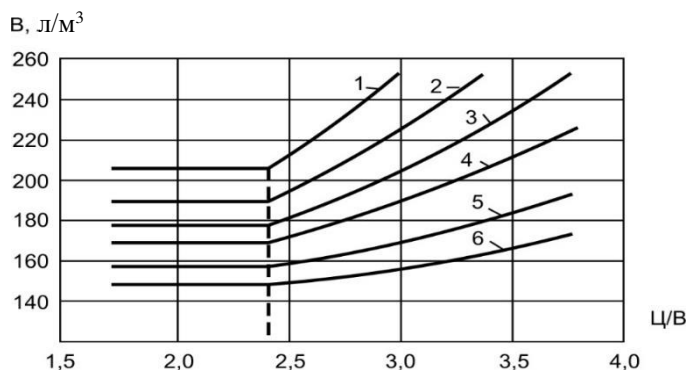
Приблизно одночасно (на початку 30-х років минулого сторіччя) і незалежно один від одного В.І. Сорокером та Ф.Р. Мак-Мілланом було встановлене *правило сталості водопотреби* (ПСВ). Ними було встановлено, що при незмінному водовмісті витрата цементу в межах  $200...400 \text{ кг/м}^3$  не впливає істотно на легкоукладальність бетонних сумішей. Спочатку ПСВ поширювали лише на малорухомі суміші, а потім воно знайшло експериментальне підтвердження для жорстких і рухливих бетонних сумішей. Ґрунтуючись на ПСВ, спочатку С.А. Міронов, а потім і інші автори запропонували графіки і таблиці для орієнтованого визначення водовмісту бетонних сумішей залежно від показників осадки конуса і жорсткості.

Визначаючи ПСВ, різні автори, разом з тим, приводять різні

значення граничних витрат цементу, у діапазоні яких це правило справедливе. Так, більшість авторів верхню межу застосовності ПСВ приймає  $400 \text{ кг/м}^3$ , В.П. Сізов вважає, що воно справедливе до  $350 \text{ кг/м}^3$ , а О.Є. Десов – до  $300 \text{ кг/м}^3$ . В міру збільшення жорсткості знижуються як нижня, так і верхня граничні витрати цементу. Навіть у межах однієї жорсткості верхня гранична витрата цементу коливається від  $280$  до  $380 \text{ кг/м}^3$ , а нижня від  $140$  до  $200 \text{ кг/м}^3$ .

Істотна стабілізація верхньої межі області ПСВ, і врахування особливостей застосовуваних цементів досягається при вираженні його через критичне  $V/C$  ( $(V/C)_{\text{кр}}$ ), яке рівне в середньому  $1,68K_{\text{н.г}}$ , де  $K_{\text{н.г}}$  –  $V/C$ , що відповідає нормальній густоті цементного тіста.

З фізичних позицій правило сталості водопотреби полягає в тому, що зі збільшенням  $C/V$  до деякого критичного значення ріст структурної в'язкості цементного тіста в бетонній суміші компенсується збільшенням його кількості і відповідно товщини шару цементного тіста на зернах заповнювача. За межами критичного  $C/V$  збільшення кількості "змазки" вже не компенсує прогресивно зростаючу в'язкість тіста (рис. 5.2).



**Рис. 5.2.** Вплив  $C/V$  на водопотребу бетонної суміші:

- 1...3 – суміші з осадкою конуса 10, 5, 2 см.
- 4...6 – суміші з жорсткістю 30, 60, 100 с (по технічному віскозиметру); щебінь 5...20 мм, пісок середньої крупності, цемент з нормальною густиною 26-27%

Близькість  $(В/Ц)_{кр}$  бетонних сумішей до  $В/Ц$ , яке характеризує граничну водоутримуючу здатність цементного тіста ( $K_{гр} \approx 1,65K_{н.г}$ ) не випадкова. Як показано Й.М. Ахвердовим, граничне напруження зсуву і в'язкість цементного тіста при  $(В/Ц)_{н.г} = 1,65K_{н.г}$  досягають мінімальних значень, при  $(В/Ц)_{н.г} < 1,65K_{н.г}$  вони різко зростають. Верхню межу ПСВ можна орієнтовно знайти за формулою:

$$(В/Ц)_{кр} = (1,35...1,65)K_{н.г} + \frac{K_{з.п} П + K_{з.щ} Щ}{Ц}, \quad (5.13)$$

де  $K_{з.п}$  і  $K_{з.щ}$  – коефіцієнти змочування дрібного і крупного заповнювачів;

$П$  і  $Щ$  – їхній вміст у бетонній суміші,  $кг/м^3$ .

У формулі (5.13) не враховується для спрощення вода, поглинена порами заповнювачів і така, що вступила в хімічну взаємодію з цементом.

Приймаючи для кварцового піску  $K_{з.п} = 0,015...0,025$ , гранітного щебеню  $K_{з.щ} = 0,005...0,01$  можна розрахувати, що для бетонів з витратою цементу  $Ц=300...500$   $кг/м^3$   $(В/Ц)_{кр}$  коливається від 0,37 до 0,45.

Введення заповнювачів істотно збільшує водопотребу бетонних сумішей, необхідну для досягнення заданої рухливості. Б.Г. Скрамтаєвим і Ю.М. Баженовим були запропоновані інтегральні кількісні показники *водопотреби заповнювачів*, визначені шляхом порівняльних випробувань цементного тіста, розчинової та бетонної суміші. Показники водопотреби дрібного і крупного заповнювачів показують кількість води, яку необхідно додати в цементне тісто на одиницю маси відповідно піску і щебеню (гравію), щоб одержати розчинову суміш складу 1:2 або бетонну суміш складу 1:2:3,5 з такою самою рухливістю через 30 хв після замішування як тісто нормальної густоти.

Врахування показників водопотреби дрібного ( $В_p$ ) і крупного ( $В_{щ}$ ) заповнювачів є зручним для порівняльної оцінки різних заповнювачів, оскільки на відміну від модуля крупності і питомої поверхні дозволяє узагальнено оцінити особливості піску і щебеню (гравію), що впливають на водовміст бетонних сумішей.

Водопотребу піску ( $V_n$ ) і щебеню ( $V_{ш}$ ) можна знайти за формулами:

$$V_n = \frac{(V/\Pi)_p - (V/\Pi)_ц}{2} 100 \%, \quad (5.14)$$

$$V_{ш} = \frac{(V/\Pi)_б - (V/\Pi)_p}{3,5} 100 \%, \quad (5.15)$$

де  $(V/\Pi)_ц$  –  $V/\Pi$  цементного тіста, при якому воно показує на струшуючому столику розплив конуса близько 170 мм, що приблизно відповідає його нормальній густоті;

$(V/\Pi)_p$  –  $V/\Pi$  розчинової суміші на досліджуваному піску, при якому вона має той же розплив конуса на струшуючому столику;

$(V/\Pi)_б$  –  $V/\Pi$  бетонної суміші, при якій досягається та ж рухливість (жорсткість), яку має розчинова суміш при  $(V/\Pi)_p$ .

Таблиця 5.4

Водопотреба бетонної суміші при використанні піску з водопотребою  $V_n=7\%$

Легкоукладальність		Витрати води, л/м <sup>3</sup> , при максимальній крупності заповнювачів, мм					
Осадка конуса, см	Жорсткість, с	гравій			щебінь		
		10	20	40	10	20	40
0	31	150	135	125	160	145	135
0	30...20	160	145	130	170	155	145
0	20...11	165	150	135	175	160	150
0	10...5	175	160	145	185	170	155
1...2	-	185	170	155	195	180	165
3...4	-	195	180	165	205	190	175
5...6	-	200	185	170	210	195	180
7...8	-	205	190	175	215	200	185
9...10	-	215	200	185	225	210	195

**Примітки:** 1. При збільшенні  $V_n$  на кожний відсоток витрата води підвищується на 5 л, а при зменшенні  $V_n$  скорочується відповідно на 5 л. 2. Якщо використовують дрібний пісок, то витрата води підвищується на 10 л, крупний – скорочується на 10 л. 3. При застосуванні пуцоланових цементів витрата води збільшується на 15...20 л.

У практиці проектування складів важких бетонів поруч із рекомендаціями щодо призначення витрати води з урахуванням водопотреби піску (табл. 5.4) широко використовується методика В.П. Сизова, що відрізняється, в основному, використанням більш розвиненої системи поправок (табл. 5.5) до базової витрати води (табл. 5.6), яка також залежить від осадки конуса або жорсткості та найбільшої крупності заповнювача. Базові значення витрати води за двома рекомендованими методиками при приведенні їх до одного виду і однакової водопотреби заповнювачів практично збігаються.

Таблиця 5.5

Поправки для коригування водопотреби бетонної суміші  
(за В.П. Сизовим)

№	Фактори, що враховуються	Поправка $\Delta B$ , л/м <sup>3</sup>
I. Порода і вид крупного заповнювача		
1.	Щебінь з метаморфічних та осадових порід з границею міцності 80...40 МПа	$\Delta B_1 = B_0 + (4 \dots 13)$
2.	Гірський гравій	$\Delta B_2 = B_0 - (5 \dots 10)$
3.	Морський та річковий гравій	$\Delta B_3 = B_0 - (9 \dots 15)$
4.	Щебінь з порід каменю з гладкою поверхнею зламу (діабаз, базальт та ін.)	$\Delta B_4 = B_0 - 3$
5.	Промитий щебінь	$\Delta B_5 = B_0 - 6$
6.	Вміст у щебені мулу та пилу у % більше 1% ( $X_1$ ) та частинок менше 5 мм ( $X_2$ ) понад 5%	$\Delta B_6' = B_0 + X_1$ $\Delta B_6'' = B_0 + 2X_2$
II. Крупність та забрудненість піску		
7.	Зміна модуля крупності піску на кожні 0,5 менше 3 ( $X_3$ )	$\Delta B_7 = B_0 + (3 \dots 5)X_3$
	більше 3 ( $X_4$ )	$\Delta B_7' = B_0 - (3 \dots 5)X_4$
8.	Пісок з гладкою добре обкатаною поверхнею	$\Delta B_8 = B_0 - 4$
9.	Пісок промитий	$\Delta B_9 = B_0 - 7$
10.	Збільшення вмісту в піску мулу та пилу на кожний % більше 3% ( $X_5$ )	$\Delta B_{10} = B_0 + 2X_5$

продовження табл.5.5

№	Фактори, що враховуються	Поправка $\Delta B$ , л/м <sup>3</sup>
III. Нормальна густина та витрата цементу		
11.	Зміна нормальної густини цементного тіста % більше 28% ( $X_6$ )	$\Delta B_{11}=B_0+4X_6$
	менше 28% ( $X_6$ )	$\Delta B'_{11}=B_0-4X_6$
12.	Зміна витрати цементу на кожні 10 кг понад 350 кг/м <sup>3</sup> ( $X_7$ )	$\Delta B_{12}=B_0+X_7$
IV. Температура бетонної суміші, °С		
13.	5	$\Delta B_{13}=B_0-5$
14.	10	$\Delta B_{13}=B_0-4$
15.	15	$\Delta B_{13}=B_0-2$
16.	25	$\Delta B_{13}=B_0+3$
17.	30	$\Delta B_{13}=B_0+7$
18.	35	$\Delta B_{13}=B_0+11$

Примітка:  $B_0$  – розрахункова витрата води без поправок.

Таблиця 5.6

Орієнтовна витрата води ( $B_0$ ) для бетонних сумішей на цементі  
НГ = 26...28% і піску з  $M_k = 2...2,5$

Легкоукладальність		Витрата води, л/м <sup>3</sup> при максимальній крупності заповнювача, мм			
Осадка конуса, см	Жорсткість, с	10	20	40	70
16...20	-	237	228	213	202
12...16	-	230	220	207	195
10...12	-	225	215	200	190
8...10	-	215	205	190	185
5...7	-	210	200	185	180
2...4	-	200	190	175	170
-	10...15	185	175	160	155
-	15...20	175	165	150	145
-	25...35	170	160	145	140
-	40...50	160	150	135	130



Ефективним способом зниження водопотреби бетонних сумішей без зміни показника легкоукладальності є введення пластифікуючих добавок і особливо суперпластифікаторів. На відміну від звичайних пластифікаторів, що знижують витрату води на 10...15%, суперпластифікатори дозволяють скоротити водопотребу на 20...30% і більше, та відповідно збільшувати міцність бетонів.

## 5.2. Розшаровуваність бетонних сумішей

Розшаровуваність бетонних сумішей може бути наслідком водо- і розчиновідділення.

Для забезпечення високої якості бетону бажано забезпечувати показники водо- та розчиновідділення в межах вказаних в табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Показники розшаровуваності бетонних сумішей

Марки бетонної суміші за легкоукладальністю	Водовідділення, %	Розчиновідділення для бетонів, %	
		важких	легких
НЖ1 – НЖ3	<0,1	2	1
Ж1 – Ж4	<0,2	3	4
П <sub>1</sub> – П <sub>2</sub>	<0,4	3	4
П <sub>3</sub> – П <sub>5</sub>	<0,8	4	6

*Водовідділення* – результат седиментаційного осадження твердих частинок бетонної суміші. Вода, що відділяється як найбільш легкий компонент суміші насичує верхні шари бетону, приводить до зниження його щільності і як наслідок міцності та довговічності бетону.

Попередження водовідділення досягають регулюванням складу бетону і гранулометрії заповнювачів, введенням мікронаповнювачів і пластифікаторів.

Водовідділення прямо пов'язане з водоутримуючою здатністю цементного тіста і бетонної суміші. Максимальне значення В/Ц, що характеризує водоутримуючу здатність цементного тіста в його статичному стані визначається

залежністю  $V/C = 1,65 K_{н.г}$ . При вібруванні граничне значення  $V/C$  знижується і складає  $V/C = (1,35...1,30) K_{н.г}$ .

Спробу розрахунку загальної кількості води, що утримується бетонною сумішшю ( $V_{ут}$ ) без істотного водовідділення, зробив І.М. Грушко. Ним запропоноване рівняння:

$$B_{ут} = 1,35K_{н.г} C + B_n П + 0,07S_{щ} , \quad (5.16)$$

де  $C$  і  $П$  – відповідно питомі витрати цементу і піску;  
 $S_{щ}$  – питома поверхня крупного заповнювача,  $m^2/m^3$ ;  
 $B_n$  – водопотреба піску.

Максимально можливу кількість утримуваної бетонною сумішшю води можна представити також у вигляді виразу:

$$B_{ут} = 1,35...1,65 K_{н.г} C + B_n П + B_{щ} Ш , \quad (5.17)$$

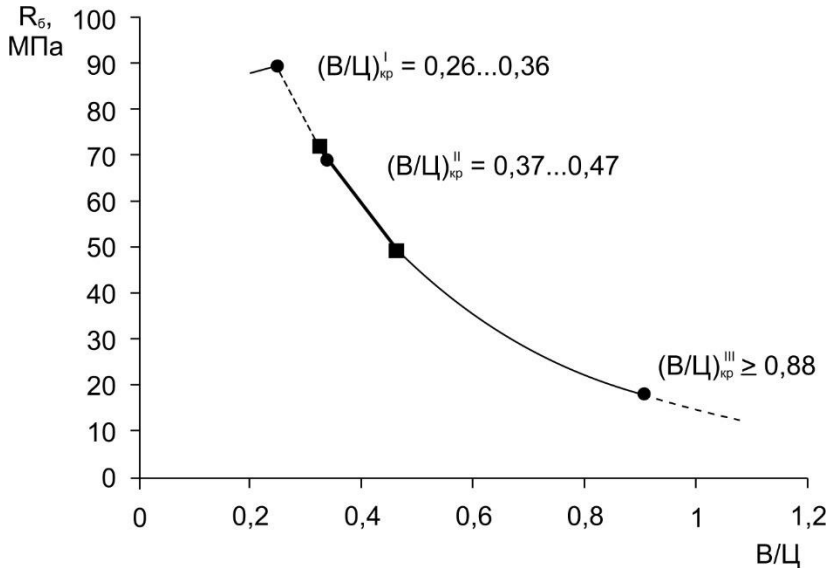
де  $B_n$  і  $B_{щ}$  – значення водопотреби дрібного і крупного заповнювачів бетону.

Аналіз водорозподілу в бетонних сумішах у міру їх зволоження дозволяє знайти характерні або *критичні значення*  $V/C$  (рис. 5.3).

При  $(V/C)_{кр}^I$  представляється можливим досягати максимально можливої міцності і екстремальних значень інших однозначно зв'язаних з міцністю властивостей бетону.

Верхній межі області сталості водопотреби відповідає  $(V/C)_{кр}^{II}$ . Орієнтовно можна вважати, що  $(V/C)_{кр}^{II} = 1,6...1,8 K_{н.г}$ .

Водоцементне відношення  $(V/C)_{кр}^{III} = V_{ут} / C$ , де  $V_{ут}$  – утримувана без водовідділення кількість води. У діапазоні  $(V/C)_{кр}^{II} - (V/C)_{кр}^{III}$  (рис. 5.3) справедливе правило сталості водопотреби і легкоукладальності бетонної суміші, що практично визначається лише водовмістом і не залежить від витрати цементу. При значеннях  $V/C > (V/C)_{кр}^{III}$  бетонні суміші розшаровуються, а властивості бетону суттєво погіршуються.



**Рис. 5.3.** Критичні В/Ц на кривій  $R_b = f(B/C)$ :

- Ц = 200...500 кг/м<sup>3</sup>; П = 600...800 кг/м<sup>3</sup>; ШЦ = 1250 кг/м<sup>3</sup>;  
 $K_{н.г} = 0,24$ ;  $K_{з.п} = 0,025$ ;  $K_{з.ш} = 0,008$ ;  $B_{п} = 0,14...0,16$ ;  $S_{ш} = 362 \text{ м}^2/\text{м}^3$
- – Ц = 500 кг/м<sup>3</sup>; П = 600 кг/м<sup>3</sup>;
  - – Ц = 200 кг/м<sup>3</sup>; П = 800 кг/м<sup>3</sup>

Введення пластифікуючих добавок, знижуючи загальне В/Ц відповідно знижує і водовідділення. Важливе значення при цьому має склад бетонної суміші. При витраті цементу менше ніж 400 кг/м<sup>3</sup> ефективно застосовувати водоутримуючі мінеральні добавки. Водовідділення також знижується при оптимальній гранулометрії піску. В литих бетонних сумішах, особливо неластифікованих, частку піску у суміші заповнювачів призначають більш високою ніж в звичайних бетонах.

Розшарування бетонних сумішей суттєво залежить від повітрявтягування. Суперпластифікатори сприяють втягуванню деякої кількості повітря, однак низька в'язкість сумішей може викликати значні втрати втягнутого повітря в процесі транспортування і укладки. Досягнути необхідного повітрявтягування у цьому разі можна при додатковому введенні повітрявтягувальної добавки.

При транспортуванні і укладанні бетонної суміші розшарування можливе також в результаті *розчиновідділення*.

Розчиновідділення характеризується відношенням різниці маси розчину у верхній і нижній частинах свіжесформованого зразка бетону до їх загальної маси.

Імовірність розшарування бетонної суміші зменшується зі збільшенням опору зсуву розчинової складової –  $\tau_{гр}$  відносно поверхні зерен крупного заповнювача. Розшарування бетонної суміші не відбувається, якщо:

$$a_1 \leq a_2, \quad (5.18)$$

де  $a_2$  і  $a_1$  – сили, що відповідно переміщують і перешкоджають переміщенню зерна крупного заповнювача вниз.

За І.М. Грушко:

$$\tau_{zp} \geq \frac{D(\rho_z - \rho_p)}{6K_\phi}, \quad (5.19)$$

де  $D$  – усереднений діаметр зерна щебеню;

$\rho_z$  і  $\rho_p$  – густина зерен щебеню і розчину;

$K_\phi$  – коефіцієнт форми зерен щебеню.

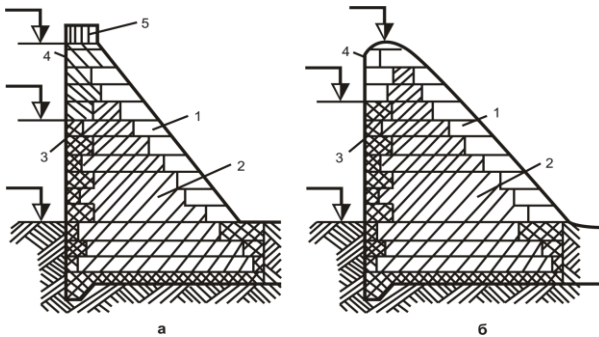
Відповідно до формули (5.19) у статичному стані при крупності зерен гранітного щебеню 40 мм розшарування не відбудеться, якщо  $\tau_{гр} \geq 0,6 \cdot 10^2$  МПа, а при крупності щебеню 20 мм, якщо  $\tau_{гр} \geq 0,3 \cdot 10^2$  МПа.

В умовах транспортування і ущільнення бетонна суміш розшарується якщо  $\tau_{гр} < (4...8) \cdot 10^2$  Па.

Мінімізація розчиновідділення особливо важлива при ущільненні бетонної суміші вібруванням. Маючи недостатню зв'язність суміші з підвищеним розчиновідділенням легко розшаровуються під дією вібрації. Крупний заповнювач як найбільш важкий компонент суміші при вібруванні переміщується вниз і віджимає розчинову частину вгору.

## 6. ГІДРОТЕХНІЧНИЙ БЕТОН ДЛЯ МАСИВНИХ СПОРУД

До масивних відносяться бетонні і залізобетонні конструкції та споруди, розмір яких у поперечнику може досягати декількох метрів. Найбільш характерними масивними спорудами є бетонні греблі. Наприклад, гравітаційні бетонні греблі можуть мати розмір у поперечному напрямку кілька десятків метрів. До масивних бетонних конструкцій відносяться також конструкції шлюзів, пірсів, мостові опори, підпірні стіни, фундаменти під енергетичне і технологічне встаткування та ін.



**Рис. 6.1.** Схеми гребель: а – глуха гребля; б – водозливна гребля;  
1 – бетон зовнішньої зони; 2 – внутрішньої зони; 3 – підводний;  
4 – зони змінного рівня; 5 – надводний

У греблях і їх елементах залежно від умов роботи бетону в експлуатаційний період розрізняють чотири зони (рис. 6.1):

I) зовнішню, яка перебуває під атмосферним впливом, не омивається водою;

II) змінного рівня води (зовнішні частини гребель у межах коливань рівнів води у верхньому і нижньому б'єфах, а також частини й елементи гребель, що періодично піддаються дії потоку води: водоскиди, водоспуски, водовипуски, водобійні пристрої та ін.);

III) підводну (зовнішні, а також, що примикають до основи частини гребель, розташовані нижче мінімальних експлуатаційних рівнів води верхнього та нижнього б'єфів);

IV) внутрішню (частини гребель, обмежені зонами I...III).

До бетону різних зон бетонних і залізобетонних гребель всіх класів пред'являють вимоги, наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Вимоги до бетону, бетонних і залізобетонних гребель

Вимоги	Зони гребель	
	бетонних	залізобетонних
Міцність на стиск	I,II,III,IV	I,II,III
Міцність на розтяг	I,II,III	I,II,III
Водонепроникність	II,III	II,III
Морозостійкість	I,II	I,II
Гранична розтяжність	I,II,III,IV	не пред'являється
Стійкість проти агресивного впливу води	II,III	II,III
Опір стиранню потоком води при наявності наносів	II	II
Стійкість проти кавітації при швидкості води 15 м/с і більше	II	II
Тепловиділення при твердненні бетону	I,II,III,IV	Пред'являється при відповідному обґрунтуванні

Конкретні показники тих чи інших властивостей бетону, що відповідають вимогам, наведеним у табл. 6.1, призначають диференційовано відповідно до конструктивних особливостей споруд і фактичних умов роботи різних зон.

### 6.1. Міцність бетону на стиск і розтяг

Однієї з основних якісних характеристик бетону є його *міцність на стиск*. Термін тверднення (вік) бетону, що відповідає його класам за міцністю на стиск, осьовий розтяг і марці за водонепроникністю приймається, як правило, для конструкцій річкових гідротехнічних споруд 180 діб, для збірних і монолітних конструкцій морських і річкових портових споруд 28 діб. Строк тверднення бетону, що відповідає його проектній марці за морозостійкістю приймається 28 діб, для масивних конструкцій,

що зведені у теплій опалубці, 60 діб. Коли відомі строки фактичного напруження конструкцій, способи їх зведення, умови тверднення бетону, вид та якість використаного цементу, то допускається встановлювати клас бетону в іншому віці.

Зміна міцності бетону в часі так само, як зміна його інших технічних властивостей залежить від мінералогічного і речовинного складу цементу, структури і складу бетону, умов його тверднення. Підвищення міцності бетону в часі обумовлено зниженням його пористості, збільшенням ступеня гідратації цементу і проходженням ряду процесів, що призводять до збільшення як когезії частинок цементу між собою, так і адгезії їх до заповнювачів бетону.

При сприятливих температурно-вологісних умовах міцність бетону росте протягом багатьох років (рис. 6.2). Випробуванням, наприклад, кернів, вибурених з акведуків насосних станцій каналу ім. Москви, побудованих в 1937 р., установили, що міцність бетону через 35 років зросла приблизно в 3,5 рази. Випробування кернів, вибурених із греблі Земо-Авчальської ГЕС (Грузія) після 40 років експлуатації, показало, що міцність бетону водозливної греблі зросла в 2,6 рази, а «бичків» в 2,7 рази. Подібні результати отримані при випробуванні властивостей бетону гідротехнічних споруд у багатьох країнах.



**Рис. 6.2.** Наростання міцності бетону в часі у вологій (1) і сухій (2) середовищі

Інтенсивність росту міцності бетону за хіміко-мінералогічним складом суттєво відрізняється для бетонів на цементах різних груп. Найбільш інтенсивне наростання міцності після місячного віку виявляють бетони на білітових портландцементях, значно менш інтенсивне наростання міцності характерне для бетонів на алітових цементах і найменший приріст міцності показують бетони на алюмініатних цементах (табл. 6.2). Як видно з табл. 6.2, інтенсивність росту міцності зменшується по мірі збільшення її вихідного значення.

Таблиця 6.2

Коефіцієнти наростання міцності бетону  
на портландцементях різного мінералогічного складу

Вік бетонів на цементях	Білітовому		Алітовому		Алюмініатному	
	Вихідна міцність, МПа					
	12	15	21	30	34	47,5
1 міс.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
3 міс.	1,5	1,25	1,3	1,25	1,1	1,14
6 міс.	1,8	1,4	1,41	1,37	1,3	1,18
1 рік	2,0	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3
2 роки	2,3	1,8	1,7	1,66	1,47	1,5
3 роки	2,5	1,9	1,8	1,75	1,56	1,6
5 років	2,7	2,0	1,9	1,87	1,6	1,7
10 років	2,7	2,2	2,0	2,0	-	-
20 років	3,0	-	2,0	2,1	-	-
30 років	3,3	-	-	-	-	-

Для орієнтовного прогнозування росту міцності бетону в часі може бути використано лінійне відношення між міцністю  $f_{cm_n}$  і логарифмом тривалості тверднення  $n$  при  $n \geq 3$  доби і  $t=15...20^\circ\text{C}$  (формула Б. Г. Скрамтаєва):

$$f_{cm_n} = f_{cm_{28}} \frac{\lg n}{\lg 28} \quad (6.1)$$



Розрахункові коефіцієнти росту міцності бетону, отримані за формулою (6.1), наведені нижче:

доба	3	7	14	28	90	180	365
коефіцієнти	1,33	0,58	0,79	1,0	1,35	1,56	1,77

О.В. Саталкін, ґрунтуючись на логарифмічному законі наростання міцності бетону, запропонував модифікувати формулу (6.1) і враховувати два значення міцності бетону  $f_{cmn_1}$  і  $f_{cmn_2}$  у два терміни тверднення:

$$f_{cmn} = f_{cmn_1} + \frac{(f_{cmn_2} - f_{cmn_1})(\lg n - \lg n_1)}{\lg n_2 - \lg n_1} \quad (6.2)$$

У формулі (6.2) усувається допущення, що міцність бетону у віці однієї доби дорівнює нулю ( $\lg 1 = 0$ ) і представляється можливість врахувати вплив особливостей цементу й інших факторів на швидкість тверднення бетону.

Для бетонів на основі сучасних цементів логарифмічна залежність (6.1) дає, як правило, занижені показники міцності для початкових термінів тверднення (до 28 діб) і завищені для пізніх термінів тверднення.

Для попередніх розрахунків зміни міцності бетону в часі бажано використовувати узагальнені емпіричні коефіцієнти, диференційовані для різних цементів (табл. 6.3).

Зростання міцності бетону значною мірою визначається температурно-вологісними умовами тверднення (рис. 6.3). Достатня вологість бетону необхідна для нормального протікання процесів гідратації та структуроутворення. Разом з тим, при водонасиченні міцність бетону як і будь-яких інших кам'яних матеріалів знижується.

Таблиця 6.3

Коефіцієнти зростання міцності бетону  
на основі різних цементів

Вид цементу	Коефіцієнти зростання міцності бетону у віці, діб			
	7	28	90	180
Портландцементи:				
Алітові	0,65-0,75	1,00	1,10-1,25	1,30-1,40
Звичайні	0,60-0,70	1,0	1,15-1,35	1,30-1,50
Белітові	0,55-0,65	1,00	1,30-1,40	1,45-1,60
Шлакопортландцементи на:				
кислих шлаках	0,40-0,50	1,00	1,40-1,65	1,60-2,00
основних шлаках	0,40-0,50	1,00	1,35-1,65	1,55-1,90
Пуцоланові портландцементи:				
з добавкою туфу	0,50-0,60	1,00	1,45-1,75	1,55-1,90
з добавкою опоки	0,50-0,60	1,00	1,25-1,55	1,40-1,65

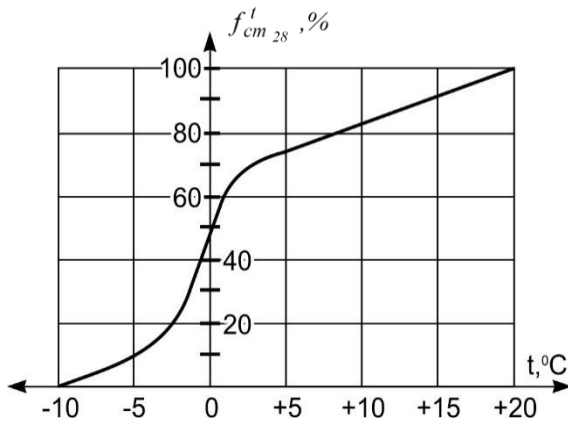


Рис. 6.3. Зростання міцності бетону протягом 28 діб при температурах от +20 до -10°C (в % от  $R_{28}$ )

К.А. Мальцов запропонував лінійну залежність міцності бетону при стиску і розтягу від вологості:

$$f_{cm_w} = f_{cm_{w_0}} \left( 1 - \frac{W - W_0}{a} \right), \quad (6.3)$$

де  $f_{cm_w}$  і  $f_{cm_{w_0}}$  – міцність бетону при вологості рівної відповідно  $W$  і  $W_0$ ;

$a$  – емпіричний коефіцієнт, який залежить від складу бетону, його структурних характеристик та інших факторів.

Зі зниженням температури й особливо наближенням її до  $0^\circ\text{C}$  тверднення бетону різко сповільнюється, що особливо помітно в ранньому віці.

Класи бетону за міцністю на стиск і розтяг призначаються на підставі відповідних розрахункових опорів, що враховують максимально можливі напруження. У бетоні перших гравітаційних гребель, побудованих в 20-х...30-х роках минулого сторіччя розрахункові стискаючі напруження зазвичай не перевищували 1...1,5 МПа. Наприклад, для греблі Дніпровської ГЕС висотою 62 м у бетоні низової грані вони становили 0,98 МПа. По мірі збільшення висоти гравітаційних гребель збільшуються і максимальні стискаючі напруження, хоча проектна міцність бетону, з якою в значній мірі пов'язані ряд інших необхідних його властивостей, залишається в кілька разів вище розрахункової. Так, для греблі Братської ГЕС при висоті 125 м максимальні розрахункові напруження не перевищили 3,5 МПа, марка бетону була прийнята в 180 добовому віці М200 (С12/15). Для гравітаційних гребель, запроєктованих у США висотою близько 200 м рівень максимальних стискаючих напружень становить 5...6 МПа при марочній міцності приблизно в 5 разів вище.

