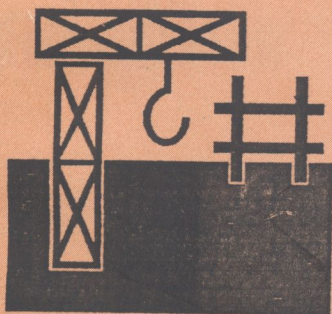


666(075)  
4 24

Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін,  
Ю.В. Гарніцький

# Проектування складів бетону із заданими властивостями



ЦВ=

Рівне-2000

**Л.Й.Дворкін, О.Л.Дворкін,  
Ю.В.Гарніцький**

**Проектування  
складів бетону  
із заданими властивостями**

НТБ ВНТУ



403765

666(075) Д 24 2000

Дворкін Л.Й. Проектування складів бетону із за

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів будівельних спеціальностей вищих навчальних закладів

**Видавництво РДТУ**

**Рівне - 2000**

**Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Гарніцький Ю.В.**  
**ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БЕТОНУ ІЗ ЗАДАНИМИ**  
**ВЛАСТИВОСТЯМИ: Навчальний посібник для будівельних спеці-**  
**альностей вузів. - Рівне, Вид-во Рівненського державного технічного**  
**університету, 2000.- 215 с.**

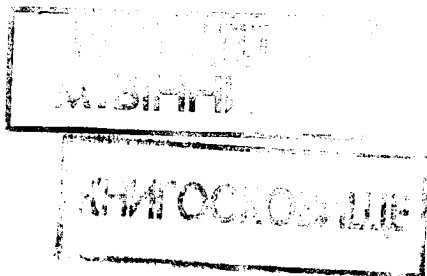
У посібнику розглянуті основні методологічні принципи, розрахункові залежності і алгоритми для розв'язання задач проектування складу бетону з комплексом нормованих будівельно-технічних властивостей, які характеризують міцність, деформативність і довговічність важкого цементного бетону. Наведені приклади розв'язання ряду задач із різними сполученнями нормованих параметрів.

Для студентів будівельних спеціальностей вищих закладів освіти, наукових працівників, аспірантів. Табл. 70. Іл. 41. Бібліогр. 139 назв.

Рецензенти:

Канд. техн. наук, професор Антоненко Г.Я.  
Доктор техн. наук, професор Пунагін В.М.

403765



## ПЕРЕДМОВА

Проектування складів бетону з комплексом нормованих будівельно-технічних властивостей є одною з основних задач технології цього матеріалу і конструкцій на його основі. Розвиток теоретичних уявлень і емпіричної бази бетонознавства дозволяють значно розширити традиційний підхід до проектування складів, використовувати технологічні розрахунки для задач, які раніше вирішувалися тільки експериментально.

Такі розрахунки дозволяють знаходити не тільки самі склади бетонних сумішей, але й оцінювати шляхи зниження їхньої вартості, економії цементу й енергозатрат, знаходити оптимальні рішення в конкретних виробничих ситуаціях.

Важливість розвитку методології технологічних розрахунків зростає в міру комп'ютеризації інженерної праці, створення сучасних програмних комплексів.

У посібнику наведений аналіз основних типів задач проектування складів бетону, дається огляд розрахункових залежностей, отриманих як авторами, так і іншими дослідниками. Основна увага приділяється розробці алгоритмів багатопараметричного проектування складів важкого цементного бетону. Наведені необхідні кількісні залежності для розв'язання задач проектування складів бетону з нормованими міцносними і деформативними властивостями, морозостійкістю, водонепроникністю, тепловиділенням. Даються приклади розв'язання відповідних задач.

Автори усвідомлюють те, що присвятили свою роботу проблемі, яка ще далека від повного розв'язання, і наступний досвід буде істотно коригувати і доповнювати рекомендовані розрахункові методики.

В основу посібника покладені результати багаторічних досліджень, виконаних у Рівненському державному технічному університеті науковим колективом під керівництвом Заслуженого діяча науки і техніки України, академіка Академії будівництва України, доктора технічних наук, професора Л.Й.Дворкіна.



# РОЗДІЛ 1. ВИХІДНІ ПЕРЕДУМОВИ І ЗАДАЧІ ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БЕТОНУ

## 1.1. Вихідні передумови

Для вирішення однієї з центральних проблем технології бетонних і залізобетонних конструкцій - одержання виробів і конструкцій із заданими властивостями - необхідно удосконалення методології проектування складів бетону. У літературі часто ототожнюють задачі проектування, підбору і розрахунку складів бетону, хоча вони не завжди ідентичні. Проектування складів - найбільш загальна технологічна задача. Воно включає:

- технічні і техніко-економічні обґрунтування, пов'язані з призначенням нормованих показників властивостей бетону, вибором вихідних матеріалів, добавок, легкоукладальності бетонної суміші;
- розрахункову частину, метою якої є визначення рецептури бетонної суміші при заданому критерії оптимальності;
- експериментальне уточнення розрахункових складів.

На сьогодні у технологічній практиці проектування складів бетону знайшли своє застосування досить багато методів, котрі основані на різних теоретичних і технологічних передумовах [1-5]. Всі вони можуть успішно застосовуватись, якщо вирішують поставлені задачі. Як показав час, прагнення зробити максимально універсальною методологію проектування складів і дискусія про перевагу одних підходів над іншими виявились не конструктивними.

Актуальними напрямками розвитку методології проектування складів бетону є:

1. Збільшення "дозволяючої здатності" розрахункових методик, тобто можливості більш повного врахування технологічних факторів і проектних вимог до бетону.
2. 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 поєднанні з системним аналізом. Найбільш загальний підхід до проектування складів бетону оснований на кількі-

сному врахуванні взаємозв'язків типу властивість - структура - склад бетону шляхом аналізу і спільного рішення рівнянь, які зв'язують показники властивостей бетону з параметрами його структури.

Основними передумовами такого підходу можна вважати наступні положення бетонознавства:

1. Більшість властивостей бетону є функціями його структури. У залежності від характеру тих або інших властивостей їх можуть формувати переважно макро- або мікроструктурні особливості бетону. Вплив на властивості бетону його структури визначає взаємозалежність різних властивостей.
2. Кожна з властивостей бетону однозначно пов'язана з відповідними параметрами або критеріями структури, які враховують якісні і кількісні особливості його твердої фази і порового простору. Як для типового композиційного матеріалу структурні параметри бетону враховують особливості його матриці (цементного каменю) і заповнювача, їхню взаємодію.
3. Напрямки зміни різних властивостей бетону при зміні параметрів структури і факторів складу можуть як збігатися, так і бути різними. Проектування складу бетону із заданими властивостями вимагає врахування їхньої спрямованості і, у багатьох випадках, є задачею компромісної.
4. Оптимальна структура бетону - це структура, яка забезпечує комплекс необхідних властивостей при виконанні заданих умов оптимальності (мінімальна витрата цементу, мінімальна вартість бетонної суміші й ін.). Відповідно до цієї умови складу бетону можуть істотно відрізнятись при різних критеріях оптимальності.

У будівельно-технологічній практиці найбільше поширення отримали методи проектування складів бетону з необхідною міцністю на стиск. Це обумовлено, по-перше, тим, що при конструктивних розрахунках міцність бетону є основним його параметром, і, по-друге, припущенням, що з міцністю однозначно пов'язані й інші необхідні властивості бетону. Останнє припущення, однак, є не досить загальним. Дійсно, із міцністю бетону на стиск однозначно зв'язані багато його властивостей: міцність на згин, розтяг, зносостійкість, кавітаційна стійкість і ін. Однак, не є однозначною залежність міцності і морозостійкості, міцності і повзучості і т.д.

У тих випадках, коли, крім міцності бетону на стиск, виникає необхідність нормування ряду інших його будівельно-технічних властивостей, задача проектування складу істотно ускладнюється. При існуючій практиці вона звичайно огрубляється і розрахунок зводиться до врахування ряду обмежень (найчастіше по цементно-водному відношенню) без всебічної оцінки інших впливаючих факторів.

У останні роки при розв'язанні задач проектування складів бетону з комплексом заданих будівельно-технічних властивостей одержала поширення методологія, яка припускає використання комплексу математико-статистичних рівнянь, що зв'язують нормовані показники властивостей бетону із сукупністю тих або інших технологічних факторів [2,6]. Застосування цієї методології, однак, вимагає значної попередньої експериментальної роботи стосовно до конкретної технологічної ситуації і "прив'язане" до вихідних умов моделювання. Водночас, у ряді випадків, наприклад при введенні добавок, застосуванні багатокомпонентних сумішей, такий підхід може виявитися кращим. У цьому випадку реалізується кібернетична концепція "чорного" або "сірого" ящика, а отримані рівняння регресії розглядаються як моделі поведінки досліджуваного об'єкта і дозволяють запроєктувати такий його склад, який забезпечує умови оптимальності. Раціональним може бути об'єднання елементів як структурного так і кібернетичного підходів для рішення ряду задач, з огляду на недостатню теоретичну інформацію, яка не дозволяє запропонувати досить адекватні структурні моделі для усіх властивостей бетонної суміші і бетону, які розглядаються при проектуванні складу.

## 1.2. Основні задачі проектування складів

При проектуванні складів бетон може розглядатися як ізольована система (перший тип задач) і як підсистема більш загальних технологічних систем, наприклад проектування бетонних і залізобетонних конструкцій і технології їх виробництва (другий тип задач). У першому випадку, задача полягає лише в оптимальному забезпеченні заданих параметрів, а в другому випадку вирішується додатково і задача оптимізації цих заданих параметрів (легковкладальності суміші, міцності бетону та ін.).

Найбільш загальна схема системного аналізу при оптимальному проектуванні складів бетону наведена в роботі [2].

Існуюча практика припускає, в основному, розв'язання задач першого типу, що не завжди може бути достатнім. Наприклад, прагнення технологів домогтися максимальної економії цементу при проектуванні бетону заданої міцності непродуктивне, якщо сам показник міцності неоптимальний з позицій вартості конструкцій. Зокрема, застосування бетону підвищеної міцності, як відомо, дозволяє зменшити переріз конструкцій і такий спосіб з позицій витрати цементу на одиницю виробів (конструкцій), а не на кубометр бетону, може виявитися більш вигідним. Аналогічно, не завжди технічно і економічно обґрунтованими є показники легковкладальності бетонних сумішей, від яких істотно залежать склади. Наприклад, якщо критерієм оптимізації є вартість конструкції, застосування жорсткої бетонної суміші може виявитись менше вигідним, з огляду на трудозатрати на укладку бетону, ніж застосування литої суміші, хоча остання містить більшу кількість цементу. У зв'язку з цим видається раціональним, де це можливо, об'єднувати зусилля конструкторів, технологів і економістів для комплексного розв'язання задач конструктивного і технологічного проектування бетону. Приклади рішення задач другого типу при проектуванні складів бетону приведені в роботах [2,7].

При проектуванні складів бетону в задачах другого типу передбачається їх багатоваріантність. Вибір того або іншого складу визначають у конкретних умовах, виходячи з прийнятого критерію оптимальності. Такими критеріями найчастіше можуть бути: мінімальна витрата цементу, мінімальна середня густина бетону, мінімальна вартість бетону. Може бути обраний більш складний критерій, наприклад, вартість конструкцій або навіть усієї споруди в цілому з урахуванням не тільки вартості бетону, але й трудомісткості, вартості виготовлення, перевезення і монтажу конструкцій [2].

У задачах другого типу в якості факторів складу бетонної суміші, яка оптимізується, розглядають не тільки рецептурні (співвідношення заповнювачів, витрата добавки), але технологічні і конструктивні параметри.

Одним із підходів, який пов'язує склад бетонної суміші з технологічним процесом, є теоретичний підхід, розроблений Ю.Сторком[8]. Він запропонував розглядати енергію ущільнення бетонної суміші при вібрації як один з основних параметрів складу суміші, який забезпечує в комплексі з іншими факторами необхідну міцність бетону. Виходячи з цієї передумови, Ю.Сторк вивів ряд рівнянь, що встановлюють за-

лежність між режимом вібрації, складом і фізико-механічними властивостями бетонних сумішей і бетонів.

У роботі [7] отримані рівняння, які зв'язують склад бетону з режимом теплової обробки, і розглянуте їх рішення при різних критеріях оптимальності.

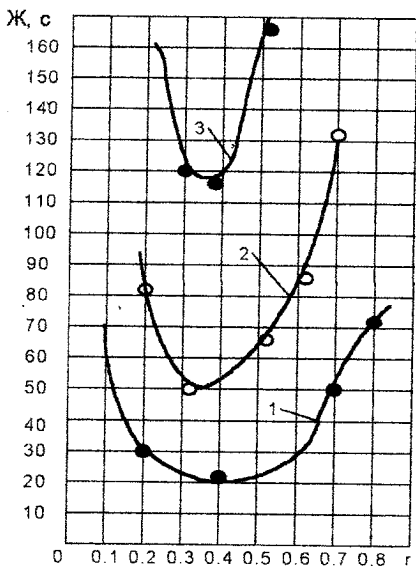
Задачі першого типу можна розділити на групи: однопараметричні, двопараметричні і багатопараметричні. В основу такої класифікації покладена загальна кількість нормованих параметрів для бетонної суміші і затверділого бетону.

Для однопараметричних задач не нормується звичайно в строго визначених кількісних межах показник легковкладальності суміші. Вказується лише його якісна характеристика (суміш напівсуха, жорстка, рухлива, лита). Якісно можуть характеризуватися й окремі показники затверділого бетону (бетон морозостійкий, водонепроникний, сульфатостійкий і ін.). У ряді випадків вказується спосіб виготовлення виробів або виконання бетонних робіт. Можуть задаватись також умови експлуатації конструкцій. У тих випадках, коли це видається можливим, технолог вводить в умову задачі проектування складів кількісні показники, адекватні якісним оцінкам і однопараметрична задача проектування складу трансформується в дво- або багатопараметричну. У інших випадках доводиться, проектуючи склад, який забезпечує нормовані властивості, вводити необхідні обмеження по витраті води, В/Ц, крупності і виду заповнювачів, вмісту добавки.

Найбільше розробленими і реалізованими на практиці є двопараметричні задачі, коли нормованою властивістю бетону є його міцність на стиск  $R_{ст}$ , а бетонної суміші - показник легковкладальності (рухливість або жорсткість). Для розв'язання задач цього типу широко застосовуються розрахунково-експериментальні методи, які використовують ряд відомих технологічних залежностей: міцності бетону від цементно-водного відношення, правило сталості водопотреби бетонних сумішей, правило оптимального вмісту піску та ін.