Значно повніше використовується міцність бетону в аркових і арково-гравітаційних греблях, де максимальні розрахункові напруження досягають 10 МПа і більше (табл. 6.4). При будівництві таких гребель міцність бетону піднімається до 30...50 МПа (табл. 6.4).

Таблиця 6.4

Максимальні розрахункові напруження і марочна міцність бетону для деяких аркових та арково-гравітаційних гребель

Країна	Гребля	Тип греблі та її висота, м	Максимальні розрахункові напруження, МПа	Проектний вік бетону, діб	Марочна міцність бетону, МПа
Росія	Чиркійська	аркова, 231	8,5	180	30
	Саянська	арково-гравітаційна, 240	9,5	180	30
Грузія	Інгурська	аркова, 275,5	10	180	35
Італія	Вайонт	аркова, 265,5	6,8	90	45

Для бетону зовнішніх зон масивних гідротехнічних споруд, що працює під впливом розтягувальних напружень, поряд із міцністю на стиск ( $f_{cm}$ ) призначають також класи за міцністю на осьовий розтяг ( $f_{ct}$ ).

Із підвищенням класу бетону за міцністю на стиск зростає і його міцність при розтягу, однак не так інтенсивно як при стиску. Так, якщо для бетону класу С8/10  $f_{ct} \approx 0,1f_{cm}$ , то для бетону класу С40/50  $f_{ct} \approx 0,05f_{cm}$ .

Величина співвідношення міцності на розтяг і стиск зі збільшенням віку бетону зменшується. За даними В.В. Стольнікова при переході від 3 до 90 діб ця величина зменшується майже в 2 рази. З подальшим збільшенням віку її зниження поступово сповільнюється. Цементи з відносно високим вмістом трикальцієвого силікату мають найбільш низьке співвідношення міцності на розтяг до міцності на стиск у віці 7...28 діб.

Відношення  $f_{ct}/f_{cm}$  є одним з показників тріщиностійкості бетону.

## 6.2. Тріщиностійкість

Тріщиностійкість масивного гідротехнічного бетону залежить крім співвідношення міцності на стиск до міцності на розтяг також від його граничної розтяжності й усадки.

Для важких бетонів величина *граничної розтяжності* ( $\varepsilon_{гр}$ ) (граничної деформації при розтягу) коливається зазвичай від 0,7 до  $2,5 \cdot 10^{-4}$ . Для орієнтовних розрахунків приймають в середньому  $\varepsilon_{гр} \approx 1 \cdot 10^{-4}$ . Граничну розтяжність бетону для внутрішніх зон масивних споруд приймають зазвичай не менше  $5 \cdot 10^{-5}$ , для зовнішніх зон не менше  $7 \cdot 10^{-5}$ . З урахуванням особливостей споруд, кліматичних умов і методів робіт можуть бути встановлені й більш високі вимоги до бетону за величиною граничної розтяжності. Наприклад, для бетону греблі Зейської ГЕС пред'являлись наступні вимоги:  $\varepsilon_{гр}$  не менше  $7 \cdot 10^{-5}$  для бетону внутрішніх зон і не менше  $9 \cdot 10^{-5}$  для зовнішніх зон.

Безпосередні визначення граничної розтяжності бетону пов'язані з досить складними випробуваннями і не завжди дають стабільні результати. Цей параметр якості бетону близький до т.зв. умовної граничної розтяжності (*умовної деформативності*):

$$\varepsilon_y = \frac{f_{ctm}}{E_{дин}}, \quad (6.4)$$

де  $f_{ctm}$  – міцність при розтягу, яка визначена способом розколювання зразків-кубів або циліндрів;

$E_{дин}$  – динамічний модуль пружності.

Для забезпечення тріщиностійкості бетону необхідне виконання умови:

$$\sigma_p \leq \frac{\varepsilon_{gp} E_y}{K_3}, \quad (6.5)$$

де  $\sigma_p$  – розтягувальне напруження;

$E_y$  – модуль пружності бетону;

$K_3$  – коефіцієнт запасу ( $K_3 \approx 1,2 \dots 2$ ).

Гранична розтяжність бетону покращується зі збільшенням міцності бетону, при застосуванні цементів без мінеральних добавок, введенні у бетонну суміш ПАР і полімерних добавок.

Однією з властивостей бетону, пов'язаних з його тріщиностійкістю є *усадка*. Хоча усадочні тріщини в масивному гідротехнічному бетоні поширюються вглиб споруди на відстань 0,5...1 см і менше, однак внаслідок дії морозу та інших негативних факторів вони можуть спричинити більш значні руйнування. Усадка бетонів коливається в середньому від 0,2 до 0,4 мм/м до річного віку, вона змінюється приблизно пропорційно логарифму часу й особливо швидко збільшується в перші 28 діб. Для гідротехнічного бетону при відносній вологості 60% і температурі 18°C у віці 28 діб лінійна усадка допускається зазвичай не більше 0,3 мм/м ( $0,3 \cdot 10^{-3}$ ), а в 180 діб – 0,7 мм/м ( $0,7 \cdot 10^{-3}$ ).

Усадка бетону при зміні його вологості проходить у дві стадії:

- 1) коли бетонна суміш знаходиться в пластичному стані (пластична усадка);
- 2) по мірі тверднення і висихання бетону.

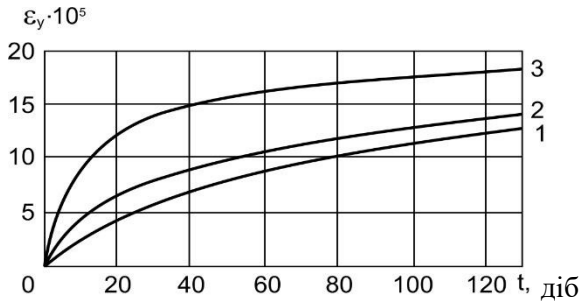
*Пластична або первинна усадка* бетону відбувається при виділенні води з бетонної суміші в результаті седиментаційного осадження твердих частинок, а також поглинання вологи опалубкою та випаровування.

Деформації інтенсивно розвиваються відразу після укладання і ущільнення бетонної суміші та зникають уже через 30...90 хв. Величина пластичної усадки залежить від складу бетонної суміші і зменшується при зниженні водовмісту бетонної суміші, витрати цементного тіста, застосуванні тонкомелених водоутримувальних добавок, створенні жорсткого “скелету” крупного заповнювача. В умовах сухого жаркого клімату з підвищенням температури бетонної суміші – водопотреба збільшується. При неналежному вологому забезпеченні і підвищеній швидкості випаровування води створюються умови для пластичного тріщиноутворення. Пластична усадка в 5...10 разів перевищує усадку, яка розвивається після тужавлення цементу. Вона підсилюється зі збільшенням модуля поверхні

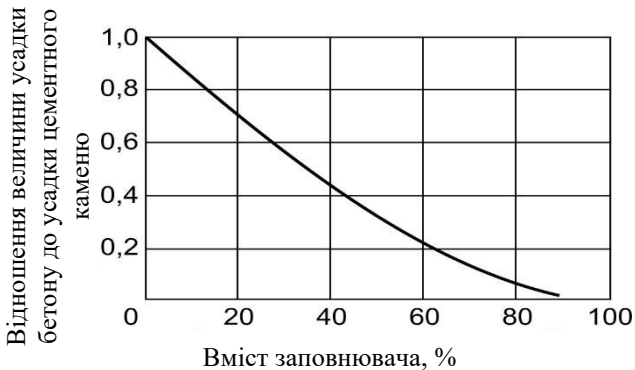
конструкцій, зменшенням ступеня армування.

На поведінку бетону в конструкціях у значній мірі впливає вологісна чи гідравлічна усадка, яка характерна по мірі висихання бетону.

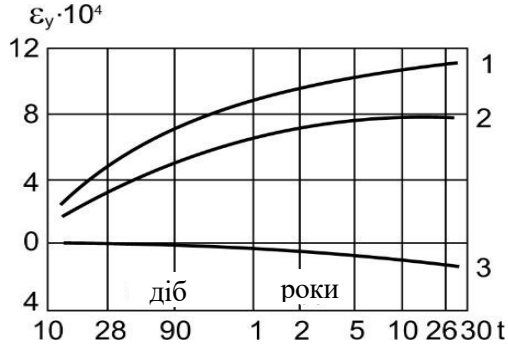
На усадку цементного каменю і бетону впливають численні фактори: тривалість тверднення, хіміко-мінералогічний склад, питома поверхня та витрата цементу, вміст заповнювача, гіпсу і лугів, водоцементне відношення та ін. (рис. 6.4...6.7).



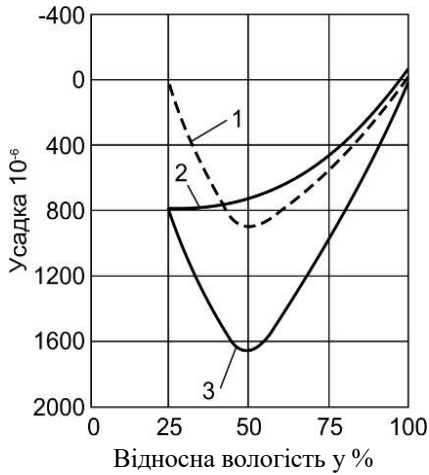
**Рис. 6.4.** Вплив витрати цементу і водоцементного відношення на усадку бетону трьох складів: 1 – Ц=350 кг/м<sup>3</sup>, В/Ц=0,45; 2 – Ц=450 кг/м<sup>3</sup>, В/Ц=0,35; 3 – Ц=450 кг/м<sup>3</sup>, В/Ц=0,45



**Рис. 6.5.** Вплив вмісту заповнювача в бетоні (за об'ємом) на величину відношення усадки бетону до усадки цементного каменю



**Рис. 6.6.** Усадка бетону при різній відносній вологості повітря:  
1 –  $W = 50\%$ ; 2 –  $W = 70\%$ ; 3 –  $W = 100\%$



**Рис. 6.7.** Усадка при висиханні та усадка при карбонізації бетону при різній вологості повітря:  
1 – при карбонізації; 2 – при висиханні; 3 – сумарна

Враховуючи те, що хіміко-мінералогічний склад і дисперсність сучасних заводських портландцементів змінюються порівняно у вузькій області і вирішальний вплив має опіснення цементного каменю заповнювачем, вплив особливостей портландцементів на величину усадки бетону виявляється



малоістотним. Лише при використанні білітових високоалюмінатних цементів вплив мінералогічної характеристики цементу на усадку бетону може стати досить вагомим.

На величину усадки бетону впливають пружні властивості заповнювачів. Зерна заповнювачів, покриті оболонкою цементного каменю, перешкоджають усадці тим більше, чим вище їх модуль деформації. Збільшують усадку бетону домішки глинистих частинок у заповнювачах.

Відомі емпіричні формули, запропоновані для прогнозування усадки важкого бетону в атмосферних умовах при незмінних розмірах перетину елементів. Дані формули відрізняються особливостями врахування витрати води і цементу в бетоні та їх співвідношення (табл. 6.5).

Таблиця 6.5

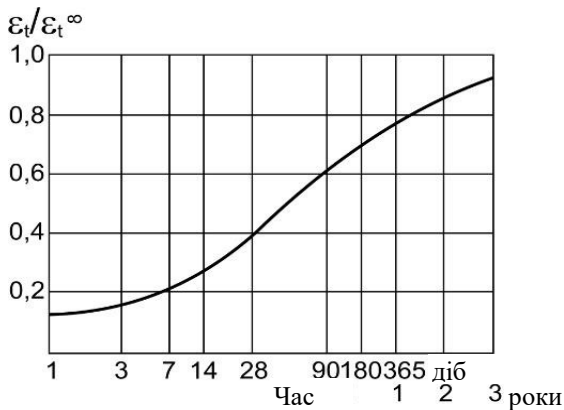
Основні розрахункові формули  
для прогнозування усадки бетону

№ п/п	Формули	Автори
1	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,24B^{3/2} \frac{(1 + Ц/В)^{3/2}}{6 + (Ц/В)^2}, \quad (6.6)$ <p><math>B</math> – витрата води в л/м<sup>3</sup>; <math>Ц/В</math> – цементно-водне відношення.</p>	Є. М. Щербаков
2	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125 B \sqrt{В}. \quad (6.7)$	Є. М. Щербаков
3	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = \frac{5B/Ц}{1 + m} (667 + Ц), \quad (6.8)$ <p><math>m</math> – масове співвідношення між заповнювачем і цементом.</p>	А. Вельмі
4	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 5500 \frac{1 + B/Ц}{1 + B/Ц + m} (B/Ц)^2 \quad (6.9)$	Європейський комітет по бетону (ЄКБ)
5	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 300 \left[ 0,7 + 0,15 \left( \frac{Ц - 225}{25} + \frac{B/Ц - 0,4}{0,1} \right) \right] \quad (6.10)$	С.В. Алексан- дровський

Вирішальним фактором, який визначає усадку бетону, є витрата води. При незмінній витраті води в суміші величина  $\varepsilon_{ус}$  мало залежить від витрати цементу та Ц/В. Для інженерних розрахунків найбільш простою і зручною є формула (6.7).

За межами області сталої водопотреби бетонних сумішей ( $\text{Ц/В} > 1/1,68K_{н.г}$ , де  $K_{н.г}$  – нормальна густина цементного тіста) витрата води при постійній легкоукладальності повинна корегуватися із врахуванням Ц/В.

Прогнозування усадочних деформацій у часі може бути виконане з урахуванням типових залежностей (рис. 6.8).



**Рис. 6.8.** Залежність усадочних деформацій бетону в часі

За даними Європейського комітету по бетону (ЄКБ) через 7 діб тверднення усадка становить 0,2; 28 діб – 0,4; 180 діб – 0,7; 365 діб – 0,8 $\varepsilon_{ус.м}$  ( $\varepsilon_{ус.м}$  – гранична деформація усадки).

Поряд з усадкою, яка обумовлена висиханням, бетон піддається усадці в результаті карбонізації за рахунок вуглекислого газу, який наявний в атмосфері. При наявності вологи вуглекислий газ взаємодіє із продуктами гідратації цементу, що супроводжується збільшенням загальної усадки бетону (рис. 6.8). Усадка за рахунок карбонізації в значній мірі впливає на загальну усадку після висихання бетону і при поперемінному зволоженні та висушуванні.

*Термічна усадка* виникає внаслідок зниження температури бетону. Високі перепади температур у літній і зимовий періоди можуть приводити до коливань розмірів бетонних виробів до 0,5 мм/м.

Термічну усадку  $\varepsilon_{yc}^T$  можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon_{yc}^T = K_{т.р.} \Delta t, \quad (6.11)$$

де  $K_{т.р.}$  – коефіцієнт термічного розширення бетону (він коливається від 7 до 14 мкм/ м·°С і в середньому приймається 10 мкм/ м·°С);

$\Delta t$  – перепад температур.

Термічна усадка може бути причиною тріщиноутворення масивних конструкцій. З часом виникаючі тріщини збільшуються під впливом усадки у зв'язку зі зміною вологості бетону і карбонізації. Для обмеження термічної усадки знижують екзотермію цементу, температуру суміші при укладанні в опалубку, вибирають заповнювач із високим модулем деформації.

Важливе значення для забезпечення довговічності масивних гідротехнічних споруд має їх *термічна тріщиностійкість*, обумовлена тепловиділенням бетону при його твердінні.

Для оцінки термічної тріщиностійкості бетону використовують критерій  $K_t$ :

$$K_m = \frac{\varepsilon_{гр} \cdot C \cdot \rho_b}{Q \cdot \alpha}, \quad (6.12)$$

де  $\varepsilon_{гр}$  – гранична розтяжність бетону;

$C$  – питома теплоємність, кДж/кг·град;

$\rho_b$  – густина бетону, кг/м<sup>3</sup>;

$Q$  – тепловиділення бетону, кДж/м<sup>3</sup>;

$\alpha$  – коефіцієнт лінійного температурного розширення.

Нормоване *тепловиділення* для масивних конструкцій визначається з умови обмеження температури бетону на певний

термін тверднення. Допустиме значення тепловиділення в кДж/м<sup>3</sup> можна знайти за формулою:

$$Q = \frac{C\rho_b}{K}(t_{кр} - t_o), \quad (6.13)$$

де  $t_{кр}$  – критичне значення температури бетону, що встановлюється проектом;

$K$  – коефіцієнт, рівний або меншої одиниці, що залежить від умов охолодження бетону в конструкції;

$t_o$  – початкова температура бетону при укладанні.

Критична температура бетону в масивних спорудах призначається з урахуванням середньорічної температури ( $t_p$ ):

$$t_{кр} = t_p + \Delta t, \quad (6.14)$$

де  $\Delta t$  – допустиме перевищення критичної температури над середньорічною.

Наприклад, при  $\Delta t=20^\circ\text{C}$ ,  $t_p=5^\circ\text{C}$ ,  $C\rho_b=2318$  кДж/м<sup>3</sup>град; ( $C=0,966$  кДж/м<sup>3</sup>град;  $\rho_b=2400$  кг/м<sup>3</sup>);  $K=0,8$ ;  $t_o=8^\circ\text{C}$  максимально допустиме значення тепловиділення:

$$Q = \frac{2318}{0,8}(25 - 8) = 49257 \text{ кДж} / \text{м}^3$$

Експериментальне визначення тепловиділення бетонів виконується у калориметрах термосного, адіабатичного чи ізотермічного типів. Найбільш широкого поширення набули термосні калориметри, недоліком яких є змінний температурний режим тверднення зразків бетону. Для перерахунку отриманих даних на ізотермічний режим тверднення бетону розроблена відповідна розрахункова методика.

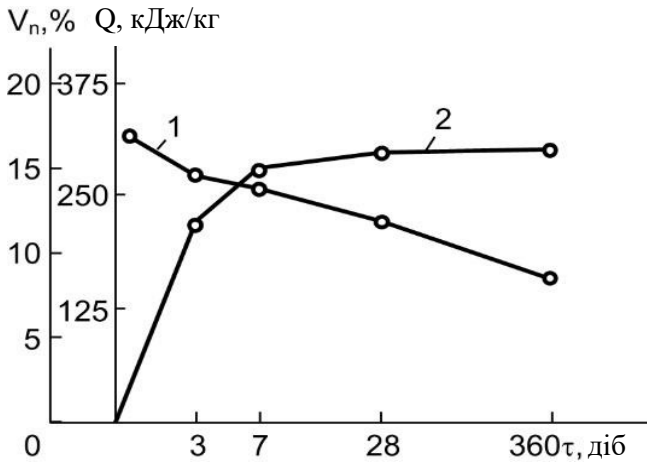
Для наближеної розрахункової оцінки тепловиділення бетону застосовують залежності, які враховують питоме тепловиділення цементу, параметри складу бетону, температуру і тривалість тверднення.

Основна частина тепла при твердненні цементу в бетоні виділяється вже в перші 3-7 доби тверднення (табл. 6.6) (рис. 6.9).

Таблиця 6.6

## Інтенсивність тепловиділення цементу в бетоні

Строки твердне- ння, діб	Тепловиділення					
	за даними Вудса, Стейнора, Старка			за даними Кінда, Окорокова, Вольфсон		
	кДж/кг	% до 28 діб.	% до 1 року	кДж/кг	% до 28 діб.	% до 1 року
3	281	78	67	310	77	65
7	319	88	76	361	90	75
28	361	100	86	403	100	84
90	382	109	94	433	107	90
180	412	114	98	458	114	96
360	420	116	100	479	119	100



**Рис. 6.9.** Зміна пористості  $V_p$  (1) і тепловиділення  $Q$  (2) бетону в процесі тверднення

Найбільш зручна для розрахункового визначення тепловиділення бетону залежність, яка враховує питоме тепловиділення цементу.

Запропоновано тепловиділення бетону у віці 7 діб у  $\text{кДж/м}^3$  обчислювати за формулою:

$$Q_7 = 0,83q_7 (Ц + 22,3 ОК), \quad (6.15)$$

де  $q_7$  – питоме тепловиділення цементу у віці 7 діб, визначене стандартним термосним методом, в  $\text{кДж/кг}$ ;

ОК – осадка конуса бетонної суміші, в см;

Ц – витрата цементу в  $\text{кг/м}^3$ .

Цією формулою рекомендується користуватися в межах наступних значень Ц і ОК:

Ц, $\text{кг/м}^3$	ОК, см
більше 250	2-12
від 200 до 250	2-8
менше 200	2-4

Для інженерних розрахунків при оцінці тепловиділення бетону в різні строки тверднення ( $Q_\tau$ ) може бути використана залежність:

$$Q_\tau = q_\tau Ц, \quad (6.16)$$

де  $q_\tau$  – питоме тепловиділення цементу у віці  $\tau$  діб.

При витраті цементу, наприклад,  $300 \text{ кг/м}^3$  і осадці конуса 2 см за формулою (6.15)  $Q_\tau = 286 q_\tau$ , за формулою (6.16)  $Q_\tau = 300 q_\tau$ , тобто відхилення не перевищує 5%.

Для розрахунку  $q_\tau$  при використанні портландцементу без мінеральних добавок дійсне адитивне рівняння:

$$q_\tau = a_\tau C_3S + b_\tau C_2S + c_\tau C_3A + d_\tau C_4AF, \quad (6.17)$$

де  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  – розрахунковий вміст відповідних мінералів, %;

$a_\tau$ ,  $b_\tau$ ,  $c_\tau$ ,  $d_\tau$  – коефіцієнти, що враховують участь мінералів у тепловиділенні цементу у віці  $\tau$  діб (табл. 6.7).

Використання рівняння (6.17) при прогнозуванні тепловиділення реальних цементів на практиці зустрічається рідко. Це обумовлено тим, що бездобавочні цементы використовуються для гідротехнічних бетонів у обмеженій кількості, однак і для них крім мінералогічного складу (рис. 6.10),

на тепловиділення суттєво впливають тонкість помелу, наявність хімічних добавок та ін.

Таблиця 6.7

Коефіцієнти участі клінкерних мінералів  
у процесі тепловиділення

Час тверднення, дів	Мінерал			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
3	3,902	0,668	6,371	-0,500
7	4,591	0,970	8,690	-1,739
28	4,796	0,643	9,656	0,588
90	4,969	0,970	10,324	1,394
180	5,124	1,869	10,319	1,604
365	5,330	2,234	10,605	1,68

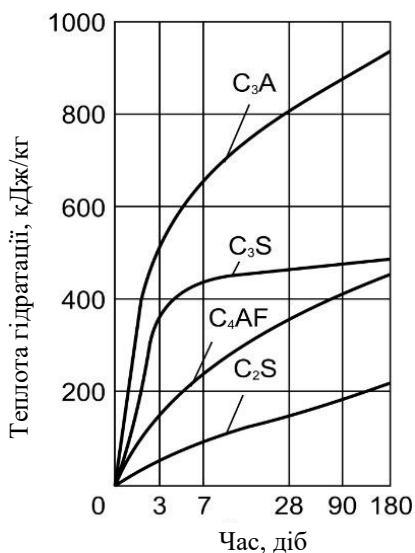


Рис. 6.10. Тепловиділення при гідратації клінкерних мінералів

Для зведення бетонних гребель великих гідровузлів та інших масивних гідротехнічних споруд за спеціальними технічними умовами виготовляють низько- і помірнотермічні цементи.

За величиною тепловиділення до портландцементів із помірною і низкою екзотермією близькі сульфатостійкі цементи.

Поряд із застосуванням спеціальних цементів зі зниженою екзотермією, а також бетонів з відносно низькою витратою цементу зменшення екзотермії бетону досягається зниженням температури бетонних сумішей шляхом охолодження води замішування і заповнювачів, заміни частини води замішування льодом, запобіганням нагріванню бетонних сумішей при їх транспортуванні, подачі та укладанні.

Для охолодження бетону в практиці гідробудівництва успішно застосовується метод трубного охолодження бетонних масивів, суть якого полягає в пропусканні холодної води по трубах покладеним у блоках.

### **6.3. Морозостійкість та водонепроникність.**

Одним із головних критеріїв стійкості гідротехнічного бетону в умовах поперемінного заморожування та відтавання є *морозостійкість*.

*Марку бетону за морозостійкістю* призначають залежно від кліматичних умов і числа розрахункових циклів заморожування та відтавання протягом року (за даними довгострокових випробувань) з урахуванням експлуатаційних умов. При помірних кліматичних умовах і числі циклів поперемінного заморожування і відтавання в рік до 50 призначається марка бетону за морозостійкістю F50, більше 50 до 75 – F100; більше 75 до 100 – F150; більше 100 до 150 – F200; більше 150 до 200 – F300.

Для бетону споруд, які працюють у суворих умовах, призначаються марки бетону за морозостійкістю відповідно F100, F150, F200, F300, F400, в особливо суворих умовах – F200, F300, F400, F500, F600.

При помірних кліматичних умовах середньомісячна температура найбільш холодного місяця вище мінус 10, суворих – від мінус 10 до мінус 20°C особливо суворих – нижче мінус 20°C.

Стандартизований метод оцінки морозостійкості бетону характеризується числом циклів заморожування і відтавання



зразків при нормованих умовах випробування без суттєвого зниження міцності. Цей метод запропонований в 1886 р. М.А. Белелюбським і дає можливість оцінити стійкість бетону при деякому умовному екстремальному режимі його роботи – повному водонасиченні та безперервному циклічному заморожуванні при загальній тривалості одного циклу 4,5...6,5 год. При основному стандартному способі випробувань заморожування виконується при  $-18...-20^{\circ}\text{C}$  на повітрі, а відтавання у воді. Для прискорення випробувань температуру заморожування знижують до  $-40...-60^{\circ}\text{C}$ , насичують зразки водним сольовим розчином, зменшують їх розміри і скорочують тривалість циклів.

Часто при випробуванні на морозостійкість для визначення фактичної зміни міцності матеріалу через задане число циклів використовують коефіцієнт морозостійкості:  $K_{\text{мрз}} = f_{\text{мрз}} / f_{\text{к}}$ , де  $f_{\text{мрз}}$  – міцність бетону після прийнятого числа циклів випробувань;  $f_{\text{к}}$  – міцність контрольних зразків.

Марка бетону за морозостійкістю вважається забезпеченою, якщо  $K_{\text{мрз}} \geq 0,95$ .

При призначенні морозостійкості бетону в конкретних конструкціях та спорудах необхідно враховувати такі важливі фактори, як ступінь водонасичення, коливання від'ємних температур, характер напруженого стану бетону та ряд інших.

Відомий дослідник морозостійкості бетону С.В. Шестоперов запропонував оцінювати морозостійкість деякою умовною маркою, яка дорівнює добутку проектного строку експлуатації споруди, середньорічного числа циклів заморожування та відтавання і коефіцієнта запасу міцності. Для обґрунтування 8 умовних марок (від 25 до 600) їм дані рекомендації з 25 параметрів, що враховують якість вихідних матеріалів, склади бетону та технологію робіт.

В ряді країн, наприклад у США та Канаді, при проектуванні складу бетонів прийнято вказувати не конкретне число циклів заморожування і відтавання, а режим роботи бетону. Для кожного режиму роботи бетону рекомендується певна область допустимих В/Ц (табл. 6.8).

Таблиця 6.8

Максимально допустимі величини водоцементного відношення для бетону різних споруд за рекомендаціями Американського інституту бетону

Тип споруд	Умови служби бетону					
	Суворий клімат з різкими коливаннями температури або частими змінами заморожування і відтавання (використовується бетон лише із залученим повітрям)			М'який клімат з рідкими переходами температури через нуль, дощовий або сухий клімат		
	на повітрі	у зоні змінного рівня води		на повітрі	у зоні змінного рівня води	
		у прісній воді	у морській воді		у прісній воді	у морській воді
Парапети, бордюри, пороги шлюзів і доків, армовані палі, труби	0,49	0,44	0,40*	0,53	0,49	0,40*
Підпірні стінки, контрфорси, мостові опори, прогони, балки	0,53	0,49	0,44*	**	0,53	0,44*
Зовнішні частини масивних споруд	0,58	0,49	0,44*	**	0,53	0,44*
Бетон для підводного бетонування	-	0,44	0,44	-	0,44	0,44

\* При використанні сульфатостійкого цементу максимально допустимі величини водоцементного відношення можуть бути підвищені на 0,045.

\*\* Величина водоцементного відношення повинна прийматися виходячи з вимог до міцності та легкоукладальності.

Морозостійкість бетону обумовлена насамперед будовою його порового простору. У цементному камені утворюються три види пор: пори цементного гелю, розмір яких знаходиться у межах  $(15...40) \cdot 10^{-10}$  м, капілярні пори 0,01 – 1 мкм і умовно замкнуті пори 10...500 мкм.

*Пори гелю* характеризуються мінімальною проникністю для рідин і газів (коефіцієнт проникності для пор гелю менший  $10^{-10}$  м/с). Перенос рідкої фази в порах гелю можливий лише за механізмом молекулярної дифузії. Вода в порах гелю при експлуатації бетонних і залізобетонних конструкцій не замерзає, що пояснюється їх розміром, вмістом у поровій рідині добавок-електролітів.

*Капілярні пори* можна представити як частину об'єму води цементного тіста, що не заповнена продуктами гідратації цементу. Мікрокапіляри мають розмір менший  $10^{-1}$  мкм. Вони здатні до капілярної конденсації вологи, яка обумовлює гігроскопічність матеріалів. Макрокапіляри з радіусом більше 0,1 мкм (зазвичай до 10 мкм) заповнюються водою лише при безпосередньому контакті з нею.

Капілярні пори є основним дефектом структури цементного каменю. У свіжоприготовленому тісті порами можна вважати весь простір, заповнений водою. При твердненні частина його заповнюється гелем. Чим більший ступінь гідратації цементу, тим більше утвориться гелю і тим менший об'єм залишається на капілярні пори (рис. 6.11).

Одна з перших спроб зв'язати морозостійкість із величиною капілярної пористості була зроблена Г.І. Горчаковим (рис. 6.12).

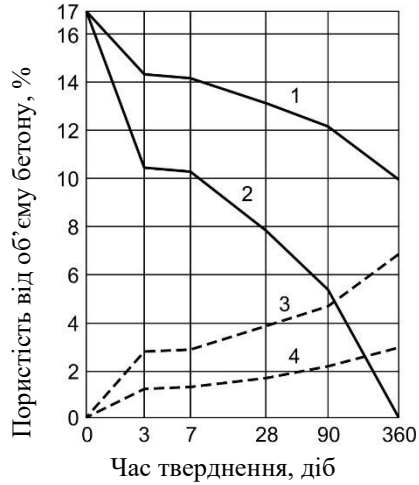
Для бетону нормального тверднення, виготовленого на стандартних матеріалах, була запропонована залежність виду:

$$F = K (P_{нач.} - P_{к})^n, \quad (6.18)$$

де  $F$  – число циклів заморожування (яке визиває певний ступінь руйнування);

$K$ ,  $n$ ,  $P_{нач.}$  – параметри, що залежать від якості матеріалів, складу бетону, виробничих факторів;

$P_{к}$  – капілярна пористість в %.



**Рис. 6.11.** Зміна об'єму основних видів пор у бетоні:  
 1 – загальна пористість; 2 – капілярні пори; 3 – пори гелю;  
 4 – контракційні пори

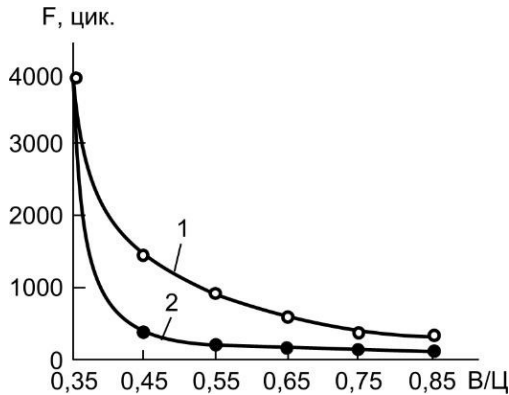


**Рис. 6.12.** Залежність морозостійкості бетону від капілярної пористості (за Г.І. Горчаковим)

Показник  $n$  для випробуваних бетонів і цементно-піщаних розчинів коливався в межах від 2,7 до 3. Статистична обробка дала можливість конкретизувати наведену вище залежність емпіричним рівнянням:

$$F = (14 - \Pi_k)^{2,7}. \quad (6.19)$$

Об'єм відкритих капілярних пор, які визначають кількість замерзаючої води та морозостійкість бетону, залежить від водоцементного відношення (В/Ц) і ступеня гідратації цементу. Зі збільшенням В/Ц зростає як загальний об'єм відкритих пор, так і їх середній розмір, що також негативно впливає на морозостійкість (рис. 6.13). Зниження В/Ц можливе як за рахунок зменшення витрати води при застосуванні пластифікуючих добавок, більш жорстких сумішей, так і за рахунок збільшення витрати цементу. Другий спосіб зниження В/Ц економічно неефективний.



**Рис. 6.13.** Залежність морозостійкості (F) бетону з втягнутим повітрям (1) і звичайного бетону (2) від В/Ц

Друга характеристика, що поряд з В/Ц визначає капілярну пористість бетону – ступінь гідратації цементу, залежить від активності цементу, інтенсивності росту її в часі, тривалості й

умов тверднення бетону. Підвищенню ступеня гідратації цементу сприяють різні способи його активізації та належний догляд за бетоном.

За даними Г.І. Горчакова кожен відсоток зниження капілярної пористості досягається зменшенням кількості води замішування на  $10 \text{ л/м}^3$  або збільшенням витрати цементу на  $20...35 \text{ кг/м}^3$ .

Вплив якості цементу на морозостійкість бетону пов'язаний із мінералогічним складом, тонкістю помелу і наявністю активної мінеральної добавки. З мінералів цементу негативний вплив на морозостійкість здійснює  $\text{C}_3\text{A}$ , вміст якого в морозостійких цементах зазвичай не перевищує  $5...8\%$ .

У морозостійких бетонах небажано використовувати активні мінеральні добавки особливо з підвищеною водопотребою. В той же час експериментально показано, що бетони з помірним вмістом доменних шлаків або кам'яновугільної золи-виносу можуть мати задовільну морозостійкість особливо при введенні в бетон емульгорованого повітря.

Низьку морозостійкість мають пуцоланові цементи. Шлакопортландцементи за морозостійкістю займають проміжне місце між портланд- і пуцолановим цементом.

Жорсткі вимоги пред'являються до обмеження величини втрати при прожарюванні, обумовленої тривалим зберіганням цементу. Зберігання цементу значно більш впливає на його морозостійкість чим на активність. На думку С.В. Шестоперова наявність оболонки з новоутворень гідратованих мінералів на зернах цементу є однією з основних причин зниження довговічності бетону.

Кварцовий пісок і щебень із щільних вивержених або метаморфічних порід, які зазвичай застосовуються для отримання важкого бетону і відповідають вимогам стандартів, дають можливість отримувати високоморозостійкий бетон.

При сталому В/Ц морозостійкість бетону можна суттєво збільшити введенням у бетонні суміші втягнутого повітря за допомогою добавок ПАР. Основні повітрявтягувальні добавки відносяться до гідрофобізуючих ПАР, які володіють значною

поверхневою активністю на границі розчин-повітря. Ці добавки при їх введенні з водою замішування викликають утворення високодисперсної емульсії повітря, стійко диспергованого в бетонній суміші. Повітрявтягувальні добавки виготовляються у вигляді концентрованих розчинів, густих паст або легкорозчинного порошку. Для приготування добавок використовують деревні смоли, продукти переробки нафти, рослинні жири та іншу сировину. Найбільш часто в якості повітрявтягувальних добавок застосовують добавки на основі деревної смоли (смола нейтралізована повітрявтягувальна – СНП, синтетична поверхнево-активна добавка – СПД та ін.). У бетонні суміші їх вводять зазвичай у кількості 0,01...0,02% від маси цементу, при цьому об'єм втягнутого повітря становить 30...60 л/м<sup>3</sup>. Такий об'єм втягнутого повітря зазвичай суттєво перевищує об'єм води, яка витісняється при заморожуванні. При цьому значення “фактора відстані” між повітряними порами є значно меншим критичного, яке зазвичай приймають 0,25 мм. Повітряні пори, отримані шляхом введення в бетонну суміш повітровтягувальних добавок, суттєво змінюють структуру цементного каменю. Через повітряні пори надходить надлишкова вода, яка витісняється з капілярів при заморожуванні бетону. Захисною дією володіють лише досить дрібні повітряні пори розміром менше 0,5...0,3 мм. Морозостійкість бетону з повітрявтягувальними добавками зростає у кілька разів (рис. 6.13).

Крім виду й вмісту добавок, на повітрявтягування також впливають інші фактори: легкоукладальність бетонних сумішей, тонкість помелу цементу, зерновий склад заповнювачів, час перемішування, температура.

Поряд із повітрявтягувальними для утворення системи умовно-замкнутих пор у бетоні застосовують газоутворювальні добавки, наприклад, гідрофобну кремнійорганічну рідину ГКР-94. Є дані, що система умовно-замкнутих пор з добавкою ГКР-94 більш стабільна, чим у бетонах з повітровтягувальними добавками.

Пластифікуючі добавки підвищують морозостійкість бетону як в результаті зменшення водопотреби і відповідно

капілярної пористості, так і внаслідок певного повітрявтягування.

Для гідротехнічних споруд із нормованою морозостійкістю F200 і вище, які експлуатуються в умовах насичення морською або мінералізованою водою, об'єм втягнутого повітря в бетонній суміші згідно ДСТУ Б В.2.7.-43-96 повинен відповідати значенням зазначеним у табл. 6.9.

Таблиця 6.9

Об'єм втягнутого повітря, що рекомендується для гідротехнічного бетону з підвищеною морозостійкістю ( $F \geq 200$ )

Максимальна крупність заповнювача, мм	Об'єм втягнутого повітря у бетонній суміші, % при В/Ц		
	менше 0,41	0,41...0,50	більше 0,50
10	2...4	3...5	5...7
20	1...3	2...4	4...6
40	1...3	1...3	3...5
60	1...3	1...3	2...4

*Водонепроникність* гідротехнічного бетону характеризується як прямими показниками (маркою за водонепроникністю або коефіцієнтом фільтрації) так і непрямыми – водопоглинанням і водоцементним відношенням (табл. 6.10).

*Марка бетону за водонепроникністю (W)* визначається найбільшим тиском води (МПа), який можуть витримати стандартні зразки з висотою і діаметром 150 мм без появи на їхній відкритій стороні ознак просочування води.

*Коефіцієнт фільтрації води ( $K_{\phi}$ )* показує кількість води, яка проникає через одиницю перетину за одиницю часу, при градієнті (відношенні напору в м. водяного стовпа до товщини конструкції в м.) рівному 1.

Значення  $K_{\phi}$  знаходять із рівняння:

$$K_{\phi} = \eta \frac{Q_{\phi} \delta}{S \tau P} \quad (6.20)$$

де  $Q_{\phi}$  – вага фільтрату, Н;

$\delta$  – товщина зразка, см;



S – площа поверхні зразка бетону;

$\tau$  – час фільтрації, с;

P – тиск води, МПа;

$\eta$  – коефіцієнт, що враховує в'язкість води ( $\eta=1$  при  $t=20$  °С).

Коефіцієнт фільтрації бетону має кореляційний зв'язок з маркою за водонепроникністю, яка наведена в табл. 6.10. Однак, є й інші рекомендації. Наприклад, за даними М.Г. Елбакідзе, який виконав широкі дослідження по фільтрації води через бетон, коефіцієнт фільтрації залежить від напору капілярного всмоктування та в середньому дорівнює при: W4 –  $1 \cdot 10^{-8}$ ; W6 –  $5 \cdot 10^{-9}$ ; W8 –  $3 \cdot 10^{-9}$ .

Таблиця 6.10

Показники проникності бетону

Вид бетону за проникністю	Показники проникності			
	прямі		непрямі	
	марка бетону за водонепроникністю	коефіцієнт фільтрації, см/с (при рівноважній вологості)	водопоглинання, % за масою	водоцементне відношення В/Ц не більше
Н-бетон нормальної проникності	W4	вище $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$	вище 4,7 до 5,7	0,6
П-бетон пониженої проникності	W6	вище $6 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$	вище 4,2 до 4,7	0,55
О-бетон особливо низької проникності	W8	вище $1 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-10}$	до 4,2	0,45

Марку бетону за водонепроникністю призначають залежно від величини градієнта напору, тобто відношення максимального напору води до товщини відповідної зони споруди. При напірному градієнті до 5 і температурі контактуючої зі спорудою води до 10°С призначається марка бетону за водонепроникністю W2; 5...10 – W4; 10...15 – W6; 15...20 – W8 і 20...30 – W10.

При температурі води понад 10 до 30°C призначені марки бетону за водонепроникністю збільшуються на одну ступінь при відповідних значеннях напірних градієнтів. Ще на один ступінь (відповідно від W6 до W12) марки бетону за водонепроникністю збільшуються при температурі води понад 30°C. У безнапірних конструкціях морських споруд проектна марка бетону за водонепроникністю повинна бути не нижче W4. Для конструкцій із градієнтом напору понад 30 призначають марки бетону за водонепроникністю W16 і вище.

Для частин і елементів греблі, які періодично омиваються водою, марка бетону за водонепроникністю приймається не нижче W4, при впливі на бетон потоку води з рухомими наносами, а також при кавітаційному впливі води марка бетону за водонепроникністю повинна бути не нижче W8.

Водонепроникність бетону визначається параметрами складу бетонної суміші та технологічними режимами виготовлення конструкцій і зведення споруд.

Залежно від умов експлуатації і конструктивних особливостей споруд у проектах гідротехнічних споруд приймають марки бетону за водонепроникністю від W2 до W20. При виборі марки бетону за водонепроникністю враховують показники агресивності водного середовища (табл. 6.11).

Таблиця 6.11

Ступінь впливу агресивного середовища  
на бетон протягом 1 року

Показники корозії	Ступінь агресивності середовища			
	Н	Сл	Ср	Си
Зниження міцності, %	немає	менше 5	5...20	більше 20
Зовнішні ознаки	-	Слабке поверхневе руйнування	Пошкодження кутів або волосяні тріщини	Ярко виражене руйнування (розтріскування)

Можна вважати експериментально доведеним, що водонепроникність бетону визначається не загальною, а

наскрізною або *ефективною пористістю*. Під останньою розуміють відношення об'єму пор, яка служить шляхами фільтрації, до об'єму зразка. Ефективна пористість суттєво змінюється залежно від тривалості взаємодії зразків з водою.

У ряді випадків на практиці необхідно оцінити зміну коефіцієнта фільтрації бетону при тривалій дії напору води, тобто з урахуванням самоущільнення бетону. Самоущільнення бетону в природних умовах відмічено багатьма авторами. Так, дані про водонепроникність бетону, визначені на кернах, вибурених у різний час із італійських гребель, свідчать про зниження коефіцієнта фільтрації бетону за період від 90 днів до 27 років на 3 порядки.

Коефіцієнт фільтрації бетону в часі при  $\tau > 1$  доби описується експоненціальною функцією:

$$K_{\phi(\tau)} = K_{\phi_0} e^{-(\tau/T)^b}, \quad (6.21)$$

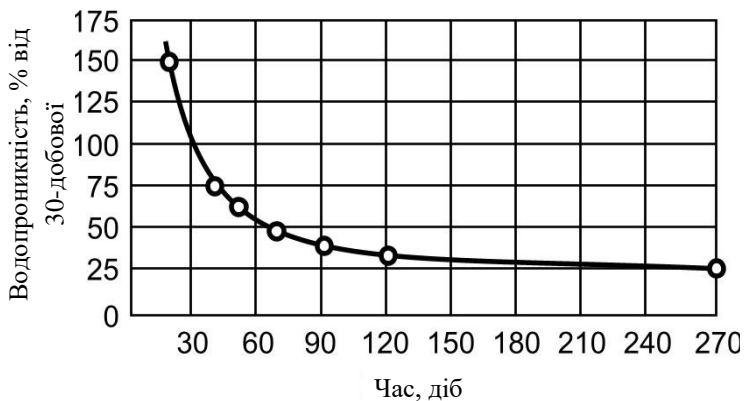
де  $K_{\phi(\tau)}$  – коефіцієнт фільтрації бетону через  $\tau$  діб фільтрації води, м/с;

$K_{\phi_0}$  – початковий коефіцієнт фільтрації, який вимірюється у першу добу просочування води через бетон, м/с;

$b$ ,  $T$  – емпіричні параметри функції самоущільнення, які залежать від складу бетону, гідрокарбонатної лужності води та градієнта напору.

Наявні експериментальні дані вказують на можливість значного підвищення водонепроникності бетону в віддалені терміни тверднення (рис. 6.14). Воно може виявитися значно вищим ніж відносний приріст міцності бетону. Для досягнення значного і стійкого підвищення водонепроникності бетону в часі необхідне забезпечення достатньої вологості бетону при твердненні.

Ефективним способом зниження проникності бетону є введення у бетонну суміш як органічних так і неорганічних добавок.



**Рис. 6.14.** Зміна водопроникності бетону залежно від часу тверднення у вологих умовах

З органічних добавок застосовують поверхнево-активні речовини (ПАР) і полімерні добавки. Добавки ПАР використовують для зниження В/Ц, підвищення щільності і зменшення середнього радіуса капілярів. Крім того, більшість ПАР сприяє залученню повітря в бетонну суміш, яке сприяє утворенню умовно-замкнутої капілярно-пористої структури та зниженню проникності. На підвищення водонепроникності позитивно відображається гідрофобізація капілярів, яка досягається при застосуванні гідрофобізуючих ПАР.

Полімерні добавки можуть вводитися в бетонну суміш у вигляді окремих смол, мономерів або сополімерів з каталізаторами, емульсій і латексів. Вони колюматують капілярні пори бетону, утворюючи у бетоні залежно від виду добавки термореактивні і термопластичні полімери, еластомери.

Неорганічні добавки для зниження проникності представлені різними солями, бентонітовими й іншими глинами, активними мінеральними добавками. Ці добавки активно впливають на розвиток питомої поверхні твердої фази цементного каменю і розміри кристалів новоутворень, структуру порового простору, колюматцію пор в процесі тверднення. Підвищений ефект досягається при введенні різних

комбінованих добавок, що включають поряд з неорганічними речовинами добавки ПАР, полімери та ін.

Для забезпечення необхідної морозостійкості і водонепроникності конструкцій поряд із забезпеченням відповідних складів, при необхідності застосовують гідро- і теплогідроізоляцію зовнішніх поверхонь споруд та інші заходи. Вибір тих або інших проектних рішень виконується на основі техніко-економічного аналізу.

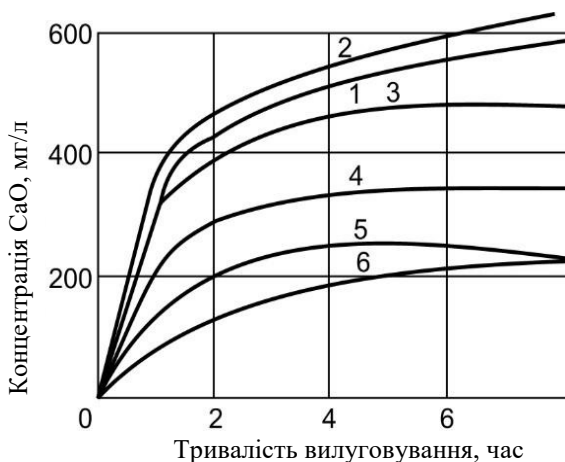
#### 6.4. Корозійна стійкість

Середовище в якому експлуатується бетон із позиції його агресивності прийнято класифікувати на неагресивне (Н), слабке – (Сл), середньо – (Ср) і сильноагресивне (Си) (табл. 6.11).

Глибина руйнування бетону за 50 років експлуатації бетонних конструкцій при неагресивному водному середовищі допускається до 1 см, слабоагресивному – 2...4, середньоагресивному – 4...6, сильноагресивному – більше 6. Для залізобетонних конструкцій допустима глибина руйнування у воді різного ступеня агресивності відповідно становить 1; 1...2; 2...4 і більше 4 см.

Агресивні властивості води визначає ступінь її мінералізації, жорсткості, а також кислотності чи лужності. Зазвичай вода рік і озер має слаболужну реакцію. Загальний вміст солей у річкових водах, як правило, не перевищує 0,3...0,5 г/л. Грунтові та природні підземні води містять мінеральні солі та інші домішки. Їх агресивність стосовно цементних бетонів оцінюється нормами агресивності водного середовища. Зовсім чиста, не мінералізована вода може бути також агресивною щодо бетону, викликаючи вилугування гідроксиду кальцію (*корозія I виду*).

Для запобігання або зменшення інтенсивності корозії I виду дуже велике значення має щільність бетону. Другим важливим напрямком підвищення корозійної стійкості бетону є зв'язування  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  активними мінеральними добавками, які вводяться в цемент або безпосередньо в бетонні суміші (рис. 6.15).



**Рис. 6.15.** Швидкість вилигування  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  дистильованою водою із цементного каменю на різних цементах:

- 1 – піщаний портландцемент; 2 – портландцемент; 3 – гіпсошлаковий цемент; 4 – пуцолановий цемент; 5 – піщано-пуцолановий цемент; 6 – глиноземистий цемент

Корозію бетону викликають кислоти, розчинені у воді (*корозія II виду*) у тому числі надлишковий вміст  $\text{CO}_2$ , який може міститися в природній воді (табл. 6.12).

Особливість *вуглекислої корозії* полягає в тому, що вона відбувається у два етапи. Спочатку  $\text{CO}_2$ , що міститься у воді, утворює  $\text{CaCO}_3$ , що ущільнює бетон. Умови для розчинення карбонатної плівки створюються при збільшенні кількості  $\text{CO}_2$  понад рівноважної і утворенні гідрокарбонату. Надлишкова по відношенню до рівноважної кількості  $\text{CO}_2$  називається агресивною вуглекислою.

Бетон нормальної щільності починає руйнуватися при  $\text{pH} < 6,5$ , особливо щільний при  $\text{pH} \leq 4,9 \dots 4$ .

Корозію II виду викликають також солі магнію, які часто наявні в ґрунтових водах і у значній кількості містяться в морській воді. Морська вода може містити до 35 мг/л солей, з них в середньому  $\text{NaCl}$  – 78%;  $\text{MgCl}_2$  – 11%;  $\text{MgSO}_4$  – 4,7%;  $\text{CaSO}_4$  – 3,6%;  $\text{K}_2\text{SO}_4$  – 2,5%. Поряд із розчинними солями, які

вимиваються із бетону, при магнезіальній корозії утворюється аморфна маса  $Mg(OH)_2$ , що зменшує міцність бетону. У морській воді магнезіальна корозія підсилюється внаслідок підвищення розчинності гідроксиду кальцію і магнію в присутності  $NaCl$ .

Таблиця 6.12

Необхідні марки бетону за водонепроникністю залежно від показників агресивності водного середовища (для споруд у ґрунтах із  $K_f > 0,1$  м/доба)

Показник агресивності	Водонепроникність бетону		
	W4	W6	W8
Бікарбонатна лужність, мг-екв/л	вище 0 до 1,05	-	-
Водневий показник, рН	вище 5 до 6,5	вище 4 до 5,0	вище 3,5 до 4,0
Вміст агресивної вуглекислоти, мг/л	вище 10	вище 40	-
Вміст магнезіальних солей, мг/л у перерахунку на іон $Mg^{2+}$	вище 1000	вище 2000	вище 3000
Сумарний вміст хлоридів, сульфатів та ін. солей, мг/л при наявності випаровуючих поверхонь	вище 10000	вище 20000	вище 50000

**Примітка.** В умовах експлуатації споруд, розташованих у слабофільтруючих ґрунтах із  $K_f$  меншим 0,1 м/доба, значення показників агресивності повинні бути помножені на 1,3.

До 2/3 магнезіальних солей у морській воді становить  $MgCl_2$ , 1/3 –  $MgSO_4$ . Найнебезпечнішою є магнезіально-сульфатна корозія, оскільки в результаті реакцій  $MgSO_4$  із  $Ca(OH)_2$  а також із гідросилікатами та гідроалюмінатами кальцію утворюється не лише аморфний  $Mg(OH)_2$ , але і кристалізується гіпс, об'єм якого більший сумарного об'єму вихідних речовин,

що викликає значні напруження в цементному камені. Магнезіально-сульфатну корозію можна вважати змішаною (корозією II та III виду).

*Корозія III виду* розвивається в бетоні від внутрішніх напружень при накопиченні в порах і капілярах малорозчинних солей. Це може бути як результат кристалізації продуктів хімічних реакцій, так і процесу кристалізації при поглинанні солей із агресивних розчинів.

Найпоширенішою корозією цього виду є *сульфатна корозія*, яка відбувається в цементному камені під впливом аніонів  $\text{SO}_4^{2-}$ , зв'язаних з катіонами  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$ . У ґрунтових водах зазвичай вміст  $\text{SO}_4^{2-}$  не перевищує 60 мг/л, у морській він може досягати 2500...2880 мг/л. Для бетону нормальної щільності на портландцементі сульфати, які містяться у водному середовищі, здійснюють слабкий агресивний вплив при концентрації іонів  $\text{SO}_4^{2-}$  понад 300 мг/л, а сильний – понад 500 мг/л. Ступінь агресивного впливу води з підвищеним вмістом іонів  $\text{SO}_4^{2-}$  залежить також від виду цементу (табл. 6.13).

Різновидами сульфатної корозії є сульфоалюмінатна та гіпсова корозія. Кристалізація  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  має місце лише при концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$  більше 300 мг/л. У присутності іонів кальцію кристалізація  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  розпочинається при більш низьких концентраціях  $\text{SO}_4^{2-}$  у розчині.

Відкладення солей у порах цементного каменю можливо і при їх кристалізації із сольових розчинів у результаті капілярного підсмоктування і випаровування води. При підсмоктуванні розчинів 5%-ної концентрації кристалізаційний тиск може досягати при  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 4,4;  $\text{MgSO}_4$  – 3,6;  $\text{NaCl}$  – 2,7;  $\text{CaSO}_4$  – 0,09 МПа.

*Сольова корозія* характерна в умовах теплого і сухого клімату при наявності в ґрунті водорозчинних солей у кількості більше 1% або високого рівня ґрунтових вод з мінералізацією не менше 3 г/л.



Таблиця 6.13

Ступінь агресивного впливу сульфатів у водному середовищі на бетонні і залізобетонні конструкції

Цемент	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> у мг/л для споруд, розташованих у ґрунтах із K <sub>ф</sub> >0,1 м/добу у відкритій водоймі та для напірних споруд при вмісті іонів HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг-екв/л			Вплив середовища на бетон із маркою W4
	вище 0 до 3	вище 3 до 6	вище 6	
Портланд-цемент	вище 250 до 500 вище 500 до 1000 вище 1000	вище 5000 до 1000 вище 1000 до 1200 вище 1200	вище 1000 до 1200 вище 1200 до 1500 вище 1500	Слабо-агресивний Середньо-агресивний Сильно-агресивний
Портланд-цемент із вмістом у клінкері C <sub>3</sub> S не більше 65%, C <sub>3</sub> A не більше 7%, C <sub>3</sub> A + C <sub>4</sub> AF не більше 22% і шлакопортландцемент	вище 1500 до 3000 вище 3000 до 4000 вище 4000	вище 3000 до 4000 вище 5000	вище 4000 до 5000 вище 6000	Слабо-агресивний Середньо-агресивний Сильно-агресивний
Сульфатостійкі цементи	вище 3000 до 6000 вище 6000 до 8000 вище 8000	вище 6000 до 8000 вище 8000 до 12000 вище 12000	вище 8000 до 12000 вище 12000 до 15000 вище 15000	Слабо-агресивний Середньо-агресивний Сильно-агресивний

**Примітки:** 1. При K<sub>ф</sub><0,1 м/діб значення показників агресивності множаться на 1,3. 2. Для бетону марки W6 значення показників агресивності множаться на 1,3, W8 – на 1,7.

При відповідних температурно-вологісних умовах ряд солей із безводних або маловодних форм ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) у порах цементного каменю переходять у висоководневі форми кристалогідратів ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  і т.д.). Такий перехід супроводжується збільшенням об'єму твердої фази в 1,5...3 рази і значними деформаціями. У результаті сольової корозії в ряді південних регіонів відмічене руйнування конструкцій на висоті 10...50 см від поверхні землі.

Корозія бетону III виду може відбуватися не лише при взаємодії бетону із зовнішнім середовищем, але й у результаті руйнівних процесів, що відбуваються при хімічній взаємодії компонентів бетонної суміші. Характерним прикладом таких процесів є взаємодія лугів, які містяться в цементі, із кремнеземом заповнювачів (*лужна корозія*). У портландцементі вміст розчинних лужних сполук досягає 1...1,5% (у перерахунку на  $\text{Na}_2\text{O}$ ). Їх джерелами є глинисті компоненти шихти для отримання клінкеру і зола палива. Значна частина лугів надходить у шихту з пилом печей, що повертається на випал. Луги можуть накопичуватися в бетоні також внаслідок обмінних реакцій складових цементного каменю із солями натрію, розчиненими в природних водах. Реакційноздатними в середовищі лугів є деякі модифікації кремнезему (тридиміт, кристобаліт, кремнеземисте скло, опал, опока, трепел, халцедон та ін.), що зустрічаються у заповнювачах. Продукти реакції між лугами цементу й активним кремнеземом розширюються в об'ємі і створюють руйнуючий тиск. Заповнювач із вмістом розчинного кремнезему більше 50 моль/л вважається потенційно здатним до взаємодії з лугами цементу.

Найбільш дієвим способом попередження даної корозії є обмеження вмісту лугів у цементі до 0,6%. Сповільнюються процеси лужної корозії при введенні в цемент активних мінеральних і деяких інших добавок (вуглекислий літій, альбумін та ін.).

Бетон гідротехнічних споруд може піддаватися корозії при контакті з біологічно-активним середовищем (*біопшкодження*).

Наприклад, мідії, які знаходяться на поверхні підводних морських споруд (до 40 кг на  $1 \text{ м}^2$ ) здатні виділяти до  $12,2 \text{ см}^3 \text{ CO}_2$

за 1 год. на 1 кг своєї маси. Ряд інших живих організмів, які знаходяться на поверхні споруд, особливо в період біоценозу (цвітіння води), навпаки, поглинають із бетону вуглекислоту і вільний СаО. В обох випадках розвивається органігенна корозія бетону.

Із бактерій, які впливають на цементний камінь, найбільш сильними є динітрифікуючі бактерії, у результаті життєдіяльності яких виділяється сірчана кислота. Анаеробні азотнофіксуючі бактерії утворюють масляну кислоту. Уролітичні бактерії діють в основному на сечу, яка наявна в стічних водах, гідролізуючи її. При цьому виділяються аміак і вуглекислий газ.

У результаті життєдіяльності ряду мікроорганізмів у бетоні розвиваються поряд із хімічними руйнівні електрохімічні процеси, що викликають розкладання продуктів гідратації цементу. Деякі мікроорганізми, особливо гриби, внаслідок збільшення їх об'єму викликають також руйнівні фізико-механічні процеси.

При проектуванні конструкцій, призначених для експлуатації в агресивному середовищі, корозійну стійкість бетону, крім призначення необхідної водонепроникності, забезпечують застосуванням відповідних вихідних матеріалів і добавок, установленням відповідних вимог до категорії тріщиностійкості, ширині розрахункового розкриття тріщин, товщині захисного шару (для залізобетону).

Корозійні процеси, які протікають під впливом зовнішнього агресивного середовища, підсилюються при одночасному впливі фізичних, механічних і хімічних факторів.

Облицювання гідротехнічних споруд (тунелів, водобоїв, водозливів, елементів гребель, морських і річкових берегоукріплюючих споруд та ін.), особливо розташованих на гірських ріках, піддається *механічному зношуванню* наносами, які несуть водні потоки. Зношування викликається зазвичай як стираючим, так і ударним впливом наносів. Зменшення товщини бетону в результаті зношування викликає фільтрацію води, вилуговування та розвиток інших видів корозії. Стираючому впливу наносів піддається насамперед цементний камінь як менш стійка складова частина бетону. Найбільшим опором стиранню

володіють бетони на алітових цементах зі значною питомою поверхнею, а найменшим - на цементах з підвищеним вмістом біліту. Стійкість бетону до ударних впливів збільшується майже лінійно за інших рівних умов з ростом міцності при стиску. Ударна міцність зносостійких бетонів коливається від 0,08 до 0,17 МПа. Марки бетону за зносостійкістю встановлюються залежно від швидкості руху потоку води, величини середньорічного стоку через водопропускну конструкцію і середнього діаметру частинок, що складають насоси.

Зносостійкість зазвичай оцінюється по зменшенню маси зразків у г з площі 1 см<sup>2</sup> у 1 год.

Необхідна зносостійкість бетону забезпечується підбором його складу з урахуванням обмежень за В/Ц і граничній витраті цементу (табл. 6.14)

Таблиця 6.14

Основні параметри зносостійких бетонів різних марок

Клас бетону за міцністю на стиск	Марка бетону за водонепроникністю	Гранична крупність зерен заповнювача, мм	Гранична величина В/Ц	Граничні витрати цементу, кг/м <sup>3</sup>
C18/22,5	W8	80	0,48	360
C25/30	W8	80	0,45	400
C32/40	W10	80	0,42	430
C35/45	W10	40	0,40	460
C40/50	W12	40	0,38	480
C50/60	W12	40	0,36	500

Щебінь і гравій для зносостійкого гідротехнічного бетону повинні мати марки за зношуванням в полочному барабані не нижче:

- Ст-I – для щебеню з вивержених і метаморфічних порід;
- Ст-II – осадових порід, а також гравію і щебеню із гравію.

Збільшення висоти гребель обумовило підвищення швидкості руху води у водопропускних трактах гідротехнічних споруд і небезпеку руйнування бетону при кавітаційному впливі. Якщо, наприклад, для греблі Волховської ГЕС максимальна

швидкість води, що скидається, не перевищувала 15 м/с, то для греблі Саяно-Шушенської ГЕС вона становить більше 50 м/с.

Сутність *кавітації* полягає у порушенні суцільності всередині текучої рідини й утворенні повітряних бульбашок. Коли ці бульбашки, переміщаючись із потоком, попадають в область із тиском вище критичного, вода розриває їх, що супроводжується гідравлічним ударом. Багаторазово повторювані удари і є причиною кавітаційного руйнування бетону. В результаті кавітації на ряді ТЕС відмічені в конструкціях руйнування бетону глибиною 120...180 см. Інтенсивність кавітаційної корозії значно зростає, коли водний потік насичений частками абразиву.

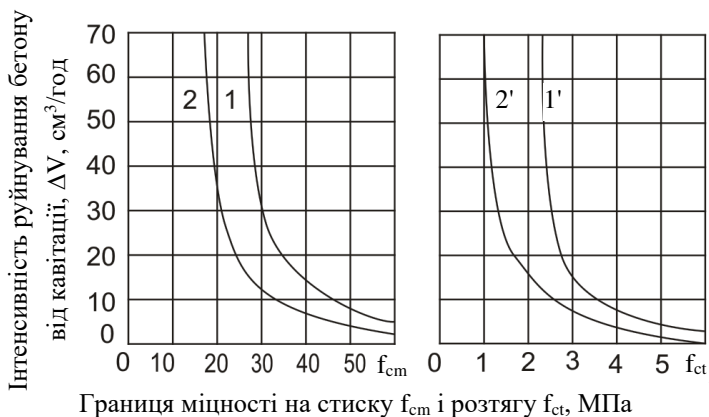
Одним зі способів захисту бетону від впливу кавітації є надання конструкціям форми, що забезпечує безвідривне обтікання їх потоком. Наприклад, водозливам надається плавний профіль параболічного чи близького до нього виду. Однак, такий спосіб трудомісткий через складність виготовлення і установки спеціальної опалубки, а також дотримання певного гідравлічного режиму.

*Кавітаційна стійкість* бетону оцінюється змінами об'єму ( $\Delta V_k$ ) (рис. 6.16) чи питомими втратами маси матеріалу за одиницю часу. Для оцінки кавітаційної стійкості використовують рівняння виду:

$$\Delta V_k = \frac{a}{f_{cm} - v}, \quad (6.22)$$

де  $a$ ,  $v$  – емпіричні коефіцієнти, на величину яких впливають склад бетону й умови випробування;  $f_{cm}$  – міцність бетону.

Підвищеною кавітаційною стійкістю володіють дрібнозернисті бетони. Зменшують стійкість мікротріщини на поверхні бетону в результаті поперемінного заморожування та відтавання. Важливе значення має забезпечення гладкої поверхні бетону.



**Рис. 6.16.** Залежність інтенсивності кавітаційного руйнування цементного бетону від його міцності при стиску 1, 2 і розтягу 1', 2'.  
1, 1' – за даними НДІБЗБ, 2, 2' – за даними Гідропроєкту.

При необхідності для підвищення зносо- і кавітаційної стійкості конструкцій застосовують різні види облицювань (табл. 6.15). Суттєве підвищення кавітаційної стійкості досягається застосуванням полімербетонів.