При розв'язанні таких задач для важких бетонів послідовно визначають цементно-водне відношення, витрату води з урахуванням необхідної рухливості або жорсткості бетонної суміші і витрату заповнювачів, використовуючи допущення про те, що бетонна суміш складається з абсолютних об'ємів усіх її складових. У найпростішому випадку для чотирьохкомпонентної суміші необхідне знання трьох параметрів: цементно-водного відношення (Ц/В), витрати води (В) і фак-





**Рис. 1.1.** Вплив долі піску в суміші заповнювачів на легкоукладальність бетонної суміші (за О.А. Гершбергом):

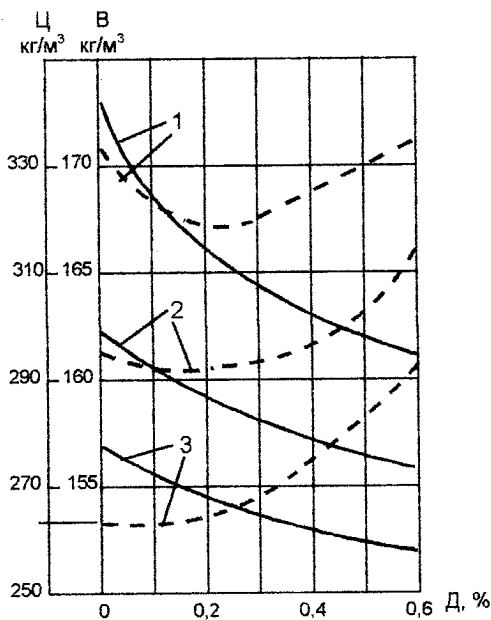
- 1 - номінальний склад 1:1 (цемент : суміш дрібного і крупного заповнювачів);
- 2 - те ж, 1:1.5;
- 3 - те ж, 1:2

тора, який характеризує співвідношення заповнювачів - долі піску в суміші заповнювачів ( $\gamma$ ) або коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином ( $\alpha$ ). Останній фактор можна розглядати як оптимізуючий, тому що лише при деякому оптимальному його значенні в умовах  $\text{Ц/В}=\text{const}$ , можливе досягнення мінімальної витрати цементу (рис. 1.1). Найчастіше за оптимальне приймають співвідношення заповнювачів, яке забезпечує найкращу легковкладальність або мінімальну водопотребу. Для бетонної суміші з більшою кількістю компонентів суворий аналітичний пошук оптимального співвідношення заповнювачів досить складний, що вимагає застосування методів неліній-

ного програмування та ін. У деяких випадках задача може бути спрощена при використанні емпіричних залежностей [9,10].

Оптимізуючим фактором може служити також витрата добавки. Зокрема добавки - пластифікатори дозволяють досягти мінімальної витрати цементу при оптимальній їх витраті (рис. 1.2), яка залежить від необхідної рухливості суміші та міцності бетону. При введенні дисперсних мінеральних наповнювачів, пластифікаторів бетонної суміші і прискорювачів твердіння бетону доцільно використовувати поняття "приведеного" цементно-водного відношення, тобто такого  $\text{Ц/В}$ , при якому міцність бетону з добавками ідентична міцності бетону без добавок:

$$(\text{Ц/В})_{\text{пр}} = \frac{\text{Ц} + K_{\text{ц.е.д}} \text{Д}}{\text{В}}, \quad (1.1)$$



**Рис. 1.2.** Вплив витрати ЛСТ на водопотребу бетонної суміші і витрату цементу:

- водопотреба;
- витрата цементу;
- 1 - Ж=13 с; 2 - Ж=20 с,
- 3 - Ж=27с.

заними з міцністю на стиск.

3. З нормованими параметрами, не зв'язаними з міцністю на стиск.

У першу підгрупу входять, наприклад, задачі, в яких нормуються різні показники міцності бетону.

У табл.1.1 наведені деякі розрахункові формули, що зв'язують міцність бетону на стиск  $R_{ct}$  з іншими властивостями бетону.

При розрахунку складу таких бетонів спочатку знаходиться визначальний параметр із нормованих властивостей бетону та міцність на стиск, що йому відповідає. Далі встановлюється мінімально можливе  $C/V$ , яке забезпечує весь набір властивостей. Під "визначальним параметром" ми розуміємо такий нормований параметр, досягнення

де  $K_{це}$  - коефіцієнт так званої "цементуючої" ефективності наповнювачів, тобто витрата цементу в кг, яку замінює 1 кг добавки;  $D$  - витрата добавки;  $C$  і  $V$  - відповідно витрати цементу і води в  $кг/м^3$ .

Значення  $K_{це}$  може коливатися в широких межах. Наприклад, при введенні золи-виносу  $K_{це} = 0.2...0.3$ , а мікрокремнезему  $K_{це} > 1$ .

Багатопараметричні задачі виникають особливо часто при проектуванні різних спеціальних видів бетону: гідротехнічного, дорожнього, корозійностійкого і т.д. Їх можна розділити на три підгрупи:

1. З нормованими параметрами, однозначно пов'язаними з міцністю бетону на стиск.
2. З нормованими параметрами, неоднозначно пов'язаними з міцністю на стиск.

якого забезпечує одночасне досягнення і всіх інших параметрів, зазначених в умові задачі.

Таблиця 1.1

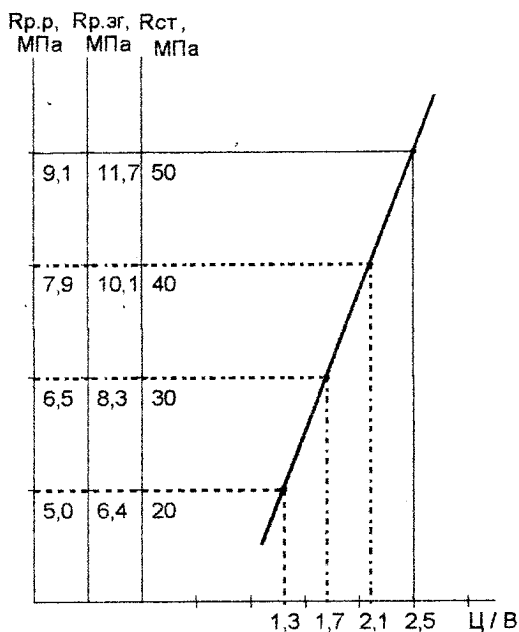
Деякі розрахункові формули властивостей бетону,  
однозначно пов'язаних з його міцністю на стиск