Таблиця 6.15

Види облицювань гідротехнічних споруд

Тип облицювання	Допустимі руйнуючі швидкості, потоку, м/с	Гранично допустиме насичення потоку наносами, %	Допустимі граничні розміри, наносів, мм	Товщина облицювання, см
Сталеві або чавунні плити	Без обмеження			1-2,5
Граніт та інші кам'яні породи	30-50	10-15	До 250	30-50
Кам'яне литво	Без обмеження			-

продовження табл.6.15

Тип облицювання	Допустимі руйнуючі швидкості, потоку, м/с	Гранично допустиме насичення потоку наносами, %	Допустимі граничні розміри, наносів, мм	Товщина облицювання, см
Сталобетон	15-20	До 5	50-100	10-15
Зносостійкий бетон марки:				
600	12-15	До 3	50-100	40-60
500	10-12	До 3	50-100	40-60
400	6-10	До 3	50-100	40-60
300	4-6	До 3	50-100	40-60
Тверді породи дерева (бук, дуб, клен)	8-10	До 2	50	20-25
Полімербетон на епоксидній смолі	10-15	До 2	50	5-10

## **7. ГІДРОТЕХНІЧНИЙ БЕТОН ДЛЯ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА СПОРУД**

Тонкостінні конструкції із застосуванням гідротехнічного бетону широко застосовують у водогосподарському та транспортному будівництві, берегоукріплюючих роботах, суднобудуванні та ін.

Товщина тонкостінних конструкцій, наприклад, залізобетонних плит для облицювання зрошувальних каналів знаходиться в межах 8...20 см.

### **7.1. Важкі і легкі бетони для тонкостінних конструкцій і споруд**

Гідротехнічний бетон у тонкостінних конструкціях не вимагає температурного регулювання для забезпечення тріщиностійкості, однак піддається впливу великої кількості експлуатаційних факторів, які можуть бути ще більш жорсткішими, ніж у масивних спорудах. Наприклад, бетонне облицювання каналів зрошувальних систем може одночасно піддаватись дії близько 30 видів навантажень і можливих їх комбінацій: гідростатичному і гідродинамічному тиску, поперемінному водонасиченню і висушуванню, заморожуванню і відтаванню, нагріванню та охолодженню, руйнуючої дії потоку води і наносів, рухомого льоду, напруженням і деформації в результаті усадки і осідання споруд, просадки ґрунту та ін.). У не менш жорстких умовах перебувають залізобетонні конструкції транспортних споруд (дія постійних, статично і динамічно змінних навантажень, кліматичних і різних факторів та ін. Врахувати усі навантаження і впливи при виборі якісних параметрів бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд досить складно.

Тонкостінні конструкції зазвичай зазнають дію різноманітних впливів у значно більш ранньому віці, ніж масивні. Класи бетону за міцнісними показниками для тонкостінних залізобетонних конструкцій призначають, як правило, у віці 28 діб після їхнього розрахунку на міцність і тріщиностійкість із



врахуванням вимог за морозостійкістю, водонепроникністю та інших експлуатаційних впливів. Класи бетону для тонкостінних конструкцій відповідають значенням гарантованої міцності бетону, МПа, із забезпеченістю 0,95, в той час, як для масивних споруд допускається застосування бетону із забезпеченістю гарантованої міцності 0,9.

Для зведення гідротехнічних споруд із застосуванням тонкостінних конструкцій поширене використання збірних залізобетонних елементів заводського виготовлення. Схеми деяких таких елементів для конструкцій водогосподарського призначення, наведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Приклади збірних залізобетонних елементів  
для водогосподарського будівництва

Найменування конструкцій	Ескіз
Труби розтрубні безнапірні, виготовлені віброштампуванням або центрифугуванням	
Труби безнапірні прямокутні	
Лотки параболічні	
Стійки опор для лотків	

Найменування конструкцій	Ескіз
Фундаменти опор для лотків	
Блоки колодязів	
Плити кріплення споруд ребристі	
Оголовки чекових споруд	
Плити кріплення укосів земляних гребель	

Для більшості збірних елементів, призначених для водогосподарського будівництва, у проєктах передбачений бетон

з проектною міцністю на стиск 20...35 МПа з марками за морозостійкістю і водонепроникністю не менше F150 та W6 відповідно.

Для збірних залізобетонних елементів відпускну міцність бетону приймають не менше 70% міцності для заданого класу бетону. При цьому для деяких конструкцій таких як палі, шпунти, конструкції мостів та ін. при відповідному обґрунтуванні допускається значення нормованої відпускну міцності 100% від проектної міцності бетону. Для залізобетонних лотків зрошувальних систем, плит облицювання зрошувальних каналів у холодний період року нормована відпускну міцність бетону повинна бути не менше 80% від проектної, для труб, елементів підземних каналів і колекторів – не менше 90%. У холодний період року включають період, який починається на один місяць раніше місяця із середньою температурою повітря 0°C і нижче. У районах із середньомісячною температурою повітря найбільш теплого місяця нижче плюс 10°C за холодний період допускається приймати весь рік.

Для попередньо напружених залізобетонних елементів, які розраховуються на вплив багаторазово повторюваного навантаження, і стрижневих конструкцій застосовують бетон класу не нижче C12/15. При застосуванні в попередньо напружених конструкціях високоміцного арматурного дроту використовується бетон із класом за міцністю не нижче C16/20, для елементів, які занурюють у ґрунт забиванням або вібруванням, бетон класу не менше C25/30.

У тих випадках коли експлуатаційні якості конструкцій визначаються роботою розтягнутого бетону, в проектах нормуються поряд із класами бетону за міцністю на стиск міцність на осьовий розтяг і розтяг при згині.

Із можливими напруженнями та міцнісними характеристиками бетону пов'язані розміри перетину конструкцій. Наприклад, при призначенні товщини облицювання зрошувальних каналів необхідно враховувати виникаючий у ньому згинальний момент від власної маси бетону і маси води в каналі (табл. 7.2).

Таблиця 7.2

Характеристика бетону залежно від товщини облицювання зрошувальних каналів і величини згинального моменту

Згинальний момент, Н. м	Товщина облицювання, м	Рекомендовані класи бетону за міцністю на стиск
1400	0,08	C8/10
2200	0,1	C12/15
3700	0,12	C16/20
5000	0,14	C16/20
7500	0,16	C20/25
9500	0,18	C20/25
12000	0,20	C25/30

Для каналів із пропускною здатністю до 5 м<sup>3</sup>/с рекомендується бетонне облицювання із проектною міцністю 20 МПа, 5...100 м<sup>3</sup>/с – 25 МПа, 100...1000 м<sup>3</sup>/с – 30...40 МПа.

Поряд із міцнісними показниками бетону для залізобетонних конструкцій, які експлуатуються під впливом води, важливе значення має встановлення *категорії тріщиностійкості та граничної ширини розкриття тріщин* (табл. 7.3).

Таблиця 7.3

Вимоги до залізобетонних конструкцій за тріщиностійкістю

Ступінь агресивного впливу водного середовища	Категорія вимог за тріщиностійкістю і гранично допустима ширина розкриття тріщин, мм, залежно від класу арматурної сталі		
	I	II	III
Слабоагресивний	<u>3</u> 0,2	<u>3</u> 0,15	<u>2</u> 0,1
Середньоагресивний	<u>3</u> 0,15	<u>3</u> 0,1	<u>1</u> -
Сильноагресивний	<u>3</u> 0,15	<u>2</u> 0,05	не допускаються до застосування

**Примітка.** Над рискою категорія вимог до тріщиностійкості, під рискою – допустима ширина розкриття тріщин.

Категорія вимог до конструкцій за тріщиностійкістю, а також гранично допустима ширина розкриття тріщин, товщина захисного шару і марка бетону за водонепроникністю встановлюються із урахуванням класу застосовуваної сталі залежно від ступеня агресивного впливу середовища (табл. 7.3, 7.4).

Таблиця 7.4

Товщина захисного шару в залізобетонних конструкціях і марка бетону за водонепроникністю залежно від ступеня агресивного впливу середовища.

Ступінь агресивного впливу водного середовища	Товщина захисного шару, не менше, мм	Марки бетону за водонепроникністю залежно від класу арматурної сталі		
		I	II	III
Слабоагресивний	20	W4	W6	W6
Середньоагресивний	30	W6	W6	W6
Сильноагресивний	30	W6	W6	-

Гранична ширина розкриття тріщин призначається також залежно від характеристики конструкцій і умов їх роботи. Її найменше допустиме значення (0,05 мм) можливе для конструкцій, які перебувають у зоні змінного рівня морської води, а також конструкцій, що піддаються періодичному заморожуванню і відтаванню при числі циклів у рік 50 та більше. Якщо для безнапірних конструкцій (конструкцій із градієнтом напору не більше 1), які перебувають постійно під водою, гранична ширина розкриття тріщин допускається до 0,3 мм, то для напірних розтягнутих конструкцій вона приймається залежно від величини напірного градієнта в межах 0,1...0,15 мм.

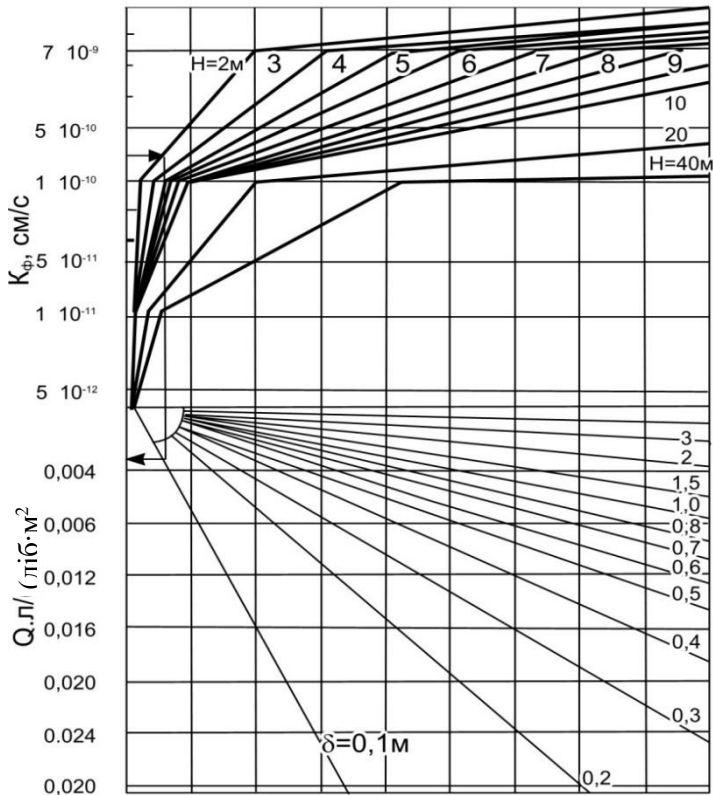
Для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд призначення *марки бетону за водонепроникністю* залежно від величини напірного градієнта є не завжди достатньо обґрунтованим. Наприклад, при товщині бетонного облицювання 0,08 м навіть для каналів із глибиною води 1 м, враховуючи високий напірний градієнт (більше 12), необхідний бетон марки W12. Аналіз великої кількості проектів зрошувальних каналів з бетонним облицюванням показав, що найчастіше застосовують

марки бетону за водонепроникністю W4...W6. Призначення надмірно високих марок бетону облицювань за водонепроникністю часто призводить до необхідності суттєвої перевитрати цементу. При цьому не зникають основні втрати води в результаті фільтрації, враховуючи те, що через бетон облицювання фільтрується не більше 15...20% загального об'єму втрат води. Основні втрати води в каналах відбуваються через її фільтрацію крізь шви і тріщини в бетоні.

Більш точною фільтраційною характеристикою бетону в порівнянні з його маркою за водонепроникністю є коефіцієнт фільтрації ( $K_f$ ). Одній і тій же марці бетону за водонепроникністю відповідає досить велика область значень коефіцієнта фільтрації (табл. 6.10). Нами виконані розрахунки, які дали можливість отримати номограму (рис. 7.1), яка пов'язує напір води, втрати води з каналу, товщину облицювання з коефіцієнтом фільтрації. Наприклад, для облицювання каналу товщиною 0,1 м при напорі 2 м і фільтраційних втратах 0,003л/(діб·м<sup>2</sup>) необхідний бетон з коефіцієнтом фільтрації  $K_f=2,5 \cdot 10^{-10}$  см/с. Такому коефіцієнту фільтрації відповідає бетон з маркою за водонепроникністю W6 у віці 28 діб (табл. 6.10). Розрахунки, виконані за цією методикою, показали, що для облицювань каналів глибиною 3...7 м необхідно застосовувати бетон марок W4...W6, при більшій глибині – W8...W12. Марка бетону за водонепроникністю призначається також з урахуванням агресивності водного середовища, а для залізобетонних виробів з урахуванням класу арматурної сталі (табл. 7.4).

Однією з головних причин руйнування конструкцій із застосуванням гідротехнічного бетону є можливий циклічний вплив заморозування та відтавання. Рекомендована методика визначення *марки бетону за морозостійкістю* повинна коректуватися з урахуванням результатів експлуатації реальних споруд у конкретних умовах. Це особливо важливо для споруд із застосуванням тонкостінних конструкцій. Наприклад, досвід експлуатації збірних і монолітних облицювань каналів із маркою бетону за морозостійкістю F50 у регіонах з відповідним числом циклів заморозування і відтавання показав, що багато які з них

зруйнувалися вже через 2...7 років. Збірні залізобетонні лотки довжиною 8 м, установлені на опорах, також при проектній і фактичній марці за морозостійкістю бетону F50 зруйнувалися через 2...3 роки експлуатації в Криму, на Північному Кавказі та інших регіонах з помірним кліматом. Дослідження показали, що для нормативного строку експлуатації лотків 30 років необхідно було забезпечити морозостійкість бетону не менше F300.



**Рис. 7.1.** Номограма для розрахунку коефіцієнта фільтрації ( $K_f$ ) бетонних облицювань.  
 Вище осі абсцис – криві напорів  $H$ , нижче – товщина облицювань ( $\delta$ );  
 $Q$  – фільтраційна витрата води через бетон облицювань

На відміну від масивних споруд тонкостінні бетонні конструкції зазвичай повністю насичуються водою і мають незначну теплову інерцію. Роботу таких конструкцій в значній мірі визначають розтягувальні напруження, які сприяють значному зниженню морозостійкості.

У загальному виді марку бетону за морозостійкістю запропоновано визначати за формулою:

$$F = K_1 \frac{T_n}{K_2}, \quad (7.1)$$

де  $T$  – нормативний термін експлуатації, роки;

$n$  – кількість циклів переходу температури через нуль градусів у районі експлуатації;

$K_1$  – коефіцієнт, що враховує співвідношення ступеня впливу на бетон (рівень ушкоджень) в умовах стандартного циклу випробувань і в умовах експлуатації конструкцій ( $K \approx 0,1 \dots 1,0$ );

$K_2$  – коефіцієнт, що враховує вплив “самозаліковування” структури бетону в процесі експлуатації.

Різні методи прогнозування морозостійкості основані на залежності її від параметрів, що характеризують структуру бетону, ступінь деструктивних змін при циклічному заморожуванні, а також рівняннях регресії, які пов’язують морозостійкість із іншими властивостями і складом бетонної суміші.

Існують кореляційні залежності між морозостійкістю і вмістом льоду в бетоні. Наприклад, запропонований критерій морозостійкості (КМ), лінійно пов’язаний із критичним числом циклів:

$$KM = \frac{\Pi_0 - \Pi_p + I_t}{I_{-10}}, \quad (7.2)$$

де відкрита пористість  $\Pi_0 = \Pi_{зп} - \Pi_p$ ;

$\Pi_{зп}$  – загальна пористість;

$\Pi_p$  – умовно-замкнута (резервна) пористість);

$I_t$  та  $I_{-10}$  – об’ємний вміст льоду при температурі заморожування зразків  $t^0 C$  та при  $-10^0 C$ .



Емпіричне рівняння, яке пов'язує величину F і КМ, має вид:

$$F = 2,04KM - 25. \quad (7.3)$$

Запропонований також інший параметр морозостійкості (С), пов'язаний із вмістом льоду в бетоні I<sub>10</sub>:

$$C = I_{-10}(B/\Omega)^{1/3}. \quad (7.4)$$

Залежність морозостійкості бетону F від параметра С запропонована у вигляді рівняння:

$$F - F_0 = I/(C - C_0), \quad (7.5)$$

де F<sub>0</sub> і C<sub>0</sub> – деякі граничні значення параметрів F і С.

Основні властивості гідротехнічного бетону – міцність, морозостійкість і водонепроникність взаємозалежні. В табл. 7.5 для прикладу наведені значення зазначених властивостей отриманих нами при випробуванні бетону нормального тверднення у віці 28 діб з використанням середньоалюмінатного (С<sub>3</sub>А = 6...8%) портландцементу М500, що містив 20% доменного гранульованого шлаку, гранітного щебеню 5...20 мм і середньозернистого кварцового піску. Пластифікатори та повітровтягувальні добавки не використовували.

Таблиця 7.5

Співвідношення проектних властивостей бетону у віці 28 діб

Осадка конуса, см	Клас бетону за міцністю на стиск, (С)	Марки бетону	
		за морозостійкістю, (F)	за водонепроникністю, (W)
2...12	С12/15	50...75	2
2...4	С20/25	100...150	2...4
10...12	С20/25	75...100	2...4
2...4	С25/30	200...250	6...8
10...12	С25/30	100...150	6...8
2...4	С30/37	250...300	10...12
10...12	С30/37	200...250	10...12

Неврахування можливого співвідношення властивостей бетону при заданому складі і технологічних режимах призводить до перевитрати необхідної кількості цементу і неоптимальності прийнятих конструктивних рішень. Регулювання співвідношення властивостей у необхідному напрямку досягається правильним вибором виду вихідних матеріалів і введенням у бетонні суміші різних добавок (пластифікуючих, повітровтягувальних, кольматуючих та ін.).

Бетони з морозостійкістю F100 і вище для гідротехнічних споруд доцільно виготовляти з обов'язковим застосуванням повітровтягувальних або газоутворювальних добавок.

Бетонні суміші марок за легкоукладальністю P3...P5 для виробництва збірних залізобетонних конструкцій і виробів, і марок за легкоукладальністю P4 і P5 для монолітних і сбірно-монолітних конструкцій повинні виготовлятися з обов'язковим застосуванням пластифікуючих добавок.

Вимоги до речовинного і хіміко-мінералогічного складу цементів і його властивостей призначаються з урахуванням технологічних особливостей виготовлення конструкцій і умов їх експлуатації. При нормуванні морозостійкості і підвищеної агресивності середовища доцільне застосування низькоалюмінатних портландцементів, які не містять мінеральних добавок або містять до 15...20% доменного гранульованого шлаку. Ефективне застосування сульфатостійких, пластифікованих і гідрофобних цементів.

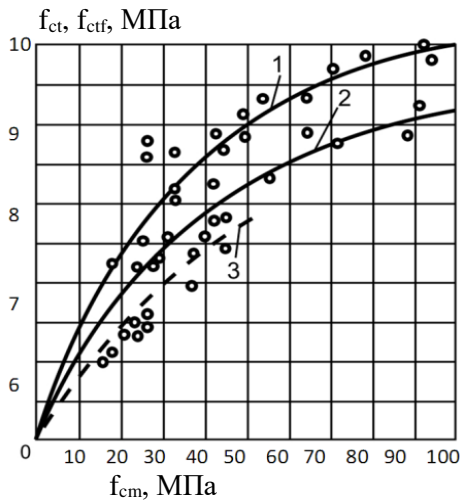
Для тонкостінних конструкцій поширене застосування *дрібнозернистих бетонів*.

У дрібнозернистих бетонах максимальну крупність заповнювача обмежують 10 мм. Розповсюдженням різновидом цього виду бетону є *піщаний бетон*, який не містить крупний заповнювач. Дрібнозернисті бетони характеризуються підвищеною витратою цементу. Суттєве зниження витрати цементу досягається при введенні ефективних пластифікуючих добавок і особливо суперпластифікаторів.

Введення суперпластифікаторів дає можливість суттєво знизити В/Ц без зміни рухомості, що призводить відповідно до збільшення класу дрібнозернистих бетонів за міцністю.

Найбільший пластифікуючий ефект досягається в “жирних” сумішах (сумішах з підвищеним вмістом цементу) на крупних пісках, хоча і при застосуванні дрібних і дуже дрібних пісків він може бути досить значний. Застосування суперпластифікаторів дає можливість отримувати високоміцні дрібнозернисті бетони.

Для дрібнозернистих бетонів характерне підвищене відношення міцності на розтяг і згин до міцності на стиск (рис. 7.2). При рівній міцності на стиск міцність при згині для дрібнозернистих бетонів на 10...15% вища, ніж у звичайних.



**Рис. 7.2.** Залежність міцності бетону при згині ( $f_{ctf}$ ) і розтягу ( $f_{ct}$ ) від міцності при стиску ( $f_{cm}$ ): 1 –  $f_{ctf}$  піщаного бетону; 2 –  $f_{ctf}$  звичайного бетону; 3 –  $f_{ct}$  піщаного бетону

Для виробництва збірних конструкцій, які піддаються тепловій обробці застосовують цементы 1 та 2-ої групи ефективності при пропарюванні (табл. 7.6).

У НДІЗалізобетону встановлена залежність міцності цементних розчинів і бетонів на цементах різного мінералогічного складу від часу теплової обробки ( $\tau$ ) у год. при температурі ізотермічної витримки 80°C. Теплової обробці

піддавалися зразки за режимом  $3+n+2$  год із попередньою витримкою 2 год, випробовували їх через 6 год. після вивантаження з камери. Встановлена залежність виражається формулою:

$$f_{cm} = A(\lg \tau - \lg \tau_0), \quad (7.6)$$

де  $A$  – параметр, що характеризує особливості даного цементу при пропарюванні й умови випробування, МПа;

$\tau$  – час теплової обробки в год, що включає період ізотермічної витримки  $n$  і частину періодів розігріву й охолодження, протягом яких температура зразків перевищує  $60^\circ\text{C}$ , у середньому  $\tau=n+3$ ;  
 $\tau_0$  – індукційний період тверднення, тобто період початку утворення міцної структури.

Таблиця 7.6

Групи цементів за ефективністю пропарювання

Групи за ефективністю пропарювання	Вид цементу	Границя міцності при стиску при пропарюванні для марок цементу, МПа			
		300	400	500	550-600
1	ПЦ	Більше 23	Більше 27	Більше 32	Більше 38
	ШПЦ	21	25	30	-
2	ПЦ	Від 20 до 23	Від 24 до 27	Від 28 до 32	Від 33 до 38
	ШПЦ	Від 18 до 21	Від 22 до 25	Від 26 до 30	-

**Примітка.** Загальна тривалість пропарювання 12...13 год. при температурі  $80^\circ\text{C}$ .

Як видно з табл. 7.7, при рівній кількості  $\text{C}_3\text{A}$  міцнісна характеристика цементів, які застосовуються в умовах пропарювання, підвищується зі збільшенням вмісту  $\text{C}_3\text{S}$  у клінкері. При рівній кількості аліту вона росте при зниженому вмісті  $\text{C}_3\text{A}$ , чим більше  $\text{C}_3\text{A}$ , тим коротший індукційний період. Максимальну швидкість тверднення і набір міцності в пропарювальних бетонах, мають цементи I групи, мінімальну III групи.

Параметри рівняння (7.6) для цементів різного мінералогічного складу наведені в табл. 7.7.

Таблиця 7.7

Параметри рівняння (7.6)

Група цементів	Номер цементів	Мінералогічна характеристика цементу	A, МПа	$\tau_0$ , год	Границя лінійності функції в год
I - низько- алюмінатні	1	$C_3A=2...3\%$ ; $C_3S=60\%$	12,5	0,6	20...25
	2	$C_3A=2...3\%$ ; $C_3S=50\%$	9,5	0,45	20
II - середньо- алюмінатні	3	$C_3A=8\%$ ; $C_3S=60...65\%$	10,0	0,15	9...10
	4	$C_3A=8\%$ ; $C_3S=50\%$	9,5	0,2	9...10
III - високо- алюмінатні	5	$C_3A=11...12\%$ ; $C_3S=55\%$	8,5	0,15	9
	6	$C_3A=11...12\%$ ; $C_3S=40...50\%$	7,0	0,18	7...8

Оптимальна тривалість ізотермічної витримки бетону при 80...90°C на цементах всіх груп, при перевищенні якої приріст міцності стає мінімальним, становить 4...12 год.

Нижче наведені рекомендовані оптимальні режими теплової обробки бетонів (підйом температури – ізотермічна витримка, охолодження в год.) на цементах різних мінералогічних груп:

I група –	3+12+2
II група –	3+6+2
III група –	3+4+2
Рядові шлако- портландцементи –	3+14+2
Швидкотверднучі шлакопортланд- цементи –	3+8+2

Більшість цементів (крім цементів III групи) при пропарюванні за оптимальними режимами забезпечують досить інтенсивне наростання міцності до 28 доби.

Поряд із вимогами до цементу в технічних умовах, які регламентують отримання конкретних конструкцій, можуть встановлюватися і специфічні вимоги до заповнювачів. Наприклад, для виготовлення бетонних і залізобетонних труб застосовують крупні заповнювачі з вмістом пилоподібних і глинистих частинок не більше 1%, зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми не більше 25%. Щебінь із природного каменю для бетону напірних і низьконапірних труб застосовують марки не нижче 1000, а щебінь із гравію марки за дробимістю не нижче 1000. Для бетону безнапірних труб щебінь із вивержених порід повинен мати марку не нижче 800, з осадових і метаморфічних – не нижче 600, щебінь із гравію марку за дробимістю – не нижче 800. У піску вміст пилоподібних і глинистих частинок допускається не більше 2% для бетону напірних труб і 3% – безнапірних і низьконапірних труб.

Потужним засобом для керування властивостями гідротехнічного бетону, як для масивних, так і для тонкостінних конструкцій різного призначення є хімічні добавки - модифікатори.

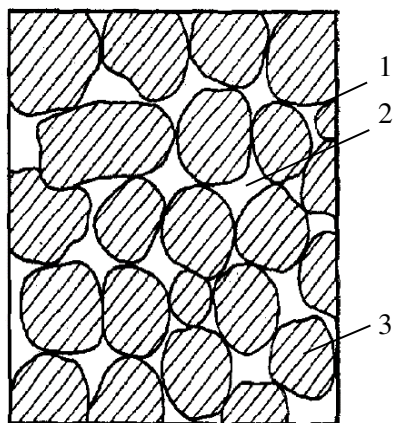
У гідротехнічному будівництві є позитивний досвід застосування *легких бетонів* із використанням пористих заповнювачів. У Вірменії з легких бетонів на основі літоїдної пемзи та вулканічного шлаку, починаючи з 1949 р., зведено конструкції акведуків, облицювання тунелів, каналів багатьох гідротехнічних споруд. Характерною рисою легких бетонів (особливо на пористих пісках) є підвищена міцність при розтягу. Цьому сприяє розвинена поверхня заповнювачів, яка викликає хороше зчеплення з цементним каменем. Відношення міцності на розтяг до міцності на стиск для важких бетонів становить 0,05...0,1, для легких – 0,06...0,17. Гранична розтяжність легких бетонів залежно від особливостей заповнювачів коливається у діапазоні 0,03...0,4 мм/м і може в 4...5 разів перевищувати значення цієї характеристики для важких бетонів.

Загальна усадка легких бетонів на 15...30 % вища усадки

важких бетонів. Усадочні деформації знижуються при застосуванні якісних заповнювачів, зменшенні витрати цементу та водовмісту.

При введенні повітрявтягувальних добавок морозостійкість легких бетонів можна довести до F300 і більше. Водонепроникність легких бетонів зазвичай не нижча, а для ряду складів може бути вищою, ніж важких.

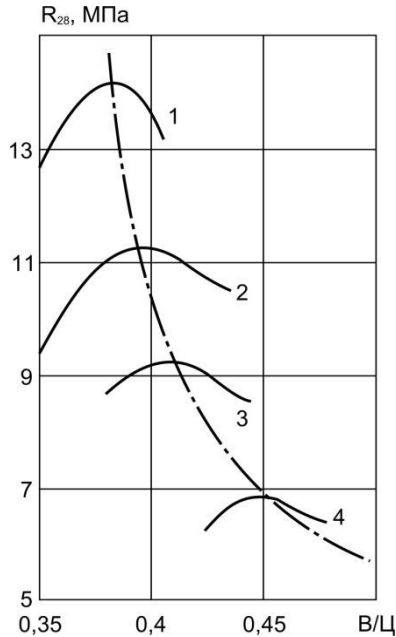
Для виконання облицювань осушувальних каналів, дренажів і фільтрів застосовують різновид легкого бетону – *крупнопористий бетон* – бетон, який отримують при відсутності в складі бетонної суміші піску й обмеженій витраті цементу, достатнього лише для склеювання зерен крупного заповнювача (рис. 7.3).



**Рис. 7.3.** Схема структури крупнопористого бетону:  
1 – прошарок цементного тіста; 2 – поровий простір;  
3 – заповнювач

Для отримання крупнопористого бетону застосовують як легкі пористі заповнювачі, так і звичайні важкі гравій або щебінь.

Середня густина крупнопористого бетону може змінюватися від 400 до 2000 кг/м<sup>3</sup>, його міцність, в основному, залежить як від кількості, так і міцності цементного каменю, що його складає. Остання визначається в основному активністю цементу і водоцементним відношенням (рис. 7.4).



**Рис. 7.4.** Залежність міцності крупнопористого бетону від водоцементного відношення:

- 1 – склад бетону (цемент: гравій за об'ємом) 1:6;  
 2 – те ж саме, 1:7; 3 – те ж саме, 1:8; 4 – те ж саме 1:10

Міцність крупнопористого бетону при стиску зазвичай становить 5...15 МПа, при більшій ніж у відповідних щільних бетонів міцності на розтяг. Морозостійкість крупнопористих бетонів при використанні різних заповнювачів становить 50...100 циклів.

## 7.2. Бетонополімери і полімерцементні бетони

Для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд із підвищеними вимогами до фізико-механічних характеристик ефективно застосування бетонополімерів, полімерцементних і полімерних бетонів, фібробетонів.

До *бетонополімерів* відносять бетони, просочені



полімерними речовинами або мономерами з подальшою їх полімеризацією. Бетонополімери входять у групу “П-бетонів”, що об’єднують різні різновиди бетонів, у яких використовуються полімери, як в якості добавки, так і основних компонентів.

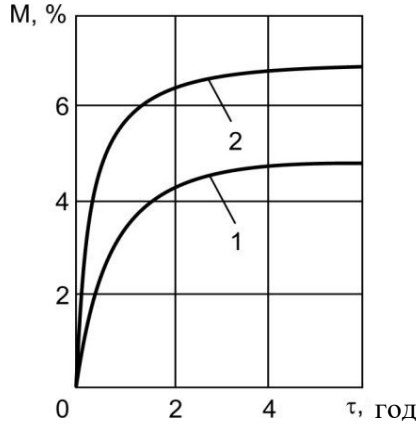
Бетонополімери поділяють залежно від виду матеріалу, що просочує: мономерів (стиролу, метилметакрилату та ін.), в’язких органічних матеріалів (парафіну та ін.), полімерних речовин.

До бетонополімерів за технологією і рядом властивостей близькі бетони, просочені сіркою і рідким склом.

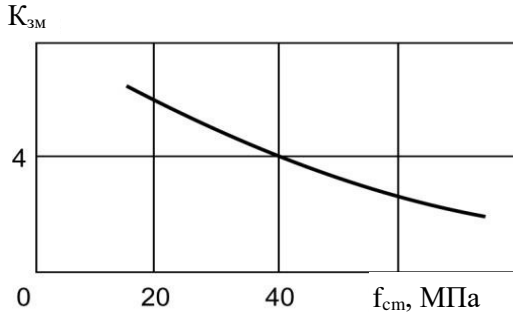
Бетонополімери отримують шляхом просочення попередньо висушеного бетону. Найпоширеніший конвективний спосіб сушіння бетону в струмині нагрітого повітря, при якому волога випаровується в результаті різниці парціальних тисків водяної пари на поверхні бетону й у середовищі теплоносія. Такий спосіб сушіння може викликати напруження, пов’язані зі температурними та вологісними градієнтами, появу тріщин. Можливе застосування радіаційного, контактного і високочастотного сушіння бетону.