| Нормована властивість бетону                             | Розрахункова формула   | Літературне джерело |
|--|--|---------------------|
| Міцність бетону на розтяг при згині, $R_{p,зг}$          | $R_{p,зг} = 0.08(10R_{ст})^{2/3}$  | [14, 15]            |
| Міцність бетону на розтяг при розколюванні, $R_{p,р}$    | $R_{p,р} = 0.055(10R_{ст})^{2/3}$  | [14, 15]            |
| Міцність бетону при осьовому розтягу, $R_p$              | $R_p = 0.046(10R_{ст})^{2/3}$  | [14, 17]            |
| Міцність бетону на зріз, $R_{зр}$                        | $R_{зр} = 0.093(10R_{ст})^{2/3}$   | [14, 17]            |
| Міцність бетону на сколювання, $R_{ск}$                  | $R_{ск} = 0.162(10R_{ст})^{2/3}$   | [14, 17]            |
| Межа витривалості, $R_v$                                 | $\frac{R_v}{R_{пр}} = 0.6 - 0.005R_{пр}$<br>(при $X \leq 0.1$ )<br>$\frac{R_v}{R_{пр}} = 0.59 + 0.01R_{пр}$<br>(при $0.1 \leq X \leq 0.2$ ), де $X$ - характеристика циклу навантаження; $R_{пр}$ - призмova міцність ( $R_{пр} \approx 0.783R_{ст}$ ) | [16]                |
| Модуль пружності (початковий або миттєвий) бетону, $E_б$ | $E_б = \frac{5,3R_{ст}}{20 + R_{ст}} \cdot 10^5$   | [17]                |
| Динамічний модуль пружності, $E_{дин}$                   | $E_{дин} = \frac{4 \cdot 10^3 R_{ст}}{1 + 0,07R_{ст}}$   | [17]                |

Некоректним є формулювання задач даної групи умовами:

$P_1 = a_1, P_2 = a_2 \dots P_n = a_n$ , де  $P_i$  - нормована властивість,  $a_i$  - її задане значення. Очевидно, більш правильно формулювати умови у вигляді:

$P_x = a_x$  при  $P_1 \geq a_1$  або  $P_1 \leq a_1, P_2 \geq a_2$  або  $P_2 \leq a_2 \dots P_n \geq a_n$  або  $P_n \leq a_n$ , де  $P_x$  - визначальний параметр, а  $a_x$  - його задане значення.



**Рис. 1.3** Вплив Ц/В на міцність на стиск ( $R_{ст}$ ), розтяг при згині ( $R_{p,зг}$ ) і розтяг при розколюванні ( $R_{p,p}$ )

ви можуть використовуватися різні технологічні прийоми: введення добавок – регуляторів властивостей, зміна умов твердіння, підбір вихідних матеріалів і ін.

Нормованими параметрами в задачах другої підгрупи, поряд із міцністю на стиск, можуть бути повзучість, морозостійкість, тепловиділення і т.д.

На рис. 1.4 показаний приклад взаємозв'язку між повзучістю та вмістом цементного каменю при  $R_{ст} = \text{const}$ . Міру повзучості бетону розраховували за формулою, запропонованою Європейським комітетом по бетону [18]:

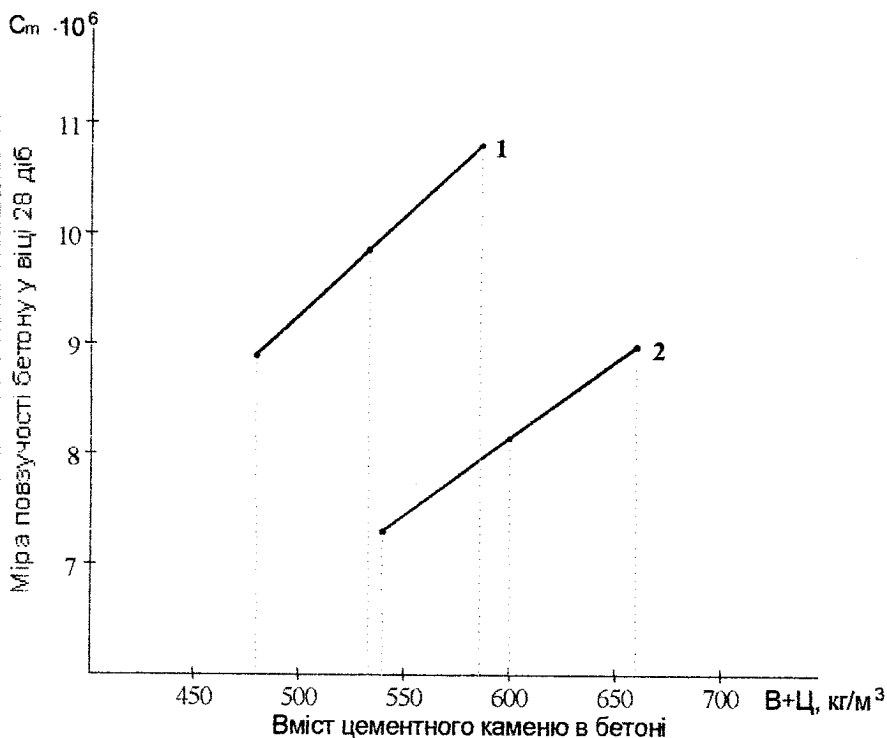
$$C_{m(28)} = \frac{kB / Ц(B + 0.33Ц)}{\sqrt{10 R_{ст}}}, \quad (1.2)$$

Наприклад, із рис. 1.3 випливає, що якщо нормуються:  $R_{ст} \geq 20$  МПа,  $R_{p,зг} \geq 8$  МПа,  $R_{p,p} \geq 8$  МПа, то, мабуть, визначальним параметром є  $R_{p,p}$  і необхідне Ц/В, яке забезпечує всі три показники властивостей дорівнює 2.1.

Принциповою особливістю таких задач є існування області Ц/В для кожного складу бетону, у межах якої знаходиться Ц/В, яке забезпечує всі нормовані показники. Чим вужча ця область (рис. 1.3), тим ближче наближається склад до оптимального і  $Ц \rightarrow \text{min}$ . Для досягнення цієї умо-

де  $k$  - коефіцієнт, який залежить від розмірів перерізу елемента ( $r$ ) і вологості навколишнього середовища ( $\theta$ ). Наприклад, при  $r = 2.5$  см,  $\theta = 70\%$  коефіцієнт  $k = 0.92 \cdot 10^{-6}$ .

З формули (1.2) і рис. (1.4) випливає, що при постійному В/Ц і, отже, міцності бетону, повзучість його може істотно відрізнятись в залежності від вмісту цементного каменю в бетоні. Аналогічно, можна показати неоднозначність взаємозв'язку міцності бетону з групою властивостей, обумовлених капілярною пористістю (водопоглинанням, морозостійкістю і ін.).



**Рис. 1.4** Вплив вмісту цементного каменю в бетоні на міру повзучості: 1 –  $R_{ср} = 20$  МПа; 2 –  $R_{ср} = 30$  МПа

Як відомо, капілярну пористість можна розраховувати за формулою [19]:

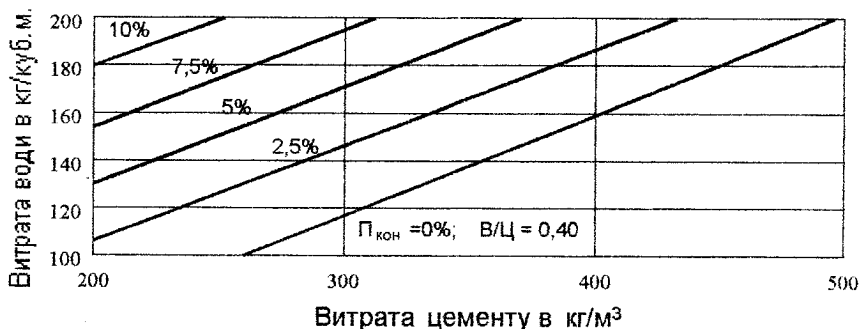


$$P_k = \frac{B - w_t \cdot \alpha \cdot C}{1000}, \quad (1.3)$$

де  $w_t$  - кількість хімічно зв'язаної води (0.47...0.52),  $\alpha$  - ступінь гідратації цементу.