Для більш повного видалення вологи з попередньо висушених виробів їх піддають вакуумуванню у спеціальних контейнерах. Монолітний бетон вакуумують за допомогою вакуум-щитів. Залишковий тиск при вакуумуванні, як правило, не перевищує 0,13 МПа і залежить від типу вакуум-насосів. Просочення бетону мономерами можливе при вакуумуванні, підвищеному або нормальному тиску (рис. 7.5). В останньому випадку необхідна тривалість просочення триває кілька годин, у той час як надлишковий тиск 0,1...1 МПа дає можливість скоротити її до 1...2 год.

При просоченні бетону змінюється його структура, у першу чергу суттєво зменшується відкрита капілярна пористість, ущільнюється контактна зона цементного каменю із заповнювачами. В результаті зменшується водопоглинання і суттєво зростає міцність, покращуються інші фізико-механічні властивості. При цьому, бетони більш низької міцності характеризуються більш високим коефіцієнтом зміцнення ( $K_{зм}$ ) (рис. 7.6).



**Рис. 7.5.** Кінетика просочення бетону мономером (М):  
 1 – капілярне просочення при нормальному тиску;  
 2 – просочення з вакуумуванням



**Рис. 7.6.** Вплив міцності бетону на коефіцієнт зміцнення бетонополімеру (K<sub>зм</sub>)

Пористість щільного бетону коливається в межах 6-20%, об'єм пор діаметром більше 1 мкм може досягати 2...3%. Зниження пористості бетону на 10% підвищує його міцність приблизно в 2 рази.

Особливості пористої структури матеріалу обумовлюють вибір складів просочуючих речовин і режимів обробки. Менш

в'язкі речовини можуть проникнути в більш тонкі пори і капіляри, однак з їх допомогою важко забезпечити омонолічування крупних пор і дефектів.

У табл. 7.8, 7.9 наведено порівняння властивостей вихідного бетону і бетону при просоченні метилметакрилатом із подальшою полімеризацією (за даними Ю.М. Баженова).

Таблиця 7.8

Властивості бетону і бетонополімеру

Показник	Вихідний бетон	Бетонополімер
Границя міцності, МПа: при стиску розтягу згині	30...50	100... 200
	2...3	6...19
	5...6	14...28
Модуль пружності при стиску, МПа	$2,5 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^4$
Гранична деформація при стиску	0,001	0,002
Міцність зчеплення з арматурою, МПа	1...2	10...18
Деформація усадки	$50 \cdot 10^{-5}$	$0 \dots 5 \cdot 10^{-5}$
Деформація повзучості	$(40 \dots 60) \cdot 10^{-5}$	$(6 \dots 8) \cdot 10^{-5}$
Електричний опір, Ом	$10^5$	$10^{14}$
Водопоглинання, %	3...5	1
Морозостійкість, цикли	200	5000
Корозійна стійкість до сульфатів і кислот	Недостатня	Висока

Повзучість і усадка бетонополімеру в декілька разів менша ніж вихідного бетону. Водопоглинання при повному просочуванні зменшується у 5...6 разів і досягає менше 1% за масою. Просочення бетону практично повністю виключає руйнуючий вплив на структуру бетону тиску льоду і гідравлічного тиску води, що призводить до відповідного підвищення стійкості матеріалу в умовах поперемінного

заморожування і відтавання. Просочений полімерами бетон не виявляє ознак руйнування у сульфатних, магнезійних, сольових і лужних середовищах, має значно більш високу кислотостійкість.

Таблиця 7.9

Вплив виду полімеру на міцність бетонополімеру

Вид полімеру	Витрата полімеру, %	Міцність, МПа				Модуль пружності, МПа·10 <sup>4</sup>	
		на стиск		на розтяг			
		Р	Т	Р	Т	Р	Т
Контрольний без полімеру	–	36,52		2,9		2,42	
Поліметил-метакрилат	4,6...6	140	126	11,3	10,5	4,37	4,3
Полістирол	4,2...6	97	61	7,6	5	4,37	3,6
Акрилонітрил	3,2...6	100	75	7,2	6	4,1	2,92
Хлорстирол	4,9...6,9	111	100	7,8	8,3	3,88	2,88

**Примітка:** Р – радіаційна полімеризація; Т – термокаталітична полімеризація.

Заповнення пор бетону полімерами призводить до суттєвого покращення зносостійкості при стиранні, кавітаційної стійкості, опору динамічним навантаженням.

Бетонополімери – перспективні матеріали для отримання високоміцних і високодовговічних виробів і конструкцій – труб, колон, плит водоскидів, елементів мостів, тунелів, деталей градирень, морських споруд.

*Полімерцементними* називаються бетони, які модифіковані полімерними добавками. Перший патент на застосування полімерцементу з добавкою латексу був виданий Крессону в 1923 р.

В якості полімерних добавок у цементних системах застосовують:

- еластомери – синтетичні каучуки (бутадієнстирольний, хлоропреновий, дивінілстирольний та ін.);
- термопласти (полівінілацетат, сополімери вінілацетату,

- полівінілхлоропрен та ін.);
- реактопласти (епоксидні, фуранові, поліефірні та ін.);
- водорозчинні смоли (диетиленгліколеві, сечовиноформальдегідні, ацетонформальдегідні та ін.).

Дисперсії еластомерів і термопластів у полімерцементні суміші вводять зазвичай у кількості 10...20% від маси цементу, водорозчинні смоли – 1...3%. Для запобігання коагуляції еластомерів при змішуванні їх із цементом необхідне введення стабілізаторів (гідрофільних колоїдів, електролітів). Водорозчинні смоли застосовують без або з отверджувачем і вводять у воду замішування.

Модифіковані цементні суміші відрізняються від звичайних підвищеною водоутримувальною здатністю, яка збільшується з ростом полімерцементного відношення. Більшій водоутримувальній здатності полімерцементних сумішей сприяють гідрофільність і колоїдні властивості полімерів. Це дає можливість значно покращити легкоукладальність, запобігати “висиханню”, досягати гарного зчеплення з пористими основами.

Рухомість полімерцементних сумішей збільшується як із збільшенням полімерводоцементного, так і полімерцементного відношення. У більшості модифікованих складів спостерігається значне повітровтягування через дію ПАР, що наявні в полімерних добавках у вигляді емульгаторів і стабілізаторів.

Тужавлення цементу в бетонах, модифікованих полімерною добавкою, зазвичай сповільнюється по мірі збільшення полімерцементного відношення, особливо при наявності у полімерах добавок ПАР, які сповільнюють процеси гідратації.

Підвищення міцності цементних бетонів на розтяг і їх деформативність – один із основних результатів введення полімерних добавок. При введенні добавок полівінілацетату (ПВА) і латексів можливе збільшення міцності при згині в 2...3 рази. Наявний також ріст граничної розтяжності та зчеплення з поверхнею старого бетону й арматури. Так, введення ПВА в якості добавки до розчинів підвищує розтяжність до 2 разів. Однак цей ефект відчувається лише в повітряно-сухих умовах тверднення. На відміну від ПВА добавки водорозчинних смол

позитивно впливають на розтяжність як при сухих, так і при водних умовах тверднення, хоча величина цього ефекту і менш значна.

Міцність при зсуві, що характеризує клеючу здатність при введенні полімерних добавок, збільшується в 3...8 разів. Суттєвим також є збільшення ударної міцності, стійкості до стирання, водонепроникності та корозійній стійкості.

За даними М. Брокарда полівінілацетатцементний бетон, що зберігався в умовах 50%-й вологості при полімерцементному відношенні (П/Ц) 0,05 мав у 3 рази більшу стійкість до стирання, ніж звичайний бетон. При П/Ц=0,1 і П/Ц=0,2 цей показник відповідно зростає у 12 та 20 разів.

Для полімерцементних матеріалів характерна підвищена усадка. При полімерцементному відношенні 0,15 для бетону з добавкою ПВА усадка приблизно на 25% вища усадки звичайного бетону. Величина усадки залежить насамперед від вмісту води в полімерній дисперсії, у меншій мірі від виду полімеру.

При зберіганні у воді зразки з бетону із добавкою ПВА набухають у кілька разів сильніше звичайних цементних бетонів. На відміну від полімерних дисперсій добавки водорозчинних смол призводять до помітного зниження деформацій усадки і набрякання. При підвищених дозах полімерів, особливо в умовах зволоження і підвищення температури, суттєво зростає повзучість.

Зниження пористості і заповнення пор полімерами, а також залученим повітрям призводить до підвищення морозостійкості бетонів.

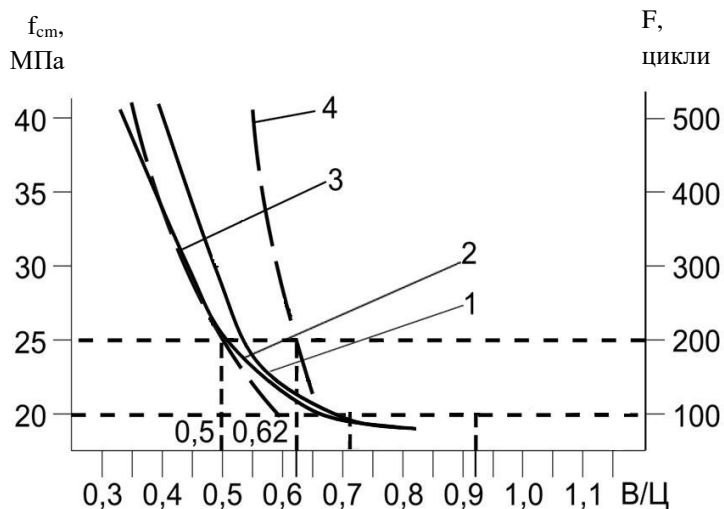
## 8. ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ ГІДРОТЕХНІЧНОГО БЕТОНУ

### 8.1. Загальна схема

Проектування складів бетону – важлива технологічна задача, яка включає обґрунтування виду і співвідношення вихідних компонентів бетонної суміші, що забезпечують задані проектні параметри якості бетону при прийнятих умовах оптимальності. Такі умови передбачають зазвичай досягнення мінімальної вартості бетону при відповідно оптимальних витратах матеріалів.

Задача проектування складу гідротехнічного бетону, як і інших спеціальних бетонів, відноситься до т.зв. *багатопараметричних задач*, коли, поряд з міцністю бетону при заданій легкоукладальності бетонної суміші, його склад повинен забезпечити комплекс інших не менш важливих властивостей: морозостійкість, водонепроникність, тріщиностійкість та ін. Відмінною рисою таких задач є необхідність знаходження визначальних значень параметрів складу бетонної суміші: цементно-водного відношення, витрати води, вмісту піску в суміші заповнювачів та ін., які дають можливість забезпечити весь комплекс нормованих властивостей при заданому критерії оптимальності. При цьому “ножиці”, що часто утворюються за основними параметрами суміші, які необхідні для досягнення певних властивостей, можна регулювати шляхом правильного вибору вихідних матеріалів і добавок. Зокрема, при достатній проектній міцності і підвищеній морозостійкості бетону “ножиці” за необхідним значенням В/Ц можна зменшити і перемістити у бік більших В/Ц шляхом введення за допомогою ПАР певного об’єму залученого повітря. Характерно, що значно збільшуючи можливе В/Ц для досягнення заданої морозостійкості, залучене повітря в той же час дещо зменшує необхідне В/Ц із умови міцності. Загальний позитивний ефект зменшення витрати цементу може бути досить значним особливо в бетонах із високими значеннями морозостійкості при помірному нормованому значенні міцності. З рис. 8.1, який

наведений в якості прикладу, слідує, що міцність бетону на стиск  $f_{cm}=20$  МПа і морозостійкість F200 забезпечуються на певних вихідних матеріалах без повітрявтягуючої добавки при В/Ц=0,5, із введенням втягнутого повітря – В/Ц=0,62. Забезпечення лише заданої міцності можливо при В/Ц, що наближається до 0,7.

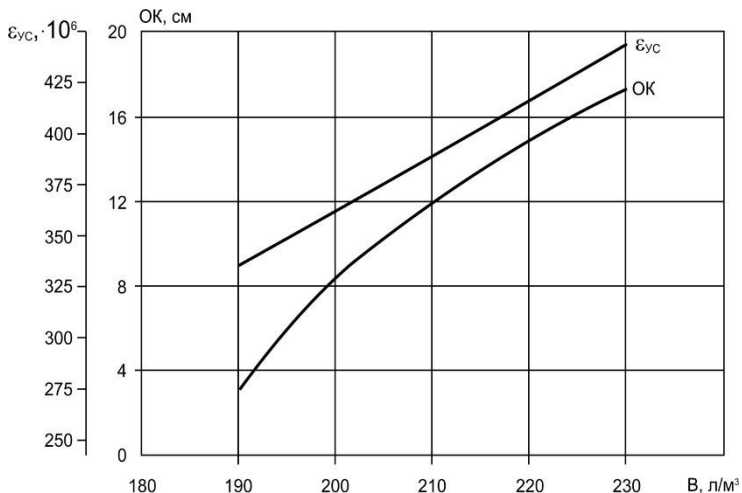


**Рис. 8.1.** Зміна В/Ц залежно від заданих значень міцності та морозостійкості бетону:

- 1 – крива  $f_{cm}$  без втягнутого повітря; 2 – із 20 л втягнутого повітря (міцність розрахована для  $R_{it}=50$  МПа);
- 3 – крива морозостійкості бетону без втягнутого повітря;
- 4 – із 20 л втягнутого повітря

Аналогічно, “ножиці” за витратою води утворюють, наприклад, показники легкоукладальності бетонної суміші та усадки бетону (рис. 8.2).





**Рис. 8.2.** Вплив водовмісту на рухомість бетонної суміші й усадку:

**Примітка.** Залежність ОК від В прийнята для рядових матеріалів; усадка бетону  $\epsilon_{yc}$  розрахована за формулою  $\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125B\sqrt{B}$

Загальна схема багатопараметричного проектування складу бетону (БПСБ) полягає в наступному:

1. З урахуванням проектних вимог до бетону, технологічних умов і техніко-економічного аналізу вибирають вихідні компоненти бетонної суміші і призначають її легкоукладальність.
2. У тих випадках, коли нормуються властивості бетону, які однозначно пов'язані з міцністю бетону при стиску ( $f_{cm}$ ), визначається її значення, що забезпечує всі задані властивості.
3. З урахуванням активності цементу, якісних особливостей заповнювачів, умов тверднення та інших факторів визначається Ц/В (або В/Ц), що забезпечує задані властивості.
4. Для досягнення нормованого показника легкоукладальності і при необхідності інших властивостей бетонної суміші та бетону (наприклад, усадки) при використанні даних вихідних матеріалів і добавок визначається витрата води (В). При цьому, у випадку виходу за межі діапазону Ц/В в якому діє правило постійної водопотреби, витрата води коректується із урахуванням Ц/В.

5. При нормуванні морозостійкості бетону розраховується необхідний об'єм емульгованого повітря і уточнюється необхідне Ц/В.
6. При знайдених значеннях В і Ц/В перевіряється можливість досягнення нормованих властивостей, які визначаються цими двома технологічними параметрами. У випадку недосягнення нормованих параметрів виконується додаткове коректування В і Ц/В із використанням при необхідності спеціальних технологічних заходів (введення добавок та ін.).
7. З урахуванням остаточно знайдених Ц/В і В розраховується витрата цементу і перевіряється виконання обмежень, пов'язаних з витратою цементу (тепловиділення, стійкість до корозії та ін.).
8. Визначається зерновий склад дрібного і крупного заповнювача при введенні кількох фракцій, а потім їх витрати. При виборі співвідношення заповнювачів поряд з досягненням найкращої легкоукладальності і міцності приймаються до уваги й інші умови (підвищена водонепроникність, товщина конструкції, ступінь армування та ін.).
9. Розглядається можливість використання різних технологічних рішень, спрямованих на економію цементу, зниження енерговитрат, зменшення вартості бетонної суміші.

Проектування складів бетону може виконуватись експериментальними і розрахунково-експериментальними методами. Експериментальні методи доцільні на стадії технологічної підготовки будівництва при великих об'ємах бетонних робіт. Розрахунково-експериментальні методи прискорюють підбір складів за рахунок використання емпіричних формул, табличних і графічних даних. Однак перед рекомендацією розрахункових складів виробництву вони повинні бути експериментально перевірені і, при необхідності, відкоректовані.

При будівництві великих гідровузлів проектною організацією визначаються і економічно обґрунтовуються джерела надходження цементу, заповнювачів і добавок. Роботи по проектуванню основних складів бетону повинні бути закінчені не пізніше ніж за півроку до початку бетонних робіт.

Число видів і марок цементу рекомендується відповідно до

“Правил виробництва бетонних робіт при зведенні гідротехнічних споруд” не більше двох, а число постачальників цементу, як правило, обмежується одним заводом.

Рухомість і жорсткість бетонної суміші, що укладається в монолітні конструкції, призначаються залежно від їх розмірів, густоти армування, способів транспортування і засобів ущільнення, які застосовуються (табл. 8.1).

Таблиця 8.1  
Рекомендовані значення рухомості бетонної суміші  
при її укладанні

Характеристика конструкцій	Осадка стандартного конуса, см
Масивні бетонні конструкції без робочої арматури	1...3
Масивні армовані конструкції з арматурою до 0,5%	3...6
Залізобетонні конструкції з арматурою до 1%	6...8
Залізобетонні конструкції з арматурою більше 1%	8...12

Для залізобетонних конструкцій із великою кількістю арматури (понад 1,5%) допускається застосування литих бетонних сумішей та сумішей, що самоущільнюються. При застосуванні для масивних конструкцій (внутрішні зони гравітаційних гребель та ін.) малоцементного бетону жорсткість бетонної суміші при укладанні не перевищує 20...30 с.

Мінімальна витрата цементу приймається відповідно до табл. 8.2.

Вибір максимальної крупності заповнювача залежить від розмірів перерізу конструкції і відстані між арматурними прутками. Верхня границя крупності заповнювачів у монолітному бетоні не повинна перевищувати 1/3 найменшого розміру конструкції, а в залізобетонних конструкціях – 3/4 найменшої відстані між прутками арматури. При подачі бетону пневмонагнітачами та бетононасосами найбільша крупність заповнювача не повинна перевищувати 1/2 найменшої відстані

між арматурними прутками. При бетонуванні плит кріплення укосів ґрунтових споруд і облицювань каналів вона не повинна перевищувати 1/3 їх товщини.

Таблиця 8.2

Мінімальна витрата цементу в бетоні

Вид конструкції	Умови експлуатації	Вид і витрата цементів		
		ПЦ-Д0 ПЦ-Д5 ССПЦ-Д0	ПЦ-Д20 ССПЦ-Д20	ШПЦ ССШПЦ ПуцПЦ
Неармовані	Без атмосферного впливу	Не нормується		
	При атмосферному впливі	150	170	170
Армовані з ненапруженою арматурою	Без атмосферного впливу	150	170	180
	При атмосферному впливі	200	220	240
Армовані з попередньо напруженою арматурою	Без атмосферного впливу	220	240	270
	При атмосферному впливі	240	270	300

**Примітки:** 1. ПЦ-Д0 і ПЦ-Д5 – портландцементи відповідно без мінеральних добавок і 5%-ним вмістом добавок, ССПЦ-Д0, ССПЦ-Д20 – сульфатостійкі портландцементи відповідно без добавок і з 20% активної мінеральної добавки; ШПЦ і ССШПЦ – відповідно шлакопортландцемент і сульфатостійкий шлакопортландцемент; ПуцПЦ – пуцолановий портландцемент. 2. Допускається виготовлення армованих бетонів з витратою цементу меншою мінімально допустимою при забезпеченні захисних властивостей бетону по відношенню до сталеві арматури.

Дозування складових бетонної суміші виконують за масою з точністю для цементу, води і добавок  $\pm 1\%$ , заповнювачів  $\pm 2\%$  (для малих бетонозмішувальних установок відповідно  $\pm 2\%$  і  $\pm 3\%$ ).

Також є рекомендації із граничних витрат цементу залежно від виду споруд (табл. 8.3).

Таблиця 8.3

Граничні витрати цементу залежно від виду споруд

Зони споруди	Витрата цементу		
	Масивні гра-вітаційні греблі	Аркові греблі	Збірні гідроспоруди
Греблі			
Бетон змінного рівня води і на водозливі	275	290	300
Бетон зовнішньої зони в підводних частинах	240	-	290
Бетон внутрішньої зони	160	-	-
Бетон аркових гребель	-	280	-
Бетон фундаментних частин у підшві гребель	230	240	250
Бетон зуба гребель	260	260	260
Інші частини споруди			
Рисберми	210	-	-
Понур	260	-	-
Днища шлюзів	250	-	-
Стінки шлюзів	240	-	-
Кріплення укосів:			
- у підводній частині	210	-	-
- у зоні змінного рівня води	250	-	-
Будівля ГЕС	270	-	-

**Примітка:** Граничні витрати цементу встановлені при умові обов'язкового застосування в бетоні відповідних поверхнево-активних добавок.

Залежно від умов експлуатації бетону в окремих частинах і зонах гідротехнічних споруд рекомендовані максимально допустимі величини водоцементного відношення (табл. 1.2, 1.3).

У табл. 8.4 для прикладу наведені основні склади бетону Братської ГЕС.

Таблиця 8.4

## Основні склади бетону Братської ГЕС

Склад бетону і його характеристики	Марки бетону			
	M100, W2	M200, W8	M200, W8, F250	M400, W12
Вид цементу	Шлакопортланд-цемент		Портландцемент	
Водоцементне відношення	0,80	0,55	0,50	0,40
Середня густина бетонної суміші, кг/м <sup>3</sup>	2440-2530	2420-2500	2450-2530	2400
Витрата на 1 м <sup>3</sup> бетону, кг:				
цемент	160	230	280	340
вода	128	126	140	136
добавка ССБ*	0,2% маси цементу			
дрібний пісок	284	270	-	-
крупний пісок	284	270	757	664
гравій фракції, мм:				
5-20	549	510	362	390
20-40	416	386	361	390
40-100	645-706	626- 706	361	521
щебінь фракції 40-100	} 645-706	626-706	550-635	-

\*ССБ – сульфітно-спиртова барда-добавка, що відноситься до групи технічних лігносульфонатів.

## 8.2. Експериментальний і розрахунково-експериментальний методи проектування складів бетонних сумішей

**Експериментальний підбір складів.** На першій стадії експериментального підбору складу бетону визначається співвідношення фракцій гравію (щебеню), що забезпечує їх найбільш щільну суміш. Орієнтовні співвідношення фракцій крупного заповнювача наведені в табл. 8.5, а рекомендовані значення частки піску – в табл. 8.6.

Таблиця 8.5

Орієнтовний вміст окремих фракцій у крупному заповнювачі

Найбільша крупність бетону, мм	Вміст фракцій, %				
	5...10 мм	10...20 мм	20...40 мм	40...70 мм	>70 мм
20	25...40	60...75	—	—	—
40	15...25	20...35	40...65	—	—
70	10...20	15...25	20...35	35...65	—
120	5...10	10...20	15...25	20...30	30...40

Таблиця 8.6

Рекомендовані значення частки піску (г) у суміші заповнювачів

Витрата цементу, кг/м <sup>3</sup>	Максимальна крупність зерен щебеню, гравію, мм	Модуль крупності піску	г при використанні	
			щебеню	гравію
250	20	1,5-2,0	0,35	0,33
		2,0-2,5	0,36	0,34
	40	1,5-2,0	0,34	0,33
		2,0-2,5	0,35	0,34
	70	1,5-2,0	0,33	0,32
		2,0-2,5	0,34	0,33
300	20	1,0-2,0	0,34	0,32
		2,0-2,5	0,35	0,33
	40	1,5-2,0	0,33	0,32
		2,0-2,5	0,34	0,33
	70	1,5-2,0	0,32	0,31
		2,0-2,5	0,33	0,32
350	20	1,0-2,0	0,32	0,30
		2,0-2,5	0,33	0,31
	40	1,5-2,0	0,31	0,30
		2,0-2,5	0,32	0,31
	70	1,5-2,0	0,31	0,30
		2,0-2,5	0,32	0,31
400	20	1,0-2,0	0,30	0,28
		2,0-2,5	0,31	0,29
	40	1,5-2,0	0,29	0,28
		2,0-2,5	0,30	0,29
	70	1,5-2,0	0,29	0,28
		2,0-2,5	0,30	0,29

**Примітка.** Наведені значення г рекомендуються для бетонної суміші з рухомістю 2 см. При збільшенні рухомості на кожні 2 см значення г збільшуються на 0,01.

Знаходиться водовміст (В), що забезпечує необхідну рухомість бетонної суміші й оптимальний вміст піску в суміші заповнювачів (г), коли при постійному вмісті цементного тіста і В/Ц досягається найбільша рухомість бетонної суміші. Для визначення водовмісту суміші використовують довідкові рекомендації, які уточнюються експериментально. Для визначення частки піску в суміші заповнювачів попередньо призначають В/Ц і виготовляють кілька бетонних сумішей з однаковою витратою цементу при різних значеннях г, які відрізняються на 0,02...0,03. Для орієнтовного призначення величини г можна використовувати табл. 8.6.

Після визначення частки піску і водовмісту, які забезпечують отримання бетонної суміші без розшарувань з необхідною рухомістю, дослідним шляхом уточнюється максимально допустиме водоцементне відношення, яке необхідне для досягнення комплексу необхідних властивостей бетону.

Витрату матеріалів на 1 м<sup>3</sup> бетону визначають методом абсолютних об'ємів у наступній послідовності:

$$\text{Витрата цементу кг/м}^3 : \text{Ц} = \frac{\text{В}}{\text{В/Ц}}, \quad (8.1)$$

$$\text{Об'єм цементного тіста, л/м}^3: \text{V}_{\text{ц.т}} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + \text{В}. \quad (8.2)$$

$$\text{Об'єм заповнювачів бетону, л/м}^3: \text{V}_3 = 1000 - \text{V}_{\text{ц.т}}. \quad (8.3)$$

Об'єм  $\text{V}_{\text{п}}$ , л/м<sup>3</sup> і маса  $\text{П}$ , кг/м<sup>3</sup> піску:

$$\text{V}_{\text{п}} = g\text{V}_3, \quad \text{П} = \rho_{\text{п}} \text{V}_{\text{п}}. \quad (8.4)$$

Об'єм  $\text{V}_{\text{щ}}$ , л/м<sup>3</sup> і маса  $\text{Щ}$ , кг/м<sup>3</sup>, крупного заповнювача:

$$\text{V}_{\text{щ}} = \text{V}_3 - \text{V}_{\text{п}}, \quad (8.5)$$

$$\text{Щ} = \rho_{\text{щ}} \text{V}_{\text{щ}}, \quad (8.6)$$

У наведених вище формулах  $\rho_{\text{ц}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$ ,  $\rho_{\text{щ}}$  – густина цементу ( $\rho_{\text{ц}} \approx 3,1$  кг/л), піску, щебеню чи гравію.



**Приклад 8.1.** При проектуванні бетону зони змінного рівня води гідротехнічної споруди, призначеної для роботи в помірних кліматичних умовах, дослідним шляхом було встановлено, що задані вимоги до бетону забезпечуються при наступних умовах:  $V/C=0,55$ ;  $r=0,34$ ;  $B=165 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_n \approx \rho_{щ} = 2,6 \text{ кг/л}$ .

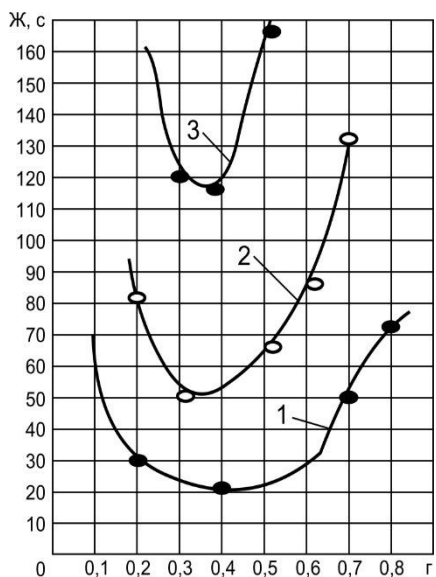
Визначаємо витрату матеріалів за формулами (8.1...8.6), у кг на  $1 \text{ м}^3$  бетону:  $C=165/0,55=300 \text{ кг/м}^3$ ;  $V_{ц.т}=300/3,1=96,8 \text{ л/м}^3$ ,  $V_{ц.т}=96,8+165=261,8 \text{ л/м}^3$ ;  $V_3=1000-261,8=738,2 \text{ л/м}^3$ ;  $V_{п.т}=738,2 \cdot 0,34=251 \text{ л/м}^3$ ;  $P=2,6 \cdot 251=652,6 \text{ кг/м}^3$ ;  $V_{щ}=738,2-251=487,2 \text{ л/м}^3$ ;  $\Pi=487,2 \cdot 2,6=1266 \text{ кг/м}^3$ .

Коректування складу бетонної суміші при введенні добавок полягає у визначенні оптимального дозування добавки, що забезпечує необхідний технологічний ефект із відповідно зміною витрати окремих компонентів. Після вибору оптимального дозування добавки перевіряється відповідність властивостей бетону проектним вимогам.

**Розрахунково-експериментальне проектування складів.** В практиці проектування складів важких цементних бетонів, включаючи гідротехнічні, найбільшого поширення набули методи, що використовують ряд відомих технологічних залежностей: міцності бетону від цементно-водного відношення, правило сталості водопотреби бетонних сумішей, правило оптимального вмісту піску та ін.

При вирішенні таких задач послідовно визначають значення цементно-водного відношення, витрату води з урахуванням необхідної рухомості або жорсткості бетонної суміші та витрату заповнювачів, використовуючи припущення про те, що об'єм бетонної суміші складається з абсолютних об'ємів усіх її складових. У найпростішому випадку для чотирьохкомпонентної суміші, необхідно, щоб були відомі три параметри: цементно-водне відношення ( $C/V$ ), витрата води ( $B$ ) і фактор, що характеризує співвідношення заповнювачів (частки піску в суміші заповнювачів ( $r$ ) або коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином ( $\alpha$ )). Останній фактор можна розглядати як оптимізуючий (рис. 8.3), тому що лише при деякому оптимальному його значенні, в

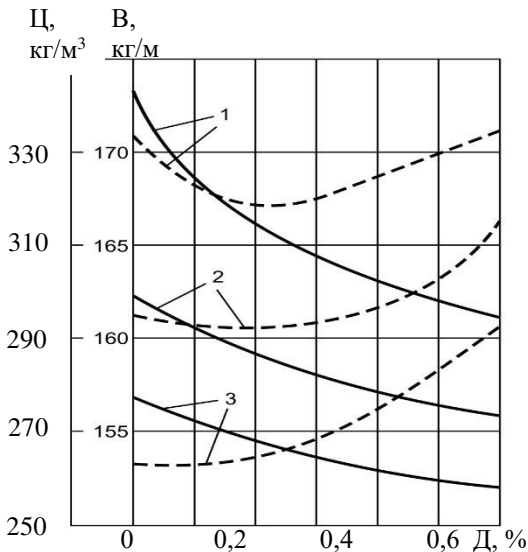
умовах  $C/V = \text{const}$ , можливе досягнення найкращої легкоукладальності і відповідно мінімальної водопотреби та витрати цементу. Для бетонної суміші з великою кількістю компонентів точний аналітичний пошук оптимального співвідношення заповнювачів є досить складною задачею. У таких випадках задача може бути розв'язана при використанні емпіричних залежностей або експериментально-статистичних моделей.



**Рис. 8.3.** Вплив частки піску в суміші заповнювачів на легкоукладальність бетонної суміші (за О.А. Гершбергом):  
 1. Номінальний склад 1:1 (цемент: суміш дрібного і крупного заповнювача). 2. Теж саме, 1:1.5. 3. Теж саме, 1:2

Оптимізуючим фактором також може служити витрата добавки. Зокрема добавки-пластифікатори дають можливість досягти мінімальної витрати цементу при їх оптимальній витраті (рис. 8.4), що залежить від необхідної рухомості суміші, міцності бетону та показників інших властивостей.

Застосування традиційного розрахунково-експериментального методу для проектування складів гідротехнічного бетону із заданою легкоукладальністю суміші і комплексом нормованих властивостей можливо при використанні обмежень по Ц/В у відповідності з відомими рекомендаціями (табл. 1.2, 1.3). Однак ці розрахунки не завжди повною мірою враховують взаємозв'язки між рядом нормованих показників властивостей бетону і Ц/В, а також іншими параметрами складу.