Зменшення В/Ц і зростання кількості зв'язаної води знижує капілярну пористість, але при цьому підвищення витрати цементу приводить до збільшення об'єму цементного каменю в бетоні і дещо підвищує пористість.

На рис.1.5 наведена за даними Г.І. Горчакова [19] номограма капілярної пористості бетону. Лінії номограми однакової пористості при  $P > 0$  не відповідають постійному В/Ц, а отже і постійній міцності бетону.



**Рис. 1.5 Номограма капілярної пористості (за Г.І. Горчаковим)**

Параметри, нормовані в багатопараметричних задачах, можуть формуватися як тими самими, так і зовсім різними технологічними факторами. У наведеному вище прикладі міцність на стиск і повзучість визначаються насамперед водоцементним відношенням. Аналогічно, водоцементне відношення є основним впливаючим фактором, якщо нормуються міцність і морозостійкість (особливо коли не використовується повітряновтягувальна добавка). Однак, на відміну від задач першої підгрупи, тут нормовані параметри зв'язані менше жорстко (при одній і тій же міцності повзучість бетону може бути різною в залежності від вмісту цементного каменю, рис. 1.4).

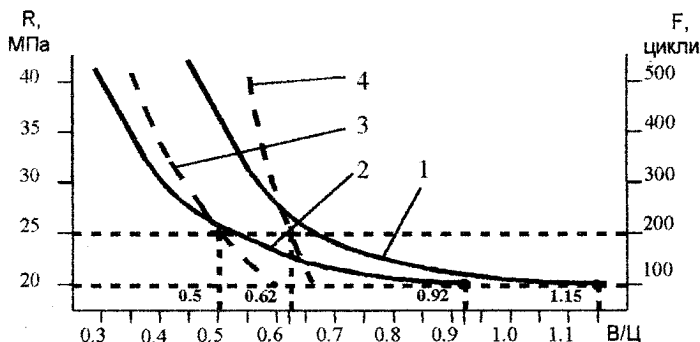
Для розв'язання задач даної підгрупи, так само як і попередньої, встановлюється область В/Ц або Ц/В, яка забезпечує нормовані параметри, розглядаються технологічні шляхи її звуження й остаточно необхідне значення нормованого В/Ц  $\rightarrow$  (В/Ц)<sub>н</sub>.

Регулювання (В/Ц)<sub>н</sub> у цих задачах можливе, однак, за рахунок зміни інших факторів складу, зокрема кількості цементного тіста, об'єму втягнутого повітря й ін.

Наприклад, нормуються середня міцність бетону  $R_{ct}=65$  МПа (В50) і повзучість  $C_m \cdot 10^6=3.5$ . Рухливість бетонної суміші на гранітному щебені і середньозернистому кварцевому піску прийнята ОК=2 см. Активність цементу  $R_{ц} = 50$  МПа. За розрахунковою формулою міцності бетону  $R_b = AR_{ц}(Ц/В - 0.5)$  при  $A = 0.6$  маємо В/Ц = 0.38. При витраті води  $В=175$  л/м<sup>3</sup> і, відповідно, витраті цементу  $Ц = 460$  кг/м<sup>3</sup>, міра повзучості не забезпечується ( $C_m \cdot 10^6=4.5$ ). Для досягнення нормованого значення  $C_m \cdot 10^6$  необхідно зменшити значення В/Ц. Практичний збіг В/Ц з умов міцності і повзучості можна досягти переходом на більш жорстку суміш.

Потужним засобом зменшення “ножиць” по В/Ц в морозостійких бетонах є залучення повітря (рис.1.6). При цьому характерно, що значно збільшуючи В/Ц для досягнення заданої морозостійкості, втягнуте повітря в той же час зменшує В/Ц з умови міцності. При цьому загальний позитивний ефект зменшення витрати цементу може бути дуже значним, особливо в бетонах із високою заданою морозостійкістю при помірному нормованому значенні міцності [20]. З рис.1.6, зокрема, випливає, що  $R_{ct} = 20$  МПа і F200 забезпечуються: без втягнутого повітря при В/Ц=0.5; із введенням втягнутого повітря В/Ц=0.62. При цьому розмір “ножиць” по В/Ц в першому випадку складає 0.65, а в другому 0.3.

Для ряду задач проектування складів бетону В/Ц не є визначальним фактором, який забезпечує комплекс нормованих властивостей. Для таких задач варто знаходити інший, істотний для всіх нормованих властивостей технологічний фактор. Визначення необхідного значення цього фактора стає головною задачею розрахунку складів. Наприклад, для легких бетонів на пористих заповнювачах головними



**Рис. 1.6** Зміна В/Ц в залежності від заданих значень міцності і морозостійкості бетону:

1. Крива  $R_{ст}$  без втягнутого повітря;
2. З 20 л. втягнутого повітря (міцність розрахована за формулою 2.33 при  $\rho_{Ai} = 0.55$ ,  $R_n = 50$  МПа,  $D = 0$ );
3. Крива морозостійкості бетону без втягнутого повітря;
4. З 20 л. втягнутого повітря (морозостійкість розрахована за формулою 2.83 при  $K=170$ )

нормованими властивостями бетону є міцність на стиск ( $R_{ст}$ ), середня густина ( $\rho_b$ ), а також легковкладальність суміші ( $Ж$ ).

Нижче записані рівняння зв'язку цих властивостей з основними факторами (для керамзитобетону) :

$$R_{ст} = f(R_p, R_k, \varphi); \quad \rho_b = f(\rho_p, \rho_k, \varphi); \quad Ж = f(Ж_p, F_{(k)}, \varphi),$$

де  $R_p$  - міцність розчинної складової,  $R_k$  - міцність керамзиту,  $\varphi$  - об'ємна концентрація керамзиту,  $\rho_p$  - щільність розчинної складової,  $\rho_k$  - щільність керамзиту,  $Ж_p$  - легковкладальність розчинної складової,  $F_{(k)}$  - функція, яка характеризує геометрію керамзиту.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ

### 2.1. Міцність

Розрахункове визначення складу бетону з заданою міцністю стало можливим після встановлення Д. Абрамсом у 1919 р. закону (правила) водоцементного відношення [21]. Обробивши результати більш ніж 50 тисяч дослідів, Д.Абрамс запропонував емпіричну формулу

$$R_{ст} \doteq \frac{k}{A^x}, \quad (2.1)$$

де  $k$  - коефіцієнт міцності,  $A$  - постійний коефіцієнт,  $x$  - відношення об'єму води до об'єму цементу, насипну густину якого прийняли рівною  $1500 \text{ кг/м}^3$ .

Як відомо, правило Абрамса впливає з більш загальної формули Фере [22], що встановлює зв'язок між міцністю бетону і його щільністю, сформульованої в 1892 р. У Росії ще наприкінці 19-го сторіччя були опубліковані роботи І.Малюги, І.Самовича [23,24], у яких наводяться експериментальні дані, які підтверджують істинність закону В/Ц. Однак цінність робіт Д. Абрамса полягає в тому, що закон В/Ц покладений ним в основу практичної методології добору складу важкого бетону.