**Рис. 8.4** Вплив витрати пластифікуючої добавки ЛСТ на водопотребу бетонної суміші і витрату цементу:

———— водопотреба

----- витрата цементу

1 – Ж = 13 с; 2 – Ж = 20 с; 3 – Ж = 27 с

**Визначення Ц/В.** У практиці проектування складів для визначення Ц/В, що забезпечує задану міцність бетону при стиску, найбільш широко використовують єдину формулу:

$$f_{cn} = AR_y (C/B - 0,5), \quad (8.7)$$

де А – коефіцієнт, який уточнюється (табл. 8.7) залежно від ряду факторів.

Система розрахункового уточнення коефіцієнта А у формулі міцності розроблена В.П. Сизовим, який запропонував виражати його як алгебраїчну суму  $A + \sum \Delta A_i$ , де  $\sum \Delta A_i$  – сума поправок, які враховують показники рухомості чи жорсткості суміші, нормальну густоту цементу, модуль крупності піску, найбільшу крупність щебеню чи гравію, вміст у заповнювачах пилюватих та глинистих домішок.

Таблиця 8.7

Рекомендовані значення коефіцієнта А (за В.П. Сизовим)

Вид заповнювача	Вміст глини, пілу та мулу в щебені (гравію) і піску, %	Значення коефіцієнта А для бетону на		
		щебеню	гравію гірському	гравію річковому і морському
Щебінь (гравій) пісок	0 0	0,64	0,6	0,57
Щебінь (гравій) пісок	0 3	0,61	0,56	0,53
Щебінь (гравій) пісок	1 3	0,58	0,53	0,5
Щебінь (гравій) пісок	2 3	0,55	0,5	0,47
Щебінь (гравій) пісок	2 5	0,52	0,47	0,44

Додаткові можливості відкриваються при введенні у формулу міцності замість звичайного мультиплікативного коефіцієнта  $pA$ , яких можна представити у вигляді:

$$pA = A A_1 \dots A_i \dots A_n, \quad (8.8)$$

де  $A_i$  – коефіцієнт, що враховує додатковий вплив на міцність  $i$ -го фактора ( $i=1 \dots n$ ).

Введення мультиплікативного коефіцієнта у формулу міцності припускає, що всі множники  $A_i$  взаємозалежні. З огляду на те, що розрахункові значення міцності є лише базовими і підлягають експериментальному коректуванню, це допущення можна прийняти.

Звичайна технологічна інформація дає можливість врахувати в мультиплікативному коефіцієнті  $\rho A$ , крім коефіцієнта  $A$ , як правило до 2...3 додаткових коефіцієнтів  $A_i$ . Ступінь точності розрахунків залежить від рівня деталізації використовуваних коефіцієнтів. Наприклад, коефіцієнт  $A_\tau$ , що характеризує вплив тривалості нормального тверднення, приблизно можна знайти з відомої логарифмічної залежності:

$$A_\tau = \lg n / \lg 28 = 0,69 \lg n, \quad (8.9)$$

де  $n$  – тривалість тверднення, діб.

В той же час більш точні емпіричні значення цього коефіцієнта для кожного строку тверднення  $n$  можуть перебувати в досить широкій області, залежно від речовинного і мінералогічного складу цементів та інших факторів. Для бетону на звичайному й алітовому цементах у віці 7 діб, вони коливаються в діапазоні 0,60...0,75; 90 діб – 1,1...1,35; 180 діб – 1,3...1,5. При застосуванні шлако- і пуцоланового портландцементів емпіричні значення коефіцієнта  $A_\tau$  дорівнюють відповідно 0,4...0,6; 1,4...1,65; 1,4...2,0. Накопичена велика кількість експериментальних даних для врахування у формулі (8.7) впливу на міцність бетону різних хімічних добавок.

При розрахунку складу монолітного бетону, а також при врахуванні кінетики набору міцності, важливим фактором, що визначає міцність, є температурний режим тверднення.

Нижче приведене рівняння для коефіцієнта  $A$  при розрахунку складів бетону з урахуванням температури твердіння, яке нами отримане внаслідок обробки експериментальних даних С.А. Миронова для бетонів на портландцементі М 400:

$$A_{\tau,t} = -0,023 + 0,068\tau + 0,023t - 0,0016\tau^2 - 0,0003t^2 - 0,0001\tau t, \quad (8.10)$$

де  $\tau$  – строки тверднення, діб;  
 $t$  – середня температура бетону, °C ( $t=5\dots40^\circ\text{C}$ ).

**Приклад 8.2.** *Необхідно розрахувати В/Ц для отримання бетону з міцністю 20 МПа у віці 7 діб при температурах тверднення ( $t$ ) 10 і 30° С. Коефіцієнт  $A$  з врахуванням якості заповнювачів і інших факторів приймаємо 0,52, коефіцієнт  $A_{\tau,t}$  розраховуємо з рівняння (8.10). Активність використовуваного портландцементу  $R_u=40$  МПа.*

$$B / \text{Ц} = \frac{A_{\tau,t} AR_u}{f_{cm} + 0,5 A_{\tau,t} AR_u}. \quad (8.11)$$

$$\text{При } t = 10^\circ\text{C}, B / \text{Ц} = \frac{0,57 \cdot 0,52 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,57 \cdot 0,52 \cdot 40} = 0,46.$$

$$\text{При } t = 30^\circ\text{C}, B / \text{Ц} = \frac{0,89 \cdot 0,52 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,89 \cdot 0,52 \cdot 40} = 0,63.$$

Використання коефіцієнта  $A_{\tau,t}$  дає можливість розглядати приклад і при іншій постановці задачі, коли визначається очікувана міцність бетону у віці 7 діб ( $f_{cm7}$ ) при температурах тверднення 10 і 30°С, якщо він розрахований на міцність у 28 доби  $R_{28}=30$  МПа.

$$\text{При } t = 10^\circ\text{C}, f_{cm7} = 0,57 \cdot 30 = 17 \text{ МПа}.$$

$$\text{При } t = 30^\circ\text{C}, f_{cm7} = 0,89 \cdot 30 = 27 \text{ МПа}.$$

Для розрахунку Ц/В широко використовують формули, що запропоновані Б.Г. Скрамтаєвим і Ю.М. Баженовим, які відображають загальну нелінійність залежності  $f_{cm} = f(\text{Ц}/\text{В})$ :

- при  $\text{Ц}/\text{В} < 2,5$  ( $f_{cm} < 2AR_u$ ):

$$f_{cm} = AR_u (\text{Ц} / \text{В} - 0,5), \quad (8.12)$$

- при  $\text{Ц}/\text{В} \geq 2,5$  ( $f_{cm} \geq 2AR_u$ ):

$$f_{cm} = A_1 R_u (\text{Ц} / \text{В} + 0,5). \quad (8.13)$$

Значення коефіцієнтів  $A$  і  $A_1$  наведені нижче.

Матеріали для бетону	$A$	$A_1$
Високоякісні	0,65	0,43
Рядові	0,6	0,4
Зниженої якості	0,55	0,37

Багатьма авторами запропоновані й інші розрахункові формули для визначення  $C/B$ .

Додаткові можливості для розширення діапазону розв'язування задач відкриваються при використанні т.зв. “*приведеного  $C/B$* ”:

$$(C/B)_{np} = \frac{C + K_{ц.е} D}{B + V_{вп}}, \quad (8.14)$$

де  $K_{ц.е}$  – коефіцієнт т.зв. “цементуючої ефективності” добавок, тобто витрати цементу в кг, яку замінює 1 кг добавки;  $D$  – витрата добавки в кг/м<sup>3</sup>;

$C$  і  $B$  – відповідно витрати цементу і води в кг/м<sup>3</sup>;

$V_{вп}$  – об'єм втягнутого повітря в л/м<sup>3</sup>.

У цьому випадку формула (8.7) матиме вигляд:

$$f_{сн} = pA \cdot R_u \left( \frac{C + K_{ц.е} D}{B + V_{вп}} - 0,5 \right). \quad (8.15)$$

Перехід від “*приведеного*” до фактичного  $C/B$  можна здійснити по формулі:

$$C/B = (C/B)_{np} - \frac{K_{ц.е} D}{B + V_{вп}}. \quad (8.16)$$

Коефіцієнт “цементуючої ефективності” легко визначити за експериментальними даними для рівномісних бетонів за формулою:

$$K_{ц.е} = \frac{C_1 - C_2}{D}, \quad (8.17)$$

де  $C_1$  – витрата цементу в бетоні без добавок;

$C_2$  – витрата цементу в бетоні з добавками;

$D$  – витрата добавки.

“Цементуюча ефективність” активних мінеральних добавок є функцією багатьох факторів, які характеризують їх склад, структуру, дисперсність, умови тверднення, вік бетону та ін. Вона залежить і від виду застосованого цементу.

При відхиленні значення  $D$  від оптимального, величина  $K_{ц,е}$  знижується, вона може переходити через нульове і набувати навіть від’ємного значення.

Орієнтовні значення рекомендованої витрати кам’яновугільної золи-виносу і її  $K_{ц,е}$  наведені в табл. 8.8, 8.9.

Таблиця 8.8

Рекомендована витрата золи-виносу у важких бетонах

ОК, см	Марка цементу	Витрата золи, кг/м <sup>3</sup> для бетонів	
		пропареного	нормального тверднення
1...4	400	170	150
	500	180	150
5...9	400	190	170
	500	200	180
10...14	400	210	190
	500	215	200

Таблиця 8.9

Значення коефіцієнта “цементуючої ефективності” ( $K_{ц,е}$ )  
кам’яновугільної золи-виносу\*

Клас бетону за міцністю	Коефіцієнт $K_{ц,е}$ для бетону			
	пропареного	нормального тверднення при марці цементу		
		600	500	400
C8/10	0,40	0,40	0,38	0,31
C12/15	0,40	0,34	0,28	0,20
C16/20	0,37	0,32	0,25	0,18
C20/25	0,33	0,29	0,22	0,15
C25/30	0,25	0,22	0,16	0,10
C30/37	0,20	0,18	0,13	0,08

\* Розроблені при використанні золи Бурштинської ТЕС.

Застосування “приведеного” Ц/В раціонально, особливо, для розрахунку складів бетонів з обмеженою витратою цементу при введенні дисперсних мінеральних добавок. При врахуванні



об'єму пор заповнювачів воно ефективно також для розрахунку складів легких бетонів.

У формулі (8.15) пропонується враховувати об'єм втягнутого в бетонну суміш повітря заповнювачами, добавками, у процесі ущільнення і т.д. Враховуючи те, що величина  $(Ц/В)_{пр}$  повинна бути безрозмірним показником,  $V_{вп}$  можна умовно прирівняти до маси води, яка при нормальних умовах займає об'єм рівний об'єму втягнутого повітря. Об'єм повітря, як еквівалент надлишкової води в бетонній суміші вперше введений у формулу міцності бетону Р.Фере. Очевидно, що прирівнювання об'єму втягнутого повітря до еквівалентного об'єму води фізично припустимо, оскільки як надлишкова вода, так і залучене повітря формують у бетоні пори, що знижують міцність.

Зниження міцності бетону на стиск, розраховане за формулою (8.15), за рахунок введення кожних 10 л. повітря становить 5...6%, що відповідає експериментальним даним, отриманим при вмісті залученого повітря в бетоні від 1 до 10%.

Залежності типу  $P_i = f(R_c, Ц/В)$  можуть застосовуватися для розрахунку всіх показників властивостей ( $P_i$ ), які також як і міцність при стиску однозначно пов'язані із щільністю цементного каменю і відповідно  $В/Ц$  або  $Ц/В$ . У табл. 8.10 поряд із відомими формулами, які пов'язують різні властивості бетону з міцністю при стиску наведені формули типу  $P_i = AR_y (Ц/В + b)$ , отримані при статистичній обробці експериментів із використанням портландцементу марок 400 і 500, гранітного щебеню крупністю 5...20 мм і кварцового піску з модулем крупності 1,7...1,8 при зміні  $Ц/В$  від 1 до 2,5. Всі показники властивостей випробовували за стандартизованими методиками у віці 28 діб.

Аналіз розрахункових даних, отриманих за формулою загального виду (8.7), і формулами, які пов'язують дані властивості з міцністю при стиску, показує їх хорошу збіжність.

Таблиця 8.10

Розрахункові значення показників властивостей бетону  
(портландцемент М500, Ц/В=1,7)

Властивість бетону	Розрахункові формули	Показник властивості	Середнє відхилення розрахункових показників, %
Міцність бетону на розтяг при згині ( $f_{ctf}$ ), МПа	$f_{ctf} = 0,08(10 f_{cm})^{2/3}$	4,06	2
	$R_{ctf} = 0,045R_y (Ц/В + 0,064)$	3,97	
Міцність бетону на розтяг при розколюванні ( $f_{ctm}$ ), МПа	$f_{ctm} = 0,055(10 f_{cm})^{2/3}$	2,79	2
	$f_{ctm} = 0,031R_y (Ц/В + 0,064)$	2,73	
Міцність бетону при осьовому розтягу ( $f_{ct}$ ), МПа	$R_{ct} = 0,046(10 f_{cm})^{2/3}$	2,33	2
	$f_{ct} = 0,026R_y (Ц/В + 0,064)$	2,29	
Динамічний модуль пружності ( $E_d$ ), $10^4$ МПа	$E_d = \frac{4 \cdot 10^3 f_{cm}}{1 + 0,07 f_{cm}}$	4,1	3
	$E_d = 205R_y (Ц/В + 2,18)$	4,0	
Умовна деформативність ( $\varepsilon_y$ ) $10^{-6}$	$\varepsilon_y = f_{ctm} / E_d$	6,8	6
	$\varepsilon_y = 4 \cdot 10^{-6} R_y (Ц/В + 1,5)$	6,4	

При розрахунку складів гідротехнічних бетонів із комплексом нормованих властивостей доцільно використовувати також відомі емпіричні залежності, що пов'язують показники даних властивостей із параметрами складу бетонної суміші. Вибір таких залежностей варто виконувати з урахуванням постановки задачі і наявності відповідних експериментальних даних. Так, як показали наші дослідження при використанні середньоалюмінатного портландцементу з вмістом доменних шлаків до 20%, середньозернистого кварцового піску і гранітного щебеню для досить широкого діапазону складів морозостійкості

бетону апроксимується формулою виду:

$$F = A_1 f_{cm}^{A_2} \exp^{A_3 V_{вп}}, \quad (8.18)$$

де  $A_3 \approx 0,35$ ,  $A_1$  і  $A_2$  – коефіцієнти, значення яких змінюється зі зміною водовмісту і відповідно рухомістю бетонної суміші;

$f_{cm}$  – міцність бетону при стиску, МПа;

$V_{вп}$  – об'єм втягнутого повітря.

Необхідний об'єм втягнутого повітря у % з рівняння (8.18) можна визначити за формулою:

$$V_{вп} = \frac{\ln\left(\frac{F}{A_1 f_{cm}^{A_2}}\right)}{0,35}. \quad (8.19)$$

В якості емпіричних залежностей можна використати і поліноміальні математичні моделі, отримані при статистичній обробці експериментальних даних, що одержані із застосуванням факторного планування.

**Визначення витрати води.** Водопотреба – одна з найважливіших технологічних властивостей бетонних сумішей, яка однозначно пов'язана з їх легкоукладальністю і суттєво впливає на ряд технічних властивостей затверділого бетону.

У практиці проектування складів бетону водопотребу бетонних сумішей визначають зазвичай по усередненому емпіричному даним за допомогою графіків або таблиць (табл. 8.11), які пропонують деякі базові значення витрати води в л/м<sup>3</sup> залежно від показників рухомості і жорсткості суміші та уточнення залежно від особливостей вихідних матеріалів.

При цьому широко використовується *правило сталості водопотреби*, відповідно до якого витрата води для досягнення необхідної легкоукладальності суміші в певному діапазоні витрати цементу чи Ц/В залишається практично постійною.

Таблиця 8.11

Орієнтовна витрата води ( $B_0$ ) залежно від виду та крупності заповнювачів і легкоукладальності бетонної суміші

Легкоукладальність		Витрата води, л/м <sup>3</sup> при максимальній крупності заповнювача, мм			
Осадка конуса, см	Жорсткість, с	10	20	40	70
16...20	-	237	228	213	202
12...16	-	230	220	207	195
10...12	-	225	215	200	190
8...10	-	215	205	190	185
5...7	-	210	200	185	180
2...4	-	200	190	175	170
-	10...15	185	175	160	155
-	15...20	175	165	150	145
-	25...35	170	160	145	140
-	40...50	160	150	135	130

**Примітки:** 1. При збільшенні вмісту в щебені мулу та пилу понад 1% і частинок менше 5 мм вище 5% витрата води збільшується на 1...2 л на кожний відсоток. При збільшенні вмісту в піску мулу та пилу більше 3% – на 2 л/м<sup>3</sup> на кожний відсоток. 2. Витрата води замішування наведена для бетонних сумішей, виготовлених на щебені з магматичних порід. Для бетонів на гравії витрата води зменшується на 10 л/м<sup>3</sup>.

3. Витрата води дана для бетонних сумішей на портландцементі з нормальною густиною цементного тіста 26-28 %, і середньозернистому піску ( $M_k=2-2,5$ ) без пластифікуючих добавок. При зміні нормальної густоти цементного тіста на кожний відсоток у бік зменшення витрата води зменшується на 3-5 л, у бік збільшення – збільшується на 3-5 л. При зміні модуля крупності піску на кожні 0,5 у бік зменшення витрата води збільшується на 3-5 л, у бік збільшення – зменшується на 3-5 л.

Поряд із графічними та табличними рекомендаціями для орієнтовного розрахунку витрати води запропоновано різні рівняння регресії. Так, І.М. Грушко запропоновані рівняння водопотреби бетонних сумішей для рухомих ( $B_0$ ) і жорстких ( $B_0^1$ ) бетонних сумішей із урахуванням питомої поверхні щебеню ( $S_{щ}$ , м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>), водопотреби піску ( $B_{п}$ , %) і нормальної густоти цементу (НГ,%):

$$B_0 = 60 + 4OK + 0,07S_{uc} + 5B_n + 1,5HG, \quad (8.20)$$

$$B'_0 = (60 + 0,07S_{uc} + 5B_n) \frac{1,38}{\sqrt[9]{Ж}}. \quad (8.21)$$

Питому поверхню в м<sup>2</sup> на 1 м<sup>3</sup> крупного заповнювача, ущільненого протягом хвилини на стандартному вібростолі (S<sub>ш</sub>), визначають за формулою:

$$S_{uc} = K \frac{\rho_{ош}}{\rho_{uc}} (a_{40} + 2a_{20} + 4a_{10} + 8a_5), \quad (8.22)$$

де K – коефіцієнт, що характеризує вплив форми зерен щебеню чи гравію. При вмісті зерен лещадної форми у щебені менше 15% K=1,5, менше 30% K=1,6, більше 30% K=1,7. Для гравію K=1,0...1,25;

$\rho_{ош}$  і  $\rho_{uc}$  – відповідно насипна та істинна густина крупного заповнювача, кг/м<sup>3</sup>;

a<sub>40</sub>, a<sub>20</sub>, a<sub>10</sub>, a<sub>5</sub> – залишки у % на ситах 40, 20, 10 і 5 мм.

Остаточне корегування необхідної витрати води для досягнення заданого показника легкоукладальності повинно виконуватися в процесі виробничої адаптації складів. Задача розрахунку витрати води полягає у врахуванні найбільш значимих факторів, до числа яких можна віднести і ефект впливу пластифікуючих добавок, якщо такі вводяться. У табл. 8.12 приводяться значення поправочних коефіцієнтів до розрахункового водовмісту бетонних сумішей, отриманих на рядових матеріалах при введенні пластифікатора ЛСТ і суперпластифікатора С-3.

Знання необхідного цементно-водного відношення і витрати води дає можливість легко розрахувати необхідну витрату цементу на 1 м<sup>3</sup> бетонної суміші:

$$Ц = B \cdot (Ц / B). \quad (8.23)$$

Таблиця 8.12

Значення поправочних коефіцієнтів до розрахункового в'язності бетонних сумішей при використанні пластифікуючих добавок

Рухомість, см	Жорсткість, с	Цементно-водне відношення				
		1,4	1,8	2,2	2,6	3,0
-	5...20	<u>0,96</u>	<u>0,95</u>	<u>0,94</u>	<u>0,93</u>	<u>0,92</u>
		0,88	0,85	0,83	0,81	0,80
1...4	-	<u>0,93</u>	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	<u>0,91</u>
		0,86	0,84	0,82	0,80	0,79
5...9	-	<u>0,91</u>	<u>0,91</u>	<u>0,90</u>	<u>0,90</u>	<u>0,89</u>
		0,82	0,80	0,79	0,78	0,77
10...16	-	<u>0,90</u>	<u>0,89</u>	<u>0,88</u>	<u>0,87</u>	<u>0,87</u>
		0,80	0,78	0,77	0,76	0,75

**Примітка.** У чисельнику наведені значення при застосуванні добавок типу ЛСТ 0,25% маси цементу, у знаменнику – С-3 0,7% маси цементу.

**Визначення витрати заповнювачів.** Однієї з основних задач оптимізації складів бетону є визначення співвідношення заповнювачів, що забезпечує мінімальну витрату цементу. У бетоні із заданими показниками міцності та легкоукладальності вибір співвідношення дрібного і крупного заповнювачів оснований на *правилі оптимального вмісту піску*, відповідно до якого при заданій витраті цементного тіста бетонна суміш має найкращу легкоукладальність або відповідно найменшу водопотребу лише при певній витраті піску.

Для розрахунку співвідношення дрібного (П) і крупного (Щ) заповнювачів у бетоні використовують кілька параметрів. Одним з них є *об'ємне відношення заповнювачів*  $r'$ :

$$r' = V_n : V_{щ} = \frac{P\rho_{щ}}{Щ\rho_n}, \quad (8.24)$$

де  $V_n$  і  $V_{щ}$  – абсолютні об'єми;

$\rho_n$  і  $\rho_{щ}$  – густини дрібного і крупного заповнювачів, кг/м<sup>3</sup>.

При застосуванні в якості заповнювача кварцового піску і щебеню чи гравію із щільних порід, враховуючи, що  $\rho_{щ} \approx \rho_n$  можна

з достатньою для практики точністю приймати  $r' = \Pi / \text{Щ}$ .

Більш часто використовується параметр  $r$  – об'ємна частка дрібного заповнювача в суміші дрібного і крупного заповнювачів:

$$r = \frac{\Pi / \rho_n}{\Pi / \rho_n + \text{Щ} / \rho_{\text{ц}}}. \quad (8.25)$$

Параметри  $r'$  і  $r$  пов'язані співвідношенням  $r = \frac{r'}{1 - r'}$  або

$$r' = \frac{r}{1 + r}.$$

Знаючи необхідні об'єми цементного тіста ( $V_{\text{ц.т}}$ ) і залученого повітря ( $V_{\text{зп}}$ ), можна легко визначити абсолютний об'єм суміші заповнювачів ( $V_3$ ) ( $V_3 = 1000 - \text{Ц} / \rho_{\text{ц}} - \text{В} / \rho_{\text{в}} - V_{\text{зп}}$ ), а потім необхідні витрати дрібного та крупного заповнювачів:

$$V_n = V_3 \cdot r; \quad V_{\text{ц}} = V_3 - V_n, \quad (8.26)$$

або

$$V_{\text{ц}} = \frac{V_3}{1 + r'}; \quad V_n = V_3 - V_{\text{ц}}. \quad (8.27)$$

Витрати дрібного та крупного заповнювачів за масою:

$$\Pi = V_n \rho_n; \quad \text{Щ} = V_{\text{ц}} \rho_{\text{ц}}. \quad (8.28)$$

У широко застосовуваних розрахунково-експериментальних методах проектування складів бетону для визначення витрат піску і щебеню передбачається використання коефіцієнта заповнення порожнин і розсунення зерен щебеню (гравію) цементно-піщаним розчином –  $\alpha$ . Цей коефіцієнт (*коефіцієнт розсунення*) справедливий при допущенні, що бетонну суміш можна представити як двофазну систему, яка складається із крупного заповнювача у насипному стані і цементно-піщаного розчину. У цьому випадку формулюється умова:

$$\frac{B}{\rho_в} + \frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{П}{\rho_п} = \alpha P_{щ} \frac{Щ}{\rho_{н.щ}}, \quad (8.29)$$

де  $P_{щ}$  – пустотність крупного заповнювача;  
 $\rho_{н.щ}$  – його насипна густина;  
 $\rho_в, \rho_ц, \rho_п$  – густина відповідно води, цементу та піску.

Параметри  $r$  і  $\alpha$  взаємопов'язані:

$$\alpha = \frac{(V_{ц.т} + rV_з)}{(1 - r)P_з V_з}, \quad (8.30)$$

де  $V_{ц.т}$  – об'єм цементного тіста;  
 $P_з$  – пустотність суміші заповнювачів.

Витрати крупного і дрібного заповнювачів можна легко знайти рішенням системи 2-х рівнянь матеріального балансу. Перше рівняння в системі (8.31) відображає абсолютний об'єм бетонної суміші як суму абсолютних об'ємів компонентів, що входять до неї, друге – відповідність об'єму цементно-піщаного розчину об'єму порожнин крупного заповнювача з урахуванням необхідного розсунення для забезпечення заданої легкоукладальності суміші:

$$\frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{B}{\rho_в} + \frac{П}{\rho_п} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} = 1000$$

$$\frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{B}{\rho_в} + \frac{П}{\rho_п} = \alpha P_{щ} \frac{Щ}{\rho_{н.щ}}, \quad (8.31)$$

де  $\rho_ц, \rho_в, \rho_п$  і  $\rho_{щ}$  – істинна густина відповідно цементу, води, дрібного та крупного заповнювачів, кг/л;  
 $P_{щ}$  – пустотність крупного заповнювача;  
 $\rho_{н.щ}$  – його насипна густина, кг/л.

Коефіцієнт розсунення  $\alpha$  визначають за довідковим даними (табл. 8.13).

При рішенні системи рівнянь (8.31) також при необхідності може враховуватися повітря, що знаходиться в бетонній суміші.



Таблиця 8.13

Коефіцієнт розсушення  $\alpha$  (для пластичних бетонних сумішей)

Витрата цементу, кг/м <sup>3</sup>	Значення $\alpha$ при В/Ц					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	–	–	–	1,26	1,32	1,38
300	–	–	1,3	1,36	1,42	–
350	–	1,32	1,38	1,44	–	–
400	1,31	1,4	1,45	–	–	–
500	1,44	1,52	–	–	–	–
600	1,52	1,56	–	–	–	–

**Примітки. 1.** Таблиця складена для пісків з водопотребою  $V_n=7\%$ . При збільшенні  $V_n$  на кожен відсоток  $\alpha$  зменшується на 0,03, а при зниженні  $V_n$  зростає відповідно на 0,03. **2.** Для жорстких бетонних сумішей ( $C < 400$  кг/м<sup>3</sup>)  $\alpha=1,05\dots 1,15$ .

В результаті рішення системи (8.31) знаходимо рівняння для знаходження витрат щебеню (гравію) та піску:

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{щ}} + \frac{\alpha P_{щ}}{\rho_{н.щ}}}, \quad (8.32)$$

$$П = (1000 - Ц / \rho_{ц} - В / \rho_{в} - Щ / \rho_{щ}) \rho_{п}. \quad (8.33)$$

При розрахунку складів гідротехнічного бетону при необхідності використовується ряд додаткових емпіричних залежностей. Деякі з них наведені в табл. 8.14.

Таблиця 8.14

Емпіричні залежності для розрахунку складів  
гідротехнічних бетонів

Властивості бетону	Формула	Умовні позначення
Водонепроникність	$K_{\phi} = Af_{cm}^m$ (8.34) $A \approx 126, m \approx 7,7$	$K_{\phi}$ – коефіцієнт фільтр-рації; $f_{cm}$ – міцність бетону при стиску, МПа
Тепловиділення, кДж/м <sup>3</sup>	$Q = \frac{c\rho_0}{K} (t_{кр} - t_{б.н})$ (8.35)	$c$ – питома теплоємність бетону кДж/кг.град; $\rho_0$ – середня густина бетону, кг/м <sup>3</sup> ; $t_{кр}$ і $t_{б.н}$ – відповідно критичне значення температури і початкова температура, °С; $K$ – коефіцієнт, що залежить від умов охолодження бетону.
	$Q = q_{\tau} C$ (8.36)	$q_{\tau}$ – питома тепловиділення цементу при заданих значеннях тривалості і температури тверднення, кДж/кг;
Питома тепловиділення цементу, кДж/кг у віці 7 діб	$q_{\tau} = 26,15R_u^{2/3}$ (8.37)	$R_u$ – активність цементу, МПа
Критерій термічної тріщинистості	$K_m \approx 23 \cdot 10^8 \frac{\varepsilon_{np}}{Q}$ (8.38)	$E_{гр}$ – гранична розтяжність бетону
Усадка бетону	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125B\sqrt{B}$ (8.39)	$B$ – водовміст бетонної суміші, л/м <sup>3</sup>

В табл. 8.15, 8.16, 8.17 наведені приклади можливих алгоритмів розрахунків складів гідротехнічного бетону залежно від заданих умов.

Таблиця 8.15

Схема алгоритму проектування складів немасивного гідротехнічного бетону з заданою морозостійкістю

1. Визначають необхідний середній рівень міцності ( $f_{cm_1}$ ) бетону, що забезпечує заданий клас бетону за міцністю на стиск.
2. Визначають міцність бетону на стиск ( $f_{cm_2}$ ), що забезпечує значення інших нормованих властивостей бетону.
3. Для подальшого розрахунку вибирають порівнянням  $f_{cm_1}$  і  $f_{cm_2}$  більше значення міцності бетону на стиск.
4. За формулою  $V_{n.в} = \ln\left(\frac{F}{A_1 f_{cm} A_2}\right) / 0,35$ , ( $F$  – марка бетону за морозостійкістю;  $f_{cm}$  – міцність бетону на стиск, МПа;  $A_1$  і  $A_2$  – коефіцієнти) або нормованих рекомендацій визначають об'єм втягнутого (емульгованого за допомогою повітрявтягувальної добавки) повітря  $V_{n.в}$ , що забезпечує при заданій міцності необхідну марку за морозостійкістю. З цією метою можуть бути застосовані і нормативні рекомендації.
5. Уточнюють необхідне значення міцності бетону з урахуванням впливу втягнутого повітря.
6. Розраховують В/Ц бетонної суміші, що забезпечує необхідну міцність бетону на стиск.
8. Знаходять витрату води з урахуванням легкоукладальності бетонної суміші й особливостей заповнювачів.
9. Визначають витрату цементу та інших компонентів бетонної суміші.

Таблиця 8.16

Схема алгоритму проектування складів масивного гідротехнічного бетону з обмеженням температури розігріву

1. Визначають середній рівень міцності бетону в проектному віці та в 28 діб.
2. Розраховують В/Ц бетонної суміші, що забезпечує задану міцність бетону на стиск.
3. Визначають витрату води для забезпечення заданої легкоукладальності бетонної суміші.
4. Визначають витрату цементу.
5. З урахуванням питомого тепловиділення і витрат цементу знаходять тепловиділення бетону ( $Q_{\tau}$ ).
6. Визначають необхідну температуру укладання бетонної суміші ( $t_{\bar{o}.n}$ ). З цією метою застосовують формулу:

$$t_{\bar{o}.n} \leq t_{\bar{o}.кр} - K \frac{Q_{\tau}}{c\rho_o}, \quad (8.40)$$

де  $t_{\bar{o}.кр}$  – лімітоване значення температури бетону для визначеного терміну тверднення (температура розігріву);

$c$  – питома теплоємність бетону;

$\rho_o$  – середня густина бетону,  $\text{кг/м}^3$ ;

$K$  – коефіцієнт, що залежить від умов охолодження ( $K=0,8\dots 1,0$ ).

7. Витрату заповнювачів знаходять, визначивши коефіцієнт розсушення  $\alpha$  залежно від витрати цементу і В/Ц.

8. При необхідності визначають можливі технологічні рішення для досягнення розрахункової температури вкладання бетонної суміші.

Схема алгоритму проектування складів гідротехнічного бетону з обмеженням ступеня вилуговування

1. Визначають необхідну витрату цементу, що забезпечує несучу здатність бетону при допустимому ступені вилуговування:

$$Ц = \frac{Q_{CaO}}{\alpha_v q_{CaO} L}, \quad (8.41)$$

де  $Q_{CaO}$  – кількість оксиду кальцію в розрахунку на 1 см<sup>2</sup> поверхні, що може бути винесена з бетону без втрати їм несучої здатності, г/см<sup>3</sup>;

$\alpha_v$  – допустима ступінь вилуговування CaO із цементу;

$q_{CaO}$  – вміст оксиду кальцію на 1 г цементу;

$L$  – товщина конструкції, м.

2. Знаходять необхідний коефіцієнт фільтрації бетону:

$$K_\phi = \frac{Q_{CaO} L}{C_{CaO} H \tau}, \quad (8.42)$$

де  $C_{CaO}$  – середня концентрація CaO в цементі за час вилуговування, г/см<sup>3</sup>;

$H$  – напір води, м;

$\tau$  – розрахунковий термін служби споруди, роки.

3. Визначають міцність бетону, необхідну для забезпечення розрахункового коефіцієнта фільтрації:

$$f_{cm} = \left( \frac{K_\phi}{126} \right)^{-0.13}. \quad (8.43)$$

4. Визначають необхідне  $B/C$  для забезпечення розрахункової міцності бетону.

5. Визначають витрату води і заповнювачів бетону.

**Коректування складу бетону.** Можливі відхилення фактичних показників властивостей бетонних сумішей і бетонів від розрахункових, обумовлюють перевірку і при необхідності

експериментальне коректування розрахункових складів бетону. Залежно від конкретних можливостей будівельної лабораторії і графіка проведення робіт з використанням даного бетону, об'єм лабораторних робіт при експериментальному уточненні складу бетону може бути різним. Повне коректування досягається при експериментальному уточненні всіх параметрів складу суміші: водовмісту, водоцементного відношення, частки окремих фракцій у складі заповнювача, об'єму залученого повітря. В окремих випадках можливе неповне лабораторне коректування (наприклад, лише водовміст бетонної суміші, що забезпечує задану легкоукладальність, з подальшим уточненням інших параметрів шляхом випробування бетону виробничого виготовлення).

На відміну від лабораторних (*номінальних*) складів бетону, що приводяться для сухих матеріалів, у виробничих умовах враховують, що пісок і щебінь (гравій) мають деяку вологість.

Виробничі витрати дрібного ( $\Pi_{\text{вир}}$ , кг/м<sup>3</sup>) і крупного ( $\Psi_{\text{вир}}$ , кг/м<sup>3</sup>) заповнювачів збільшують на масу води, яка знаходиться в них:

$$\Pi_{\text{вир}} = \Pi \cdot (1 + W_n), \quad (8.44)$$

$$\Psi_{\text{вир}} = \Psi \cdot (1 + W_{\text{щ}}), \quad (8.45)$$

де  $\Pi$ ,  $\Psi$  – витрата піску і щебеню у розрахунковому складі;  $W_n$ ,  $W_{\text{щ}}$  – вологість піску і щебеню, частки одиниці.

Відповідно виробничу витрату води ( $B_{\text{вир}}$ ) зменшують у порівнянні з лабораторною на масу води, яка знаходиться в заповнювачах:

$$B_{\text{вир}} = B - \Pi \cdot W_n - \Psi \cdot W_{\text{щ}}. \quad (8.46)$$

У деяких випадках виробничий склад бетону доцільно виражати у відносних масових частках, при цьому частку цементу приймають рівній одиниці. У цьому випадку для виробничого складу:

$$1 : \Pi : \Psi = \frac{\Psi}{\Psi} : \frac{\Pi_{\text{вир}}}{\Psi} : \frac{\Psi_{\text{вир}}}{\Psi}. \quad (8.47)$$

Якщо бетонозмішувач, який використовується для приготування суміші, характеризується місткістю за об'ємом сухих матеріалів, тоді попередньо визначається коефіцієнт виходу бетонної суміші ( $\beta_0$ ). Коефіцієнт виходу зазвичай перебуває в межах 0,55-0,75 і характеризується відношенням об'єму бетонної суміші до суми об'ємів цементу і заповнювачів у насипному стані:

$$\beta_0 = \frac{1}{\frac{\Pi}{\rho_{н.н}} + \frac{\Pi_{вир}}{\rho_{н.п}} + \frac{\Pi\i_{вир}}{\rho_{н.щ}}}, \quad (8.48)$$

де  $\rho_{н.ц}$ ,  $\rho_{н.п}$ ,  $\rho_{н.щ}$  – відповідно насипна густина цементу, піску і щебеню (гравію).

Рекомендовані виробничі склади, доцільно адаптувати в умовах реального виробництва. Задача *адаптації складів* полягає у їх коректуванні з уточненням емпіричних коефіцієнтів, які використовуються в усереднених розрахункових залежностях на основі “зворотнього зв'язку” тобто результатів поточних випробувань бетону виробничого виготовлення. Періодичність адаптації залежить від стабільності вихідних матеріалів і виробничих параметрів і спрямована на досягнення проектних показників якості бетону при мінімально можливому коефіцієнті їх варіації. Для адаптації складів можливе використання звичайних, експресних і автоматичних способів вимірювання нормованих показників і технологічних параметрів.

**Приклад 8.3.** Розрахувати склад бетону для блока греблі ГЕС з міцністю на стиск 22 МПа у віці 180 діб із температурою розігріву у віці 28 діб не більше 28°C. Рухомість бетонної суміші ОК=2 см. Визначити необхідну температуру вкладання бетонної суміші при використанні:

а) портландцементу М400 ( $q_{28}^{нц} = 315 \text{кДж/кг}$ );

б) шлакопортландцементу М300 ( $q_{28}^{шнц} = 250 \text{кДж/кг}$ ).

Заповнювачі: кварцовий пісок із модулем крупності  $M_k=1,7$ ,  $\rho_n=2,67 \text{ кг/л}$ ; гранітний щебінь фракції 5...40 мм; пустотність щебеню  $\Pi_{щ} = 0,49$ ;  $\rho_{щ}=2,7 \text{ кг/л}$  і  $\rho_{н.щ}=1,45 \text{ кг/л}$ .

1. За логарифмічною формулою  $f_{cm}^{28} = f_{cm}^{180} \frac{\lg 28}{\lg 180}$

знайдемо середній рівень міцності бетону в 28 діб:

$$f_{cm}^{28} = 22 \frac{\lg 28}{\lg 180} = 15 \text{ МПа.}$$

2. Необхідне  $B/C$  за формулою (8.12) приймаючи  $A=0,55$  при використанні:

– портландцементу ( $R_u=40 \text{ МПа}$ ):

$$B/C = \frac{0,55 \cdot 40}{15 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 40} = 0,85$$

– шлакопортландцементу ( $R_u=30 \text{ МПа}$ ):

$$B/C = \frac{0,55 \cdot 30}{15 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 30} = 0,71$$

3. Витрата води (табл. 8.11) з врахуванням необхідної рухомості бетонної суміші і якості вихідних матеріалів:  $B=180 \text{ л/м}^3$ .

4. Витрата цементу при використанні:

– портландцементу  $C=180:0,85=212 \text{ кг/м}^3$ ;

– шлакопортландцементу:  $C=180:0,71=254 \text{ кг/м}^3$ .

5. Розраховуємо витрати заповнювачів. Для бетонної суміші на:

– портландцементі ( $\alpha=1,38$ ):

$$\Pi = \frac{1000}{\frac{1}{2,7} + 1,38 \frac{0,49}{1,4}} = 1176 \text{ кг/м}^3$$

$$\Pi = \left( 1000 - \frac{212}{3,1} - 180 - \frac{1176}{2,7} \right) \cdot 2,67 = 843 \text{ кг/м}^3 ;$$

– шлакопортландцементі ( $\alpha=1,32$ ):



$$\text{Щ} = \frac{1000}{\frac{1}{2,7} + 1,32 \frac{0,49}{1,4}} = 1204 \text{ кг} / \text{м}^3$$

$$\text{П} = \left( 1000 - \frac{254}{3,1} - 180 - \frac{1204}{2,7} \right) \cdot 2,67 = 780 \text{ кг} / \text{м}^3$$

6. Розрахункові склади бетону:

– при застосуванні портландцементу:

$$\text{Ц}=212 \text{ кг}/\text{м}^3; \text{Щ}=1176 \text{ кг}/\text{м}^3; \text{П}=843 \text{ кг}/\text{м}^3; \text{B}=180 \text{ кг}/\text{м}^3; \\ \rho_6=2411 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

– при застосуванні шлакопортландцементу:

$$\text{Ц}=254 \text{ кг}/\text{м}^3; \text{Щ}=1204 \text{ кг}/\text{м}^3; \text{П}=780 \text{ кг}/\text{м}^3; \text{B}=180 \text{ кг}/\text{м}^3; \\ \rho=2418 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

7. Знаходимо за формулою (8.36) тепловиділення бетону:

– на портландцементі при питомому тепловиділенні

$$q_{28}^{ny} = 315 \text{ кДж}/\text{кг}, Q_{28}^{ny} = 315 \cdot 212 = 66780 \text{ кДж}.$$

– на шлакопортландцементі при  $q_{28}^{uny} = 250 \text{ кДж}/\text{кг}$

$$Q_{28}^{uny} = 250 \cdot 254 = 63500 \text{ кДж}.$$

8. Температуру укладання бетонної суміші розрахуємо за формулою (8.40) при ( $K=0,8$ ;  $c=0,966 \text{ кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$ ) і використанні:

$$\text{– портландцементу: } t_n = 28 - 0,8 \frac{66780}{0,966 \cdot 2400} \leq 5^\circ \text{C};$$

$$\text{– шлакопортландцементу: } t_n = 28 - 0,8 \frac{63500}{0,966 \cdot 2400} \leq 6^\circ \text{C}.$$

**Приклад 8.4.** Розрахувати склад бетону гідротехнічної споруди з міцністю на стиск 30 МПа у 28 діб, експлуатованої в м'якій воді під напором  $H=5 \text{ м}$ , товщиною  $L=0,50 \text{ м}$ . Розрахунковий термін служби споруди  $\tau=50 \text{ років}$ . Застосовується портландцемент М500 з вмістом оксиду кальцію  $q_{CaO}=0,65 \text{ г}$  на  $1 \text{ г}$  цементу. Допустимий ступінь вилуговування СаО, що не приводить до істотного зниження

міцності від сумарного вмісту цементу прийняти  $\alpha_0=0,2$ ; середню концентрацію СаО за час вилуговування  $C_{CaO}=0,5 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>.

Експериментально встановлено, що кількість СаО, яка може бути винесена з бетону без втрати їм несучої здатності  $Q_0=1,95$  г/см<sup>3</sup>.

Бетонна суміш має рухомість ОК=3...4 см. Заповнювачі: кварцовий пісок із водопотребою  $B_n=8\%$ ,  $\rho_n=2,67$  кг/л, гранітний щебінь фракції 5-40 мм із  $\rho_{щ}=2,7$  кг/л і  $\rho_{н.щ}=1,4$  кг/л.

Для розрахунку використовуємо алгоритм, наведений у табл. 8.17.

1. Мінімально необхідна витрата цементу при допустимому ступені вилуговування, що забезпечує несучу здатність бетону за формулою (8.41):

$$Ц = \frac{1,95}{0,2 \cdot 0,65 \cdot 50} = 0,3 \text{ г/см}^3 \text{ або } 300 \text{ кг/м}^3.$$

2. Необхідний коефіцієнт фільтрації (8.42):

$$K_{\Phi} = \frac{1,95 \cdot 50}{(0,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (5 \cdot 100) \cdot (50 \cdot 368 \cdot 86400)} = 2,47 \cdot 10^{-10} \text{ см/с.}$$

3. Міцність бетону, що потребується для забезпечення розрахункового коефіцієнта фільтрації за (8.43):

$$f_{cm} = \left( \frac{2,47 \cdot 10^{-10}}{126} \right)^{-0,13} = 33 \text{ МПа}$$

4. Необхідне В/Ц за умови міцності за формулою (8.7):

$$B / Ц = \frac{0,55 \cdot 50}{33 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 50} = 0,59$$

5. Витрата води, що забезпечує необхідну рухомість суміші  $B=180$  л/м<sup>3</sup> (табл. 8.11).

6. Витрата цементу з умови міцності:

$$Ц_1 = \frac{B}{B / Ц} = \frac{180}{0,59} = 305 \text{ кг/м}^3$$

Оскільки  $Ц_1 > Ц$  приймаємо витрату цементу  $Ц=305$  кг/м<sup>3</sup>.

7. Витрати щебеню і піску знайдемо з умов абсолютних об'ємів.

Розрахунковий склад бетону:

$C=305$  кг/м<sup>3</sup>;  $Щ=1175$  кг/м<sup>3</sup>;  $П=769$  кг/м<sup>3</sup>;  $B=180$  кг/м<sup>3</sup>.

### **8.3. Проектування складів гідротехнічного бетону з застосуванням експериментально-статистичних моделей**

Актуальними напрямками розвитку методології проектування складів бетону є:

- збільшення "прогнозуючої здатності" розрахункових методик, тобто можливості більш повного врахування технологічних факторів і проектних вимог до бетону;
- підвищення ефективності алгоритмів розрахункових методик, їх точності і швидкодії.

Розвиток цих напрямків можливий за рахунок реалізації сучасних уявлень бетонознавства про формування будівельно-технічних властивостей бетону в сполученні із системним аналізом.

Найбільш загальний підхід до проектування складів бетону базується на кількісному врахуванні взаємозв'язків типу "властивість-структура-склад" бетону шляхом аналізу і спільного рішення математичних моделей, отриманих статистичною обробкою відповідних експериментальних даних.

Широке впровадження в науку і практику ЕОМ та математичних методів сприяло в останні десятиліття бурхливому розвитку досліджень у різних галузях техніки, у тому числі і в технології бетону, в результаті яких розроблені експериментально-статистичні моделі і отримані важливі практичні висновки. Накопичений досвід застосування математичного моделювання в технології бетону показує його ефективність, головним чином, у складних оптимізаційних задачах, де інші методи дослідження або неможливі, або вимагають більших витрат часу й праці.

Побудова математичних моделей може здійснюватися із застосуванням апарата регресійного аналізу результатів традиційного або активного алгоритмізованого експерименту. Останній реалізується із застосуванням методів математичного планування експериментів, які в наш час достатньо добре

розроблені стосовно до різних галузей науки і техніки, у тому числі і до технології бетону та залізобетону. Методи математичного планування експерименту найбільш близькі за вихідними передумовами до системного аналізу. Вони розглядають досліджуваній об'єкт з урахуванням можливої взаємодії факторів, дозволяючи побудувати модель, яка досить повно розкриває прямі і зворотні зв'язки в системі.

Під математичним плануванням експерименту (МПЕ) розуміють постановку дослідів за заздалегідь складеною схемою, що характеризується оптимальними властивостями за обсягом експериментальних робіт і статистичними вимогами. В основу теорії планування експерименту покладені ймовірнісно-статистичні методи, що дозволяють теоретично обґрунтовано встановити мінімально необхідну кількість і склад експериментів, а також порядок їх проведення для одержання кількісних залежностей між досліджуваним параметром і факторами, що впливають на нього.

Завдання одержання математичної моделі за допомогою МПЕ полягає в отриманні адекватного з достатньо високим рівнем довірчої імовірності рівняння, що характеризує зв'язок між вихідним параметром  $\eta$  і незалежними змінними.

У самому загальному вигляді:

$$\eta = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (8.49)$$

де  $x_1, x_2, \dots, x_k$  – незалежні змінні (фактори), які можна варіювати при проведенні експериментів.

– Зазвичай параметр  $\eta$  (функція відгуку) апроксимують поліномом:

$$\eta = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (8.50)$$

де  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$  – теоретичні коефіцієнти регресії.

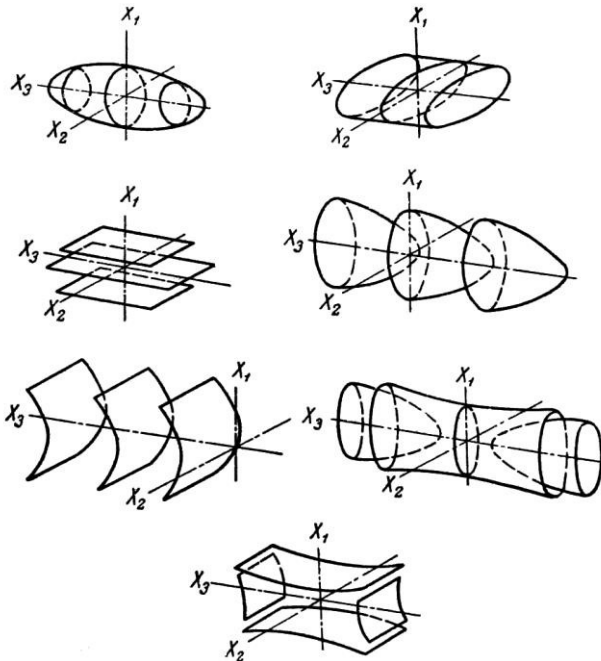
У результаті експериментів визначають *коефіцієнти регресії*  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$ , що являються оцінками теоретичних коефіцієнтів. Рівняння регресії (8.50) приймає вид:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (8.51)$$

де  $\hat{y}$  – розрахункове значення дослідженого параметра.

За величиною коефіцієнтів регресії можна судити про силу впливу відповідних факторів. Статистична значимість коефіцієнтів регресії свідчить про необхідність врахування відповідних ефектів.

Рівняння (8.51) може бути інтерпретоване як рівняння деякої поверхні в  $k$ -мірному просторі (рис. 8.5).



**Рис. 8.5.** Деякі тривимірні контурні поверхні, що характеризують майже стаціонарну область, яка описується рівнянням другого порядку, при кількості факторів  $k=3$

Успішне застосування (МПЕ) залежить, у першу чергу, від правильної постановки завдання. При цьому експериментатор повинен уміти чітко визначити об'єм і зміст інформації, яку

необхідно добути з експериментів, а також доцільність і можливість застосування МПЕ для конкретних умов.

Для оптимізаційних задач повинні бути чітко сформульовані критерії оптимізації. Практика допускає застосування різноманітних простих і комплексних, технічних, економічних і техніко-економічних критеріїв оптимізації (табл. 8.18). Критерії оптимізації в будівельно-технологічних задачах можуть прямувати до деякого абсолютного або умовного екстремуму, а в багатокритеріальних задачах знаходяться в компромісній області.

Таблиця 8.18

Основні критерії оптимізації при проектуванні складів  
гідротехнічного бетону

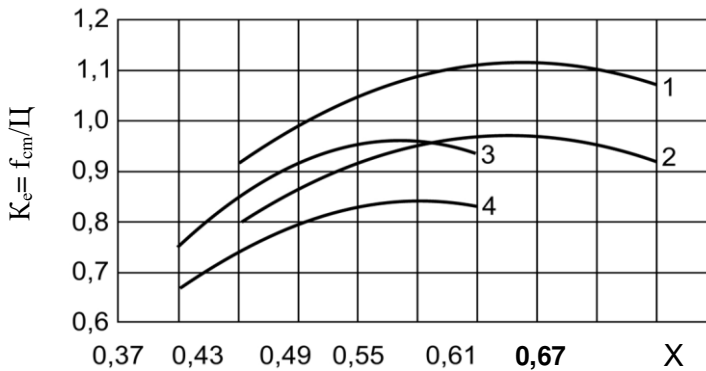
Питома витрата ресурсу (на 1 м <sup>3</sup> бетонній суміші, конструкції, споруди): $X \rightarrow \min$ .
Відношення питомої витрати ресурсу до показника властивості бетону ( $P_i$ ): $X/P_i \rightarrow \min$ .
Питомий вартісної показник*: $C \rightarrow \min$ , де $C$ – вартість 1 м <sup>3</sup> бетону, конструкції, споруди; використаних ресурсів.
Відношення питомих вартісних показників для даного бетону і бетону еталонного складу ( $C_0$ )*: $C/C_0 \rightarrow \min$ .
Відношення питомих вартісних показників і показників властивостей (або навпаки)*: $C/P_i \rightarrow \min$ (або $P_i/C \rightarrow \max$ ).
Відношення показників властивості бетону ( $P_i$ ) до питомої витрати матеріального або енергетичного ресурсу, необхідного для його виготовлення ( $X$ ): $P_i/X \rightarrow \max$ , де $X$ – витрата цементу, заповнювачів, добавок, теплової, електричної енергії тощо.
Відношення показників властивості для даного бетону ( $P_i$ ) і бетону еталонного складу ( $P_0$ ): $P_i/P_0 \rightarrow \max(\min)$ .

Показник властивості (комплексу, співвідношення властивостей) бетонної суміші або бетону ( $P_i$ ):  

$$P_i \rightarrow \max(\min),$$
 де  $P_i$  – рухомість бетонної суміші, міцність, морозостійкість, усадка бетону й ін.

**Примітка:** \* – Критерій оптимізації розглядається при обов'язковому забезпеченні заданих показників властивостей бетону.

Прагнення до екстремального значення критерію оптимізації складу характерно особливо для задач, коли критерій представлений відношенням, наприклад, показника властивості бетону до його вартості або витрати цементу чи енергетичного ресурсу. На рис. 8.6 для прикладу приведена залежність коефіцієнта ефективності ( $k_c$ ) – відношення показника міцності бетону ( $f_{cm}$ ) до питомої витрати цементу ( $\Pi$ ) від структурного параметру  $X$  (параметр запропонований Т. Пауерсом), що враховує ступінь гідратації цементу ( $\alpha$ ) і водоцементне відношення ( $V/\Pi$ ).



**Рис. 8.6.** Залежність коефіцієнта ефективності використання цементу різних марок від структурного параметру,  $X=0,647\alpha/(0,319\alpha+V/\Pi)$  де  $\alpha$  – ступінь гідратації цементу;  $V/\Pi$  – водоцементне відношення:  
 1 –  $R_{it}=50$  МПа (Ж=11...20 с.); 2 –  $R_{it}=50$  МПа (ОК=1...4 см);  
 3 –  $R_{it}=40$  МПа (Ж=11...20 с.); 4 –  $R_{it}=50$  МПа (ОК=1...4 см).

Характерними при оптимізації складів бетону є задачі, що допускають досягнення умовного екстремуму, тобто максимально (мінімально) можливого значення критерію при заданих обмеженнях (наприклад, мінімально можливої об'ємної концентрації цементного каменю при заданих значеннях міцності бетону, легкоукладальності бетонної суміші тощо).

Критерії оптимізації, представлені у вигляді відношень показників властивостей і питомих витрат тих або інших ресурсів, питомих вартісних показників, показників властивостей бетону тощо (табл. 8.18), є більш загальними ніж відповідні критерії, що характеризують безпосередньо витрати того чи іншого ресурсу. Вони легко приводяться до останніх при необхідних обмеженнях у відповідних розрахункових виразах.

**Приклад 8.5.** *Запроектувати оптимальні склади гідротехнічного бетону із заданими значеннями міцності, морозостійкості й водонепроникності в умовах нормального твердіння і тепловологісної обробки (ТВО).*

В якості вихідних матеріалів виступають: середньоалюмінатний портландцемент ( $C_3S=55...59\%$ ,  $C_2S=16...20\%$ ,  $C_3A=6...8\%$ ) із вмістом доменного гранульованого шлаку – 10%; гранітний щебінь фракцій 5...10 мм, 10...20 мм, 20...40 мм і 40...70 мм; кварцовий пісок з модулем крупності 2,1 і водопотребою 7,5%. В якості повітрявтягувальної добавки застосовують добавку смоли нейтралізованої повітрявтягуючої (СНП).

При пропарюванні зразків температура ізотермічного витримування становила 80° С. У межах загальної тривалості тепловологісної обробки (14...18 год.) попереднє витримування складало 5 год., при загальній тривалості 10 год. – 3 год. Швидкість підйому температури в камері становила 15° С за годину.

Умови планування експериментів наведені в табл. 8.19.



Таблиця 8.19

## Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодовий вид	-1	0	+1	
Початковий водовміст бетонної суміші, кг/м <sup>3</sup>	x <sub>1</sub>	150	180	210	30
Цементно-водне відношення	x <sub>2</sub>	1,3	2,1	2,9	0,8
Максимальна крупність щебеню, мм	x <sub>3</sub>	10	40	70	30
Витрата добавки СНП, кг/м <sup>3</sup>	x <sub>4</sub>	0	0,06	0,12	0,06
Нормальна густина цементу, %	x <sub>5</sub>	24,6	27,2	29,8	2,6
Активність цементу, МПа	x <sub>6</sub>	34,5	41,2	47,9	6,7
Тривалість ТВО, год.	x <sub>7</sub>	10	14	18	4
Умовна легкоукладальність	x <sub>8</sub>	0	1	2	1
Тривалість нормального твердіння, діб	x <sub>9</sub>	lg 28	lg 71	lg 180	lg 2.54
Витрата цементу, кг/м <sup>3</sup>	x <sub>10</sub>	234	378	522	144

В результаті реалізації трьохрівневих 5-ти і 6-ти факторних планів і статистичної обробки експериментальних результатів отримані комплекси математичних моделей оптимізуючих параметрів і властивостей бетонних сумішей (табл. 8.20), а також бетону нормального твердіння (табл. 8.21) і після тепловологісної обробки (табл. 8.22).

Таблиця 8.20

## Властивості бетонної суміші

Властивості	Вид рівняння
Об'єм емульгованого повітря, %	$y_1 = 2,27 + 0,72x_1 - 0,63x_{10} - 0,47x_3 + 2,14x_4 - 0,18x_5 - 0,20x_1^2 + 0,24x_{10}^2 + 0,17x_3^2 - 0,22x_4^2 - 0,09x_5^2 - 0,13x_1x_2 + 0,71x_1x_4 - 0,61x_{10}x_4 - 0,46x_3x_4 - 0,13x_3x_5 - 0,19x_4x_5$
Водопотреба суміші, кг/м <sup>3</sup>	$y_2 = 169,2 + 26,4x_8 + 13,4x_2 - 20x_3 - 8,3x_4 + 9,3x_5 - 5,2x_8^2 + 5,8x_2^2 + 8,8x_3^2 + 2,8x_4^2 + 3,8x_5^2 + 1,0x_8x_3 + 2,6x_8x_5 - 1,0x_2x_3 + 3,1x_2x_4 + 2,25x_2x_5 - 1,1x_3x_5 + 1,0x_4x_5$
Оптимальна частка піску в суміші заповнювачів	$y_3 = 0,284 + 0,03x_1 - 0,039x_2 - 0,02x_3 + 0,009x_4 + 0,007x_1^2 + 0,016x_2^2 + 0,008x_3^2 + 0,006x_4^2 - 0,005x_1x_2 + 0,01x_1x_3 + 0,009x_2x_4 - 0,004x_3x_4 + 0,007x_4x_5$

Таблиця 8.21

## Властивості бетону нормального твердіння

Властивості	Вид рівняння
Міцність при стиску, МПа	$y_4 = 36,93 - 1,88x_8 + 14,73x_2 - 3,62x_4 - 0,86x_5 + 4,97x_6 + 6,08x_9 - 0,05x_8^2 - 1,85x_2^2 - 0,2x_4^2 - 0,3x_5^2 + 0,05x_6^2 - 0,8x_9^2 - 0,61x_8x_4 - 0,45x_8x_5 + 1,23x_8x_6 + 0,97x_2x_4 - 0,63x_2x_5 + 2,12x_2x_6 + 2,14x_2x_9 + 0,99x_4x_6 - 0,46x_5x_6 + 0,88x_6x_7$
Морозостійкість, цикли	$y_5 = 378,9 - 67,8x_8 + 162,3x_2 + 147,7x_4 - 27,4x_5 + 21,8x_6 + 63,2x_9 + 9,7x_8^2 - 38,8x_2^2 + 6,7x_4^2 - 9,8x_5^2 + 11,7x_6^2 + 2,2x_9^2 + 29,4x_8x_2 - 8,7x_8x_5 - 16,6x_8x_9 + 26,6x_2x_4 - 15,8x_2x_5 + 18,7x_2x_9 + 7,1x_4x_6 + 23,7x_4x_9 + 13,8x_6x_9$
Водонепроникність, МПа	$y_6 = 0,92 + 0,04x_8 + 0,56x_2 + 0,02x_4 + 0,01x_5 + 0,06x_6 + 0,25x_9 - 0,05x_8^2 + 0,08x_2^2 - 0,01x_4^2 + 0,004x_5^2 + 0,03x_6^2 - 0,02x_8x_2 + 0,01x_8x_4 - 0,02x_8x_5 + 0,04x_2x_6 + 0,14x_2x_9$

Таблиця 8.22

## Властивості бетону після тепловологісної обробки (ТВО)

Властивості	Вид рівняння
Границя міцності при стиску через 4 год. після ТВО, МПа	$y_7 = 21,98 - 0,93x_8 + 10,5x_2 - 1,03x_4 - 1,61x_5 +$ $+ 2,32x_6 + 2,65x_7 - 0,49x_8^2 - 0,81x_2^2 - 0,09x_5^2 -$ $- 0,06x_6^2 - 0,96x_7^2 - 2,00x_8x_2 - 0,88x_8x_4 - 1,36x_8x_5 -$ $- 1,43x_8x_6 + 2,68x_2x_6 + 2,60x_2x_7 - 0,91x_4x_5 -$ $- 0,82x_4x_6 - 1,01x_4x_7 + 1,18x_5x_7 + 1,22x_6x_7$
Границя міцності при стиску через 28 доби після ТВО, МПа	$y_8 = 30,6 - 2,24x_8 + 13,03x_2 - 2,86x_4 - 0,99x_5 +$ $+ 3,97x_6 + 1,94x_7 - 0,05x_8^2 - 1,75x_2^2 - 0,5x_4^2 -$ $- 0,35x_5^2 + 0,1x_6^2 - 0,2x_7^2 - 1,29x_8x_2 + 1,18x_2x_4 -$ $- 0,63x_2x_5 + 2,71x_2x_6 + 0,97x_2x_7$
Морозостійкість, цикли	$y_9 = 281,9 - 38,3x_8 + 145,4x_2 + 89,2x_4 -$ $- 16x_5 + 17,7x_7 + 8,3x_8^2 - 15,7x_2^2 - 12,2x_4^2 -$ $- 5,2x_5^2 + 9,3x_6^2 - 2,2x_7^2 - 13,3x_8x_2 +$ $+ 14,8x_8x_4 + 7,3x_2x_4 + 21,2x_6x_7$
Водонепроникність, МПа	$y_{10} = 0,57 + 0,07x_8 + 0,43x_2 + 0,03x_5 + 0,06x_6 +$ $+ 0,05x_7 - 0,02x_8^2 + 0,08x_2^2 + 0,02x_4^2 - 0,06x_7^2 +$ $+ 0,07x_8x_2 + 0,03x_8x_5 - 0,04x_2x_4 + 0,03x_2x_5 +$ $+ 0,06x_2x_6 - 0,02x_4x_6 - 0,02x_4x_7 + 0,01x_5x_6 + 0,02x_6x_7$

При отриманні моделі водопотреби планували (табл. 8.20) значення умовної легкоукладальності ( $x_8$ ) (табл. 8.23):

Таблиця 8.23

## Планування значень умовної легкоукладальності

Рівень варіювання	-1	-0,4	0	+0,4	+1
Показник легкоукладальності	жорсткість, с		осадка конуса, см		
	20	8	2	5	13

Комплекс поліноміальних моделей дозволяє порівняно просто за допомогою ЕОМ вирішувати задачі оптимізації складів бетону у широкому діапазоні проектних властивостей. Суть методу полягає в тому, що моделі  $y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10}$  вирішують відносно Ц/В, фіксуючи інші фактори на необхідних рівнях і задаючись певною міцністю, морозостійкістю й водонепроникністю. Далі підраховують витрату води за

рівнянням  $u_2$  й оптимальну частку піску в суміші заповнювачів  $u_3$ , а потім за рекомендованими формулами – витрату цементу, піску й щебеню на  $1 \text{ м}^3$  бетонній суміші.

Розглянемо характерні приклади проектування оптимальних складів бетону, що вирішуються із застосуванням отриманих моделей.