З часу відкриття закону В/Ц численні теоретичні дослідження були спрямовані на доведення його недоліків і обмежень. Але в той же час практика переконливо показала його працездатність і достатню надійність.

Як відомо, існують 4 групи теорій міцності бетону: феноменологічні, статистичні, молекулярні і структурні [15].

Для технологічних задач проектування складів бетону найбільш перспективне використання структурних теорій міцності, які базуються на певних моделях будови бетону. Загальною особливістю всіх структурних теорій є те, що бетон розглядається як гетерогенне тіло, яке складається з двох компонентів: цементного каменю і заповнювачів. У цементному камені поряд із кристалічними новоутвореннями і гелем виділяють пори.

Вибір розрахункової формули для оцінки міцності бетону повинен бути безпосередньо зв'язаним із механізмом його руйнування. Як відомо, у важкому бетоні, виготовленому на заповнювачах із міцніс-

тю, яка значно перевищує міцність цементного каменю, руйнування відбувається при досягненні останнім граничних деформацій.

Для легких бетонів на пористих заповнювачах деформації розчинної складової істотно менші деформацій заповнювачів і руйнування відбувається внаслідок досягнення граничного стану пористим заповнювачем.

Для важких і високоміцних легких бетонів, у світлі сучасних уявлень, істотний вплив на міцність має зчеплення між цементним каменем або розчином і заповнювачем. Існує ряд розрахункових формул міцності бетону, які намагаються врахувати складний характер взаємодії заповнювача і цементної матриці на міцність бетону. Ці формули виведені на основі різних теоретичних передумов і гіпотез. Наприклад, базуючись на будові бетону по Гансену, Шейкін [25] висунув гіпотезу про те, що міцність бетону при осьовому стиску визначається граничною розтягуваністю кристалічного зростка цементного каменю у напрямку, нормальному до дії зовнішньої сили. При збереженні зчеплення з заповнювачами руйнуючі напруження, а отже і міцність важкого бетону при осьовому стиску будуть більші міцності цементного каменю. За О.Є. Шейкіним, Ю.В. Чеховським і М.І. Брусером [25]:

$$R_{ст} = \frac{R_{ц.к.}}{1 - \frac{(\mu_{ц} E_3 - \mu_3 E_{ц.к.})(1 - \theta)q_3}{(E_{ц.к.} q_{ц} + E_3 q_3) \mu_{ц}}}, \quad (2.2)$$

де  $R_{ц.к.}$  - міцність цементного каменю;  $\mu_{ц}$  - коефіцієнт Пуассона цементного каменю;  $\mu_3$  - середній коефіцієнт Пуассона заповнювачів;

$\theta$  - коефіцієнт ковзання при частковому порушенні зчеплення цементного каменю з заповнювачем;  $q_{ц}$  - об'єм цементного каменю в одиниці об'єму бетону;  $q_3$  - об'єм заповнювачів в одиниці об'єму бетону;  $E_{ц.к.}$  - модуль пружності цементного каменю;  $E_3$  - середній модуль пружності заповнювачів.

Згідно з термодинамічною теорією твердих тіл І.М.Ахвердов [26] припустив, що зміна міцності бетону повинна бути пропорційною зміні ентропії системи. Розв'язавши диференціальне рівняння в межах об'ємної концентрації складових двокомпонентної моделі бетону, І.М.Ахвердов отримав формулу міцності бетону як функцію міцності розчину ( $R_{р.с.}$ ) і об'ємної концентрації заповнювача ( $V_3$ ):



$$R_{cr} = R_{p,c} \left( 1 - \frac{\alpha_{np}}{2} k_3 V_3 \right), \quad (2.3)$$

де  $\alpha_{np}$  - коефіцієнт, який визначає вплив структурної неоднорідності матриці і щільність зчеплення;  $k_3$  - коефіцієнт, який залежить від ступеня насичення бетону крупним заповнювачем.

Ряд формул, які враховують взаємодію заповнювача і цементного каменю або розчину, отримані і в інших роботах [15].

Сприяючи розвитку уявлень про механізм руйнування бетону і синтез його міцності, ці залежності однак не можуть бути використані для розв'язання задач проектування складів, тому що вони не зв'язані прямо з факторами складу бетонної суміші, мають досить складну структуру. Навіть коли зв'язати в цих формулах міцність цементного каменю або розчину з В/Ц, все одно їх використання виявиться дуже проблематичним, оскільки вони включатимуть ряд недостатньо розроблених коефіцієнтів і констант.

З структурних теорій останнього років можна відзначити теорію штучних будівельних конгломератів (ШБК), основи якої розвинені І.О.Риб'євим [27]. Одним з положень цієї теорії є закон міцності оптимальних структур, відповідно до якого добуток міцності бетону деякої оптимальної структури на  $(В/Ц)^n$  є величиною сталою:  $R_{cr} \cdot (В/Ц)^n = \text{const}$ . Практична реалізація цього закону при проектуванні складу важкого бетону вимагає значної попередньої експериментальної роботи для визначення В/Ц цементного каменю максимальної міцності і показника ступеня  $n$ .

Найбільш чисельною є група розрахункових формул, оснований на залежності між міцністю бетону і щільністю цементного каменю. При цьому фізико-механічні властивості заповнювачів враховуються в коефіцієнтах цих формул.

Фере [22] першим, базуючись на структурних уявленнях про залежність між міцністю важкого бетону і щільністю цементного каменю, запропонував структурний критерій  $V_u / (V_u + V_v + V_0)$ , пов'язаний із міцністю бетону  $R_{cr}$  квадратичною функцією:

$$R_{cr} = k \left( \frac{V_u}{V_u + V_v + V_0} \right)^2, \quad (2.4)$$

де  $V_u$ ,  $V_v$ ,  $V_0$  - абсолютні об'єми цементу, води і повітря;  $k$  - коефіцієнт, який залежить від якості цементу, тривалості і режиму твердіння. Критерій Фере не враховував зміну структури цементного каменю в

міру гідратації, що дозволило Пауерсу [28,29] надалі його видозмінити і представити як концентрацію твердих продуктів гідратації цементу в просторі, доступному для цих речовин, тобто відношенням об'єму гелю до сумарного об'єму гелю і пустот [28]:

$$x = \frac{k_r V_{п.ц} \alpha}{V_{п.ц} \alpha + B / Ц} \approx \frac{0.647 \alpha}{0.319 \alpha + B / Ц}, \quad (2.5)$$

де  $k_r = 2.09 \dots 2.2$  - коефіцієнт збільшення об'єму продуктів гідратації;  
 $Ц$  - витрата цементу;  $V_{п.ц}$  - питомий об'єм цементу ( $V_{п.ц} = 1/\rho_{п.ц} = 0.319$  см<sup>3</sup>/г), величина зворотна дійсній густині цементу;  $\alpha$  - доля гідратованого цементу.