*Наприклад необхідно визначити склади гідротехнічного бетону у віці 28 і 180 діб при нормальному твердінні (повітрятягувальні добавки не застосовуються).*

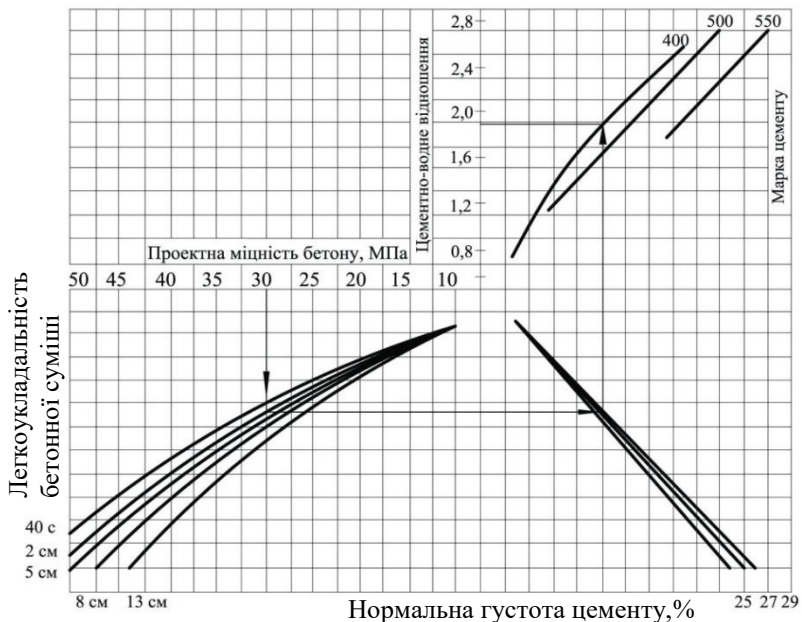
На першому етапі встановлюємо по моделі  $u_4$  (табл. 8.21) значення Ц/В необхідні для досягнення різних марок бетону за міцністю на стиск. Визначивши значення  $x_2$  при прийнятих значеннях інших факторів, з рівнянь  $u_5$  і  $u_6$ , знаходимо морозостійкість і водонепроникність бетону, що відповідають маркам бетону за міцністю при стиску. Потім підраховуємо витрату води з рівняння  $u_2$  й оптимальну частку піску в суміші заповнювачів з рівняння  $u_3$ . Витрату цементу, піску та щебеню знаходимо за формулами методу абсолютних об'ємів.

За даними розрахунків, виконаних за допомогою математичних моделей (табл. 8.19, 8.21, 8.22), побудовані номограми (рис. 8.7, 8.8, 8.9), використовуючи які можна визначати Ц/В, В і г при заданих вихідних умовах. При цьому використовується також встановлене співвідношення показників властивостей бетону нормального твердіння (табл. 8.21) і значення поправочних коефіцієнтів для коректування Ц/В для бетону у віці 180 діб (табл. 8.24).

Таблиця 8.24

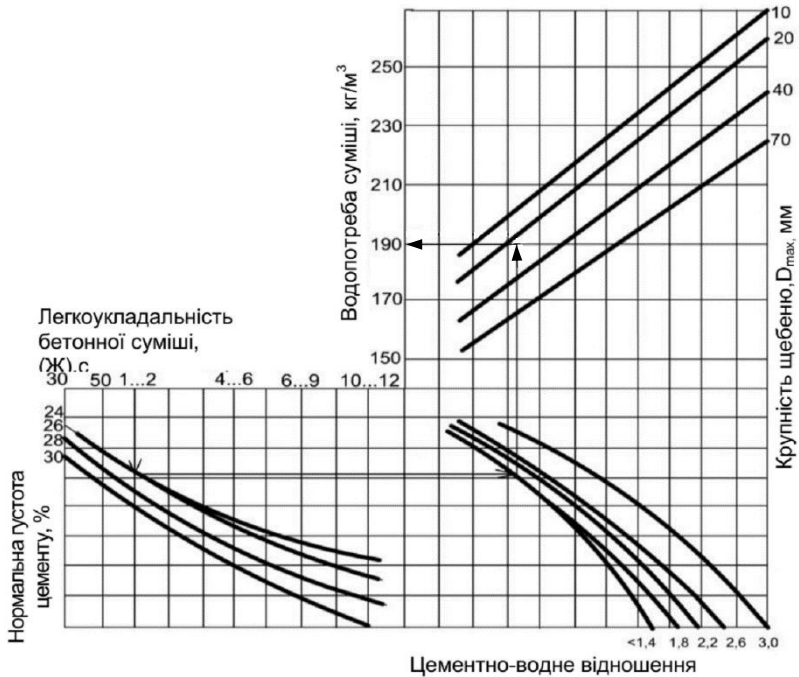
Значення поправочних коефіцієнтів для уточнення Ц/В у віці 180 діб

Марка за міцністю							
150	200	250	300	350	400	450	500
0,96	0,81	0,76	0,73	0,71	0,70	0,68	0,67



**Рис. 8.7.** Номограма визначення цементно-водного відношення для бетону нормального твердіння

Наприклад, якщо для одержання бетону з маркою за міцністю не менше 200, за морозостійкістю F150 і водонепроникністю W2 у віці 28 доби використовуються портландцемент марки 400 ( $\rho_{\text{ц}}=3,1$  кг/л, НГ=27%), кварцовий пісок ( $V_{\text{п}}=11\%$ ,  $\rho_{\text{п}}=2,6$  кг/л); гранітний щебінь фракції 5...20 мм ( $V_{\text{щ}}=4\%$ ;  $\rho_{\text{щ}}=2,65$  кг/л) і добавка ЛСТ у кількості 0,25% від маси цементу, то рухомість бетонної суміші повинна становити 1...4 см.



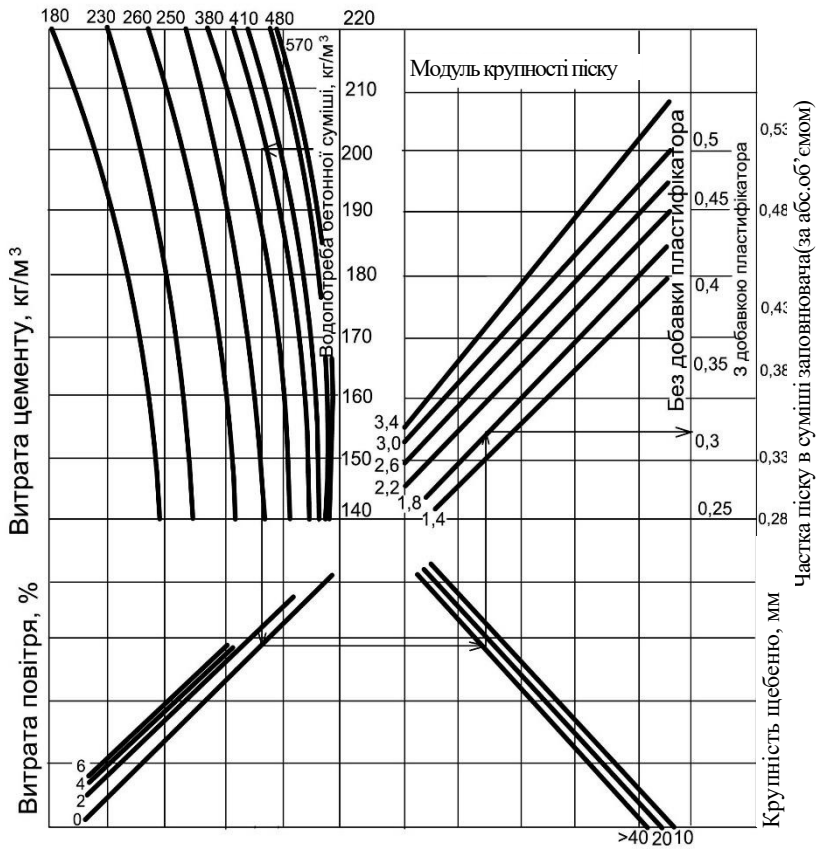
**Рис. 8.8.** Номограма визначення водопотреби бетонної суміші

З табл. 8.25 встановлюємо, що міцність бетону на стиск, яка забезпечує необхідні морозостійкість і водонепроникність, повинна становити 30 МПа.

З рис. 8.7 встановлюємо необхідне цементно-водне відношення: Ц/В=1,96.

Витрата води (рис. 8.8) складе  $190 \text{ кг/м}^3$ , а з урахуванням застосування добавки ЛСТ (табл. 8.26)  $V=190 \cdot 0,92=175 \text{ кг/м}^3$ .

Витрата цементу:  $\text{Ц}=175 \cdot 1,96=343 \text{ кг/м}^3$ .



**Рис. 8.9.** Номограма визначення частки піску в суміші заповнювачів

Таблиця 8.25

Орієнтовне співвідношення показників властивостей бетону нормального твердіння без повітрявтягувальних добавок

Рухомість суміші, см	Марки бетону у віці, діб					
	28			180		
	Міцність (М)	Морозостійкість (F)	Водонепроникність (W)	Міцність (М)	Морозостійкість (F)	Водонепроникність (W)
1...4	20	50...75	2	20	50...75	2...4
5...9	20	50...75	2	20	50...75	2...4
10...15	20	50	2	20	50	2...4
1...4	30	100...150	2...4	30	150...200	4...6
5...9	30	100	2...4	30	100...150	4...6
10...15	30	75...100	2...4	30	75...100	4...6
1...4	40	200...250	6...8	40	250	8...10
5...9	40	200...250	6...8	40	200...250	8...10
10...15	40	100...150	6...8	40	150...200	8...10

Оптимальну частку піску в суміші заповнювачів знаходимо за рис. 8.9:  $r=0,345$ .

Витрата піску й щебеню:

$$П = \left[ 1000 - \left( \frac{343}{3,1} + \frac{175}{1,0} \right) \right] \cdot 0,345 \cdot 2,6 = 641 \text{ кг/м}^3$$

$$Щ = \left[ 1000 - \left( \frac{343}{3,1} + \frac{175}{1,0} + \frac{641}{2,6} \right) \right] \cdot 2,65 = 1240 \text{ кг/м}^3$$

Якщо ж дані проектні вимоги до бетону необхідно забезпечити у віці 180 доби. Установлене значення Ц/В (рис.8.7) коректуємо з урахуванням поправочного коефіцієнта (табл. 8.24):

$$Ц/В = 1,96 \cdot 0,73 = 1,43.$$

Витрата води складе  $190 \text{ кг/м}^3$  (рис. 8.8), з урахуванням застосування добавки ЛСТ (див. табл. 8.26)  $В=190 \cdot 0,92=175 \text{ кг/м}^3$ .



Витрата цементу:  $C = 175 \cdot 1,43 = 250 \text{ кг/м}^3$ .

Оптимальну частку піску в суміші заповнювачів знаходимо за рис 8.9:  $g=0,38$

Витрата піску й щебеню:

$$P = \left[ 1000 - \left( \frac{250}{3,1} + \frac{175}{1,0} \right) \right] \cdot 0,38 \cdot 2,6 = 735 \text{ кг/м}^3.$$

$$Щ = \left[ 1000 - \left( \frac{250}{3,1} + \frac{175}{1,0} + \frac{735}{2,6} \right) \right] \cdot 2,65 = 1223 \text{ кг/м}^3$$

Таблиця 8.26

Значення поправочних коефіцієнтів до водовмісту бетонних сумішей при застосування пластифікуючих добавок

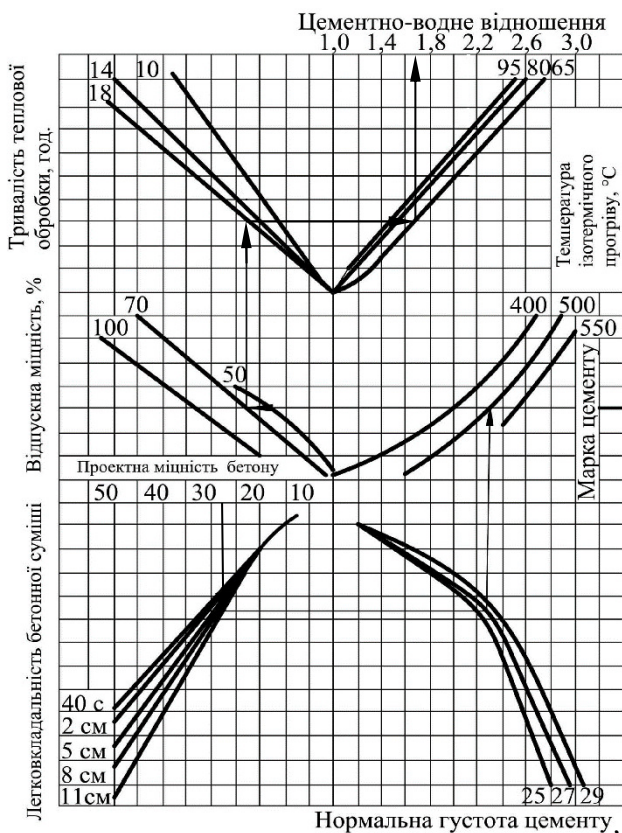
Легкоукладальність суміші		Цементно-водне відношення				
Рухомість, см	Жорст-кість, с	1,40	1,80	2,20	2,60	3,0
-	30...50	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92
		0,88	0,85	0,83	0,81	0,80
1...4	-	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91
		0,86	0,84	0,82	0,80	0,79
5...9	-	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
		0,82	0,80	0,79	0,78	0,77
10...15	-	0,90	0,89	0,88	0,87	0,87
		0,80	0,78	0,77	0,76	0,75

**Примітка.** Над рискою наведені значення при застосуванні добавки ЛСТ у кількості 0,25% від маси цементу, під рискою - суперпластифікатор С-3 у кількості 0,7% від маси цементу.

Комплекс математичних моделей (табл. 8.22) дозволяє розв'язати також задачі, задаючись будь-яким рівнем відпускної міцності, змінюючи в широкому діапазоні загальну тривалість процесу теплової обробки, легкоукладальність сумішей, активність і нормальну густоту цементу.

*Наприклад, необхідно запроектиувати склади гідротехнічного бетону, що піддається тепловологісній обробці, при різних значеннях відпускної міцності (повітрявтягувальні добавки не застосовуються).*

Алгоритм розв'язання даної задачі відрізняється від попереднього лише тим, що відносно Ц/В розв'язується модель не тільки проектної  $u_8$ , але й відпускної міцності  $u_7$ . Для визначення витрати цементу вибирається більше із двох знайдених значень цементно-водного відношення. На рис. 8.10 представлена номограма для пошуку Ц/В, яке забезпечує проектну міцність і легкоукладальність бетону при заданому рівні відпускної міцності. Орієнтовне співвідношення показників властивостей пропареного бетону наведено в табл. 8.27.



**Рис. 8.10.** Номограма визначення цементно-водного відношення бетону, що піддається тепловологісній обробці(ТВО)

Таблиця 8.27

Орієнтовні співвідношення показників властивостей бетону, підданого тепловій обробці, без повітрявтягувальних добавок (тривалість ТВО 14...18 год.)

Міцність бетону при стиску в 28-добовому віці, МПа	Відпускна міцність, %	Морозостійкість, цикли	Водонепроникність, МПа
15,0	70	до 50	0,2
	100	50...100	0,2
20,0	50	0...50	0,2
	70	50.....100	0,2...0,4
	100	100...150	0,4...0,6
25,0	50	50... 100	0,2...0,4
	70	100...150	0,4...0,6
	100	200...250	0,6
30,0	50	75...100	0,2...0,4
	70	150...200	0,4...0,6
	100	200...250	0,6...0,8
35,0	50	100...200	0,4...0,6
	70	150...250	0,6...0,8
	100	200...300	0,8...1,0
40,0	50	150...250	0,6...0,8
	70	200...300	0,8...1,0
	100	300	1,0...1,2

**Примітка.** Мінімальні значення морозостійкості й водонепроникності наведені для рухомих сумішей (10...15 см), а максимальні - для малорухомих (1...4 см).

*Наприклад*, для бетону класу С12/15 з вимогою за міцністю при стиску 20,0 МПа і морозостійкістю F150, що піддається тепловологісній обробці при температурі ізотермічної обробки 70° С протягом 18 год., відпускна міцність повинна становити 70% від проектної, рухомість бетонної суміші – 1...4 см.

Застосовуються портландцемент з мінеральними добавками марки 400 ( $\text{НГ}=27\%$ ,  $\rho_{\text{ц}}=3,1$  кг/л), кварцовий пісок з модулем крупності  $M_{\text{кр}}=2,3$  ( $\rho_{\text{п}}=2,6$  кг/л), гранітний щебінь

фракцій 5...20 мм ( $\rho_{\text{щ}}=2,65$  кг/л).

За табл. 8.27 встановлюємо, що для забезпечення необхідної морозостійкості F150 марка бетону за міцністю при стиску повинна бути 25 МПа. За рис. 8.10 встановлюємо, що необхідне Ц/В=1,7. Витрата води (рис. 8.7) складе 180 кг/м<sup>3</sup>. Необхідна витрата цементу:

$$Ц = 180 \cdot 1,7 = 305 \text{ кг/м}^3.$$

Оптимальну частку піску в суміші заповнювачів знаходимо за рис. 8.9:  $r=0,38$ .

Витрата піску й щебеню складе:

$$П = \left[ 1000 - \left( \frac{305}{3,1} + \frac{180}{1} \right) \right] \cdot 0,38 \cdot 2,6 = 713 \text{ кг/м}^3$$

$$Щ = \left[ 1000 - \left( \frac{305}{3,1} + \frac{180}{1} + \frac{713}{2,6} \right) \right] \cdot 2,65 = 1190 \text{ кг/м}^3$$

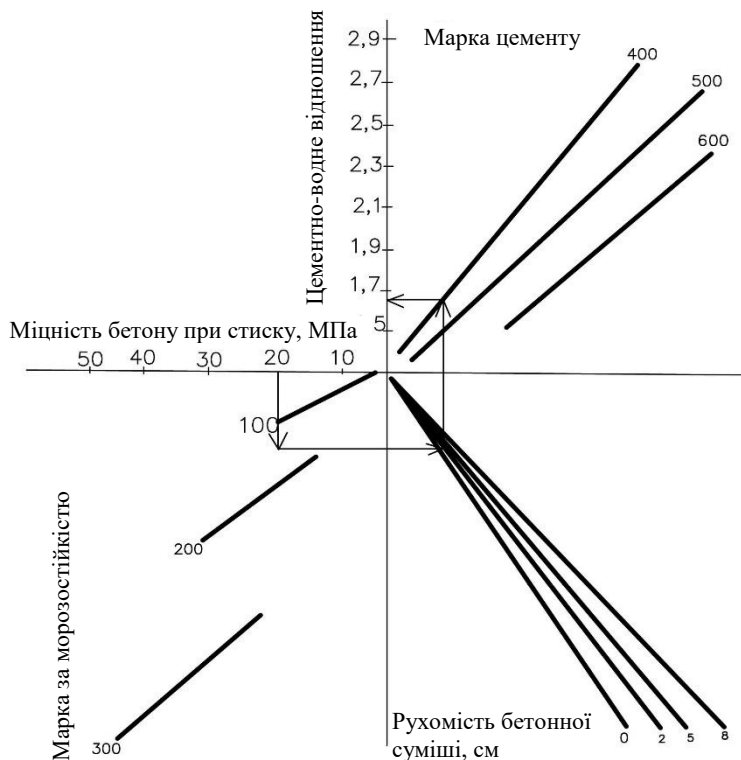
Отримані поліноміальні моделі дозволяють розрахувати склади гідротехнічного бетону при введенні повітрявтягувальних добавок.

Алгоритм розв'язання таких задач припускає на першому етапі визначення такого вмісту повітрявтягувальної добавки, при якому властивості бетону забезпечувалися б при мінімально можливому Ц/В. Для цього при фіксуванні інших факторів послідовно змінюється вміст добавки; ЕОМ видає на друк Ц/В для кожного набору вихідних параметрів, а потім послідовно – витрату води, цементу, оптимальний об'єм емульгованого повітря, витрату піску й щебеню.

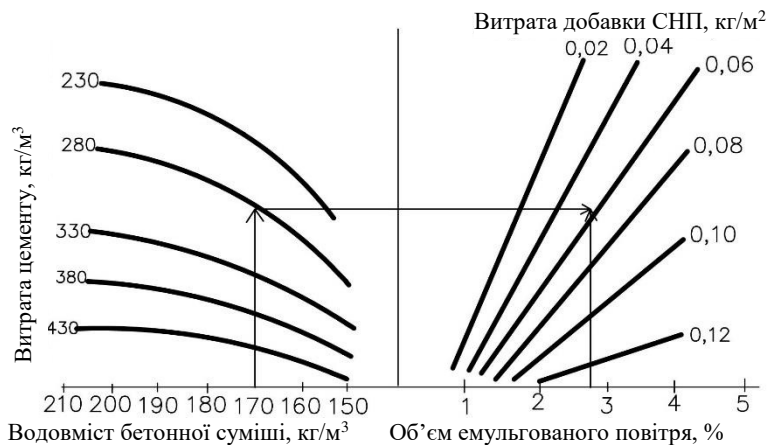
*Наприклад*, необхідно запроектувати склади бетону з міцністю при стиску у віці 180 діб 20 МПа, морозостійкістю F150 і водонепроникністю W4. Рухомість бетонної суміші має відповідати ОК=1...4 см. Застосовується цемент М400. У бетонну суміш вводиться повітрявтягувальна добавка СНП (смола нейтралізована повітрявтягувальна).

На рис. 8.11, 8.12 представлені номограми, за якими можна проводити розрахунки Ц/В і кількості повітрявтягувальної добавки для забезпечення заданого комплексу властивостей, а в

табл. 8.28 і 8.29 наведено орієнтовний вміст емульгованого повітря і значення поправочних коефіцієнтів для уточнення Ц/В бетону нормального твердіння у віці 180 діб. Витрату води, встановлену за рис. 8.8, уточнюють із урахуванням об'єму втягнутого повітря.



**Рис. 8.11.** Номограма визначення Ц/В для бетонів при оптимальному вмісті емульгованого повітря



**Рис. 8.12.** Номограма визначення витрати добавки СНП

Таблиця 8.28

Орієнтовний вміст емульгованого повітря для бетону з різними проектними вимогами

Властивості бетону			Необхідний об'єм емульгованого повітря, %
Міцність при стиску у віці 28 дб, МПа	Морозостійкість, цикли	Водонепроникність, МПа	
20,0	100	0,4	1,5...2,0
	150	0,4...0,6	2,5...3,0
	200	0,4...0,6	3,0...3,5
	300	0,4...0,6	3,5...4,0
30,0	200	0,6	1,5...2,0
	300	0,6...0,8	2,5...3,0
	400	0,6...0,8	3,5...4,0
40,0	300	0,8...1,0	3,0...3,5
	400	0,8...1,0	3,5...4,0
	500	1,0...1,2	4,5...5,0

**Примітка.** Мінімальні значення об'єму емульгованого повітря наведені для малорухомих сумішей (1...4 см), максимальні – для рухомих сумішей (10...15 см).

Таблиця 8.29

Значення поправочних коефіцієнтів для уточнення цементно-водного відношення бетонів нормального твердіння у віці 180 діб (при застосуванні провітрявляювальних добавок)

Марка бетону за міцністю	Марка бетону за морозостійкістю	Поправочний коефіцієнт
100	100	0,87
100	200	0,77
150	100	0,80
150	200	0,77
200	100	0,81
200	200...300	0,77
250	200	0,76
250	300...400	0,74
300	200	0,76
300	300	0,73
300	400	0,75
350	300...500	0,72
400	400...500	0,70
450	500...600	0,67
500	500...600	0,67

За табл. 8.28 встановлюємо, що необхідний об'єм емульгованого повітря для заданих проектних вимог до бетону становить 2,5 %. Значення Ц/В при оптимальному вмісті повітря для заданих проектних властивостей за рис. 8.11 становить 1,65.

Витрату води, встановлену за рис. 8.7, уточнюємо з урахуванням об'єму втягнутого повітря:

$$B = 180 - (4 \cdot 2,5) = 170 \text{ л/м}^3.$$

Необхідна витрата цементу:

$$Ц = 170 \cdot 1,65 = 280 \text{ кг/м}^3.$$

Оптимальну частку піску в суміші заповнювачів встановлюємо за рис. 8.9:

$$r = 0,36.$$

Витрату піску й щебеню визначаємо з урахуванням об'єму емульгованого повітря:

$$П = \left[ 1000 - \left( \frac{280}{3,1} + \frac{170}{1} + 25 \right) \right] \cdot 0,36 \cdot 2,6 = 680 \text{ кг/м}^3$$

$$Щ = \left[ 1000 - \left( \frac{280}{3,1} + \frac{170}{1} + 25 + \frac{680}{2,6} \right) \right] \cdot 2,65 = 1200 \text{ кг/м}^3$$



## ЛІТЕРАТУРА

1. Баженов Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов./Ю.М.Баженов// Учеб. пособие. –М.: Стройиздат,1975. – 272 с.
2. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны. /Ю.М.Баженов, В.С.Демьянова, В.И.Калашников// М.: АСВ, 2006 – 368 с.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона./Ю.М.Баженов// М.:АСВ, 2007 – 524 с.
4. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны./В.Г.Батраков// Теория и практика. – М.: Технопроект,1998 – 768 с.
5. Большаков В.И., Дворкин Л.И. Строительное материаловедение./В.И.Большаков,Л.И.Дворкин//Днепропетровск: РВА "Днепр – VAL", 2004 – 677 с.
6. Венюа М. Цементы и бетоны в строительстве./ М. Венюа // М.: Стройиздат,1980. – 415 с.
7. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде./ Г.П.Вербецкий//М.: Стройиздат, 1976. – 128 с.
8. Вознесенский В. А. Современные методы оптимизации композиционных материалов./ В.А.Вознесенский, В.М.Выровой, В.Я.Керш и др.// К.: Будівельник, 1983. – 144 с.
9. Вознесенский В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач/В.А.Вознесенский, Т.В.Ляшенко, Б.Л.Огарков 1989. – 328 с.
10. Гидротехнические сооружения (Справочник проектировщика) / Г.В. Железняков, Ю.А. Ибад-заде, П.Л. Иванов и др.; Под общ. Ред. В.П. Недриги. - М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.
11. Горчаков Г.И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений./ Г.И.Горчаков, М.М.Капкин, Б.Г.Скрамтаев // М.: Стройиздат, 1965. – 195 с.
12. Гоц В.І. Бетони і будівельні розчини / В.І. Гоц // Підручник. – К. : ТОВ УВПК «ЕксОб»: КНУБА, 2003. – 472 с.

13. Гришин М.М и др. Гидротехнические сооружения. Учеб. в 2-х частях / Под ред. М.М. Гришина.– М.: Высшая школа, 1979. – 615 с.
14. Грушко И.М. Повышение прочности и выносливости бетона./ И.М.Грушко, А.Г.Ильин, Э.Д.Чихладзе// Харьков: Вища школа, 1986. – 149 с.
15. Дворкин Л.И. Практическое бетоноведение в вопросах и ответах / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, О.М. Бордюженко // Справочник. – С.Петербург: ООО «Стройбетон», 2008. – 328 с.
16. Дворкин Л.И. Строительные материалы для гидротехнических сооружений./ Л.И.Дворкин, П.П.Цулукидзе // М.: Энергия, 1978 – 247 с.
17. Дворкин Л.И. Строительные материалы для энергетических сооружений. /Л.И.Дворкин// М.: Энергоатом издат, 1989. –280 с.
18. Дворкин Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями/Л.И.Дворкин,В.И.Соломатов,В.Н.Вырово й// К.:Будівельник, 1991 – 136 с.
19. Дворкін Л. Й. Проектування і аналіз ефективності складів бетону. /Л.Й.Дворкін, О.Л.Дворкін, М.В.Горячих, В.М.Шмигальський//Рівне, НУВГП, 2009. – 173 с.
20. Дворкін Л. Й. Проектування складів бетону із заданими властивостями./ Л.Й.Дворкін, О.Л.Дворкін, Ю.В.Гарніцький// Рівне. –2000. – 215 с.
21. Дворкін Л.Й. Бетони і будівельні розчини / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін // Підручник – Київ, «Основа», 2008. – 613 с.
22. Дворкін Л.Й. Бетони спеціального призначення: Навчальний посібник – К.: Видавничий дім «Кондор», 2018. – 354 с.
23. Дворкін Л.Й. Будівельні в'язучі матеріали: підручник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2019. – 628 с.
24. Дворкін Л.Й. Випробування бетонів і розчинів. Проектування їх складів / Л.Й. Дворкін, В.І. Гоц, О.Л Дворкін // Навч. пос. – Київ: «Основа», 2014. – 304 с.
25. Дворкін Л.Й. Міцність бетону. Київ: "Кондор", 2021. 312 с.

26. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін // К. : «Основа», 2007. – 613 с.
27. Дворкін Л.Й. Проектування складів бетонів (методи, приклади, вправи): Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2018. – 616 с.
28. Дворкін Л.Й. Теоретичні основи будівельного матеріалознавства. – К.: «Каравела», 2023. – 800 с.
29. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Дорофеев В.С., Мішугін А.В. Гідротехнічні та дорожні бетони: Навчальний посібник. – Одеса: Евен, 2012. – 214 с
30. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Бордюженко О.М. Бетони нового покоління. Рівне, НУВГП, 2021. 316 с.
31. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Макаренко Р.М. Високоміцні бетони. Київ: "Каравела", 2022. 218 с.
32. Дворкін Л.Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів. Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2020. – 228 с.
33. Кривенко П.В. Строительное материаловедение / П.В. Кривенко, Е.К. Пушкарева и др. – К. : «Основа», 2007. – 704 с.
34. Несветаев Г.В. Бетоны./Г.В. Несветаев// Учебное пособие - Ростов н/Д: Феникс, 2011 - 381 с.
35. Сизов В. П. Проектирование составов тяжелого бетона./В.П.Сизов// М.: Стройиздат, 1980. – 144 с.
36. Стольников В.В. Исследования по гидротехническому бетону. /В.В.Стольников//М.: Госэнергоиздат, 1962. – 330 с.
37. Судаков В.Б. Рациональное использование бетона в гидротехнических сооружениях. / В.Б.Судаков//М.: "Энергия", 1976. – 241 с.
38. Штарк Й. Долговечность бетона./Й.Штарк, Б. Вихт//- Киев: Оранта, 2004.- 295 с.
39. Dvorkin L, Nwoubani S., Dvorkin O. Construction Materials. Nova Science Publishers, New York, USA, 2010, 409p.
40. Dvorkin L, Nwoubani S., Dvorkin O. Construction Materials. Nova Science Publishers, New York, USA, 2010.– 409 p.

41. Dvorkin L. Basic of concrete science / L. Dvorkin, O. Dvorkin Amazon, (Kindle edition) /(e-book)/ 2011. – 382 p.
42. Dvorkin L. Construction materials / L. Dvorkin, S. Nwaubani, O. Dvorkin // Nova Science Publishers, New York, USA, 2010. – 409 p.
43. Dvorkin L. Construction materials Based on industrial Waste Products / L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov // Nova science publishers, 2016. – 242 p.
44. Dvorkin L. Multi-Parametric Concrete Compositions Design / L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov // Nova Science Publishers, Inc. New York, 2013.– 223 p.
45. Dvorkin L. Structure and Properties of Building Materials / L. Dvorkin, V. Bolshakov // Trans Tech Publication ine, Zurich, 2016 . – 220 p.
46. Dvorkin L. The main properties of cement concrete. Palmarium Academic Publishing, 2019. 232 p.
47. Dvorkin L., Dvorkin O., Basics of concrete science. Amazon,(Kindle edition) 382 p.,2011/(e-book).
48. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Construction materials Based on Industrial Waste Products. Nova science publishers, 2016, hh.242.
49. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers , New York, USA, 2012. p. 172.
50. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers , New York, USA, 2012,172 p.
51. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Multi-Parametric Concrete Compositions Design. Nova Science Publishers, New York, USA, 2013, p. 223.
52. Dvorkin L., Lushnikova N. Sustainability of gypsum products as Construction Materials. Elsevier, Amsterdam, 2016.
53. Dvorkin L., Zhitkovsky V., Lushnikova N., Ribakov Y. Metakaolin and Fly Ash as Mineral Admixtures for Concrete. CRC Press Taylor and Frensis group, London, New York, 2021. p. 240.

54. L. Dvorkin, V. Bolshakov. Structure and Properties of Building Materials. Trans Tech Publication ine, Zurich, 2016, p. 220.
55. Lea's Chemistry of cement and concrete, ed. by Peter C.Hewlett, 1997.- 1053 p.
56. Neville A.M. Properties of Concrete. Prentice Hall, 1995. - 864 p.
57. Orchard D.F. Concrete Technology. – London, 1979.- Vol.1,2.- 1033p.
58. Dvorkin L., Zhitkovsky V., Marchyk V., Stepsuk U. Improving Concrete and Mortar Using Modified Ash and Slag Cement. CRC Press, London, 2020, 194 p.
59. L. Dvorkin, V. Zhitkovsky, Y. Ribakov. Concrete and montar production using stone sifting. CRC Press Taylor and Francis Group London, New York, 2018, p 159.