Близькі до критерію Пауерса критерії міцності цементного каменю були потім запропоновані в ряді робіт. Деякі з них наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Критерії міцності і структурні моделі міцності бетону та цементного каменю

| Автор            | Вид залежності  |
|------------------|---|
| Фере [22]        | $R_{ст} = k \left( \frac{V_{п.ц}}{V_{п.ц} + V_{в.} + V_0} \right)^2,$ <p>де <math>k</math> - коефіцієнт, що залежить від якості цементу, тривалості і режиму його твердіння; <math>V_{п.ц}</math>, <math>V_{в.}</math>, <math>V_0</math> - абсолютні об'єми відповідно цементу, води і повітря.</p>   |
| Пауерс [28,29]   | $R_{ц.к.} = A x^n,$ <p>де <math>A</math> і <math>n</math> - константи, які характеризують відповідно міцність цементного гелю й особливості цементу.</p> $x = \frac{0.647\alpha}{0.319\alpha + B/Ц},$ <p>де <math>\alpha</math> - доля гідратованого цементу.</p>   |
| Джулинський [30] | $R_{ц.к.} = R_0 e^{kv},$ <p>де <math>R_0</math> і <math>k</math> - емпіричні константи; <math>v = V_{г.ц.}/(V_{г.ц.} + B_{вип.} + V_{п.ц.})</math>, де <math>V_{г.ц.}</math> - об'єм гідратованого цементу в одиниці об'єму зразка; <math>B_{вип.}</math> - об'єм води, яка випарувалась; <math>V_{п.ц.}</math> - заповнені повітрям пустоти.</p> |

| Автор                    | Вид залежності  |
|--------------------------|---|
| Віщерс [31]              | $R_{ц.к.} = 310 V_T^{2.7},$ <p>де <math>V_T</math> - абсолютний об'єм твердого матеріалу, який складається з продуктів гідратації цементу і не до кінця гідратованих зерен цементу в одиниці об'єму зразка затверділого цементу.</p>  |
| Попович [32]             | $R_{ц.к.} = k_B V_{г.ц.}^{1.5},$ <p>де <math>k_B</math> - параметр, який залежить від способу зберігання і випробування, В/Ц та інших факторів; <math>V_{г.ц.}</math> - загальний об'єм продуктів гідратації на 1 грам цементу.</p>   |
| Рой і Гоуда [33]         | $R_{ц.к.} = R_0 e^{-bp},$ <p>де <math>R_0</math> і <math>b</math> - константи; <math>p</math> - пористість.</p>   |
| Шейкин [25]              | $R_{ц.к.} = 310 d_{відн.}^{2.7},$ <p>де <math>d_{відн.}</math> - відносна густина цементного каменю.</p>  |
| Волженський, Чистов [34] | $R_{ц.к.} = f(N),$ $\text{де } N = \frac{\rho_{ц.}[\rho_{ц.}(1+n) - \rho_{ц.к.}(1-\alpha)]}{\rho_{ц.к.}[\rho_{ц.} - \rho_{ц.к.}(1-\alpha)]},$ <p>де <math>\rho_{ц.}</math>, <math>\rho_{ц.к.}</math> - дійсна густина відповідно цементу і цементного каменю.</p>   |
| Гершберг, Левін [35]     | $R_{ст} = kR_{ц.}(\varphi_{ц.} - \varphi_0),$ <p>де <math>\varphi_{ц.} = V_{ц.}/(V_{ц.} + V_B)</math> - об'ємна концентрація цементу в цементному камені; <math>k</math> і <math>\varphi_0</math> - деякі умовні параметри.</p>   |
| Дворкін, Шушпанов [2]    | $R_{ст} = A L_R + b,$ $\text{де } L_R = \frac{1.294\alpha\Pi}{(1-0.42\alpha)(B-0.42\alpha B_i + \sum V_{п.д.})},$ <p>де <math>\sum V_{п.д.}</math> - сумарний об'єм додаткових пор в бетоні, утворених втягнутим повітрям, недостатчею цементного каменю і т.д.; <math>B_i</math> - водопотреба бетонної суміші за відрахуванням води, іммобілізованої заповнювачами; <math>A</math> и <math>b</math> - коефіцієнти, які характеризують особливості заповнювачів.</p> |

У ряді робіт [2,36] формули типу Фере і Пауерса використовуються для проектування складів бетону з заданою міцністю. Однак, алгоритми таких методик більш складні і менше зручні, ніж алгоритми методик, де використовується як наближена характеристика пористості цементного каменю В/Ц або Ц/В. Шляхом нескладних перетворень параметр В/Ц можна ввести у формулу Фере:

$$R_{ct} = k \left( \frac{V_{ц}}{V_{ц} + V_{в} + V_0} \right)^2, = k \frac{1}{\left( 1 + \frac{V_{в} + V_0}{V_{ц}} \right)^2}. \quad (2.6)$$

При  $V_0 = 0$  формула (2.6) матиме вигляд:

$$R_{ct} = \frac{k}{\left( 1 + \frac{V_{в}}{V_{ц}} \right)^2}, \quad (2.7)$$

де  $\frac{V_{в}}{V_{ц}}$  - водоцементне відношення за об'ємом.

Формула Пауерса, коли прийняти  $\alpha$  як  $f(R_{ц})$  трансформується як:

$$x = \frac{k_1 R_{ц}}{k_2 R_{ц} + В/Ц}, \quad (2.8)$$

де  $k_1, k_2$  - емпіричні константи.

Аналогічно, простежується зв'язок з В/Ц і в формулі Л.Й.Дворкіна і В.А.Шушпанова [2]. Особливістю останньої є те, що поряд із загальним В/Ц в ній враховується й В/Ц цементного каменю в бетоні (т.зв. "дійсне В/Ц"). Слід, однак, зазначити, що теорія "дійсного В/Ц" розроблена недостатньо і розрахунок цього параметра поки що становить труднощі.

Практика розрахунку складів бетону з заданою міцністю пройшла відому еволюцію від використання формул типу Абрамса, Беляєва, Графа [21,37,38], які встановлюють її однозначний зв'язок з В/Ц, до формул типу Болоея, Яшвілі, Скрамтаєва, Баженова [7, 39, 40], які пропонують залежність міцності від Ц/В. Лінійні функції  $R_{ct} = f(Ц/В)$  у даний час є основними вихідними формулами визначення витрати цементу у важких бетонах. У той же час ще Болоеєм було зазначено, що його розрахункова формула:

$$R_{ct} = (Ц/В - 0.5) k \quad (2.9)$$

справедлива в області  $\text{Ц}/\text{В} = 0.9 \dots 2.5$ . Для загального випадку Беломей запропонував нелінійний варіант формули міцності:

$$R_{\text{ст}} = \left[ \left( \frac{\rho_{\text{б.с.}}}{2.35} \right)^2 - \text{Ц} / \text{В} \right]^y \frac{k}{2}, \quad (2.10)$$

де  $\rho_{\text{б.с.}}$  - густина бетонної суміші;  $y$  - коефіцієнт, який залежить від виду цементу і змінюється в межах  $1.2 \dots 2.0$ ;  $k$  - коефіцієнт, який залежить від якості цементу, строку твердіння і способу зберігання.

Нелінійність функції  $R_{\text{ст}} = f(\text{Ц}/\text{В})$  доведена багатьма експериментальними дослідженнями, хоча в деяких роботах [41] це положення заперечується. Ю.М.Баженов запропонував [1] загальну нелінійну функцію  $R_{\text{ст}}=f(\text{Ц}/\text{В})$  замінити частковими кусочно-лінійними залежностями:

$$R_{\text{ст}}=AR_{\text{ц}}(\text{Ц}/\text{В} - 0.5), \quad \text{при } \text{Ц}/\text{В} \leq 2.5; \quad (2.11a)$$

$$R_{\text{ст}}=A_1R_{\text{ц}}(\text{Ц}/\text{В} + 0.5), \quad \text{при } \text{Ц}/\text{В} > 2.5. \quad (2.11b)$$

Шляхом узагальнення довідкових даних виведена [1] єдина формула з усередненими коефіцієнтами

$$R_{\text{ст}} = 0,56R_{\text{ц}} (\text{Ц} / \text{В} - 0,5), \quad (2.12)$$

В.П.Сизов [3] також пропонує використовувати одну формулу:

$$R_{\text{ст}} = AR_{\text{ц}}(\text{Ц}/\text{В} - 0.5), \quad (2.13)$$

де  $A$  - коефіцієнт, який уточнюється в залежності від ряду факторів, у тому числі від  $\text{Ц}/\text{В}$ . Варто, однак, зауважити, що сталість константи  $0.5$  у формулі (2.13) не є математично строгою, хоча і прийнятною для технологічних розрахунків, з урахуванням подальшої адаптації складів.

У роботі [42] рекомендується використовувати на всьому інтервалі  $\text{Ц}/\text{В}$  формулу:

$$R_{\text{ст}} = \frac{(2.3R_{\text{ц}} + 100)\text{Ц} / \text{В} - 80}{10}, \quad (2.14)$$

При  $\text{Ц}/\text{В} > 2.5$  одержану за формулою (2.14) міцність бетону слід зменшити на величину  $\Delta R$  ( $y$  %), яку знаходять з виразу  $\Delta R = 0.23R_{\text{ц}}(\text{Ц}/\text{В} - 2.5)$ .

М.З.Симоновим [36] запропоновано використовувати для попереднього розрахунку складу бетону модифіковану формулу Фере:

$$R_{\text{ст}} = 0.49AR_{\text{ц}} \left( \frac{3.1\text{Ц} / \text{В}}{3.1 + \text{Ц} / \text{В}} \right)^2, \quad (2.15)$$



де  $A$  - коефіцієнт якості заповнювачів, який знаходиться в інтервалі 0.8...1.1.

У табл. 2.2 наведені розрахункові дані міцності бетону в інтервалі  $C/B=1...3$ , отримані з використанням формул (2.11)...(2.15), із припущенням, що у усіх випадках  $R_c = 40$  МПа, пісок кварцевий із модулем крупності 2, гранітний щебінь фракції 5-20 мм.

Таблиця 2.2.  
Результати розрахунку міцності бетону за формулами  
(2.11, 2.13, 2.14, 2.15)

| $C/B$<br>№ формули | 1.0  | 1.25 | 2.0  | 2.5  | 3.0  |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| 2.11               | 11   | 22   | 33   | 44   | 51.8 |
| 2.13               | 11   | 22   | 33   | 42.4 | 51   |
| 2.14               | 11.2 | 21   | 30.4 | 40   | 47.3 |
| 2.15               | 11.2 | 20   | 29   | 37   | 45   |

Примітка. При розрахунку міцності використані значення коефіцієнтів у формулах:

(2.11)  $A=0.55$  при  $C/B \leq 2.5$ ,  $A_1=0.37$  при  $C/B > 2.5$ ;

(2.13)  $A=0.55$  при  $C/B \leq 2.25$ ,  $A=0.53$  при  $C/B=2.5$ ,  $A=0.51$  при  $C/B=3.0$ ;

(2.15)  $A=1.0$ .

Аналіз даних табл. 2.2 показує непогану збіжність формул (2.11)... (2.14) при  $C/B \leq 2.0$ . З подальшим ростом  $C/B$  міцність, розрахована за формулами (2.14), (2.15) дає суттєво занижені результати. При виборі найкращої розрахункової формули можна взяти до уваги, що в області високих  $C/B$  ( $C/B > 2$ ) вибір знака у формулі (2.11) не завжди однозначний.

Формула (2.14) не дозволяє врахувати особливості заповнювачів. Формула (2.15) в області високих  $C/B$  дає істотно занижені результати. Мабуть має значення той факт, що досліди Фере, модифікацією формули якого є залежність (2.15), виконані на бетонах із відносно невисокими значеннями  $C/B$ . Таким чином, найзручніша для практичних розрахунків у широкому діапазоні  $C/B$  формула (2.13).

Відомо [1], що залежність міцності бетону від  $C/B$  строго виконується лише при інших "рівних умовах". Багато досліджень [43,44] показали вплив на міцність, поряд із  $C/B$ , легковкладальності бетонної суміші, об'ємної концентрації цементного каменю і ряду інших факто-

рів. Зроблено ряд спроб ускладнити залежність міцності бетону від Ц/В або В/Ц, але при цьому завжди втрачається основна їх перевага - однозначність функції  $R_{ct}=f(C/V)$ , що істотно спрощує процедуру розрахунку. Наприклад, у формулі [45]:

$$R_{ct}=R_{ц} \cdot \frac{0.6 - 0.0014B}{(B/C)^{1.3}}, \quad (2.16)$$

зроблена спроба врахувати додатковий вплив води (В). Але якщо врахувати, що сама витрата води за межами області сталості водопотреби залежить від В/Ц, то для ряду випадків розрахунок за формулою (2.16) не має точного розв'язку.

Більш зручним видається врахування факторів (поряд із Ц/В), які істотно позначаються на міцності бетону, системою поправок  $\Delta A_i$  для коефіцієнта А в формулі (2.13). Така система розроблена В.П. Сизовим.

Відповідно до його рекомендацій [3] при використанні:

- щебеню

$$A = 0,65 - 0,012D_{ш} - 0,03D_{щ}; \quad (2.17a)$$

- гірського гравію

$$A = 0,61 - 0,017D_{ш} - 0,03D_{щ}; \quad (2.17б)$$

- річкового або морського гравію

$$A = 0,57 - 0,014D_{ш} - 0,03D_{щ}, \quad (2.17в)$$

де  $D_{ш}$  і  $D_{щ}$  - вміст відмулюваних домішок відповідно в піску і щебені або гравії.

Поправки  $\Delta A_i$  враховують:

- показник рухливості ОК:

$$\Delta A_1 = -0,0033OK \quad (\text{при } OK \leq 2\text{см } \Delta A_1 = 0); \quad (2.18a)$$

- показник жорсткості Ж:

$$\Delta A_1 = 0,0012Ж \quad (\text{при } Ж \leq 5 \text{ сек. } \Delta A_1 = 0); \quad (2.18б)$$

- нормальну густоту цементу НГ:

$$\text{при } НГ > 27\% \quad \Delta A_2 = -0,0075(НГ - 27); \quad (2.18в)$$

$$\text{при } НГ < 27\% \quad \Delta A_2 = 0,01(27 - НГ); \quad (2.18г)$$

- модуль крупності піску  $M_k$ :

$$\Delta A_3 = 0,01(M_k - 3); \quad (2.18д)$$

- найбільшу крупність крупного заповнювача  $D_{ш}$ :

$$\text{при } D_{ш} = 10 \text{ мм} - \Delta A_4 = -0,03;$$

$$D_{ш} = 20 \text{ мм} - \Delta A_4 = -0,02;$$

$$D_{ш} = 40 \text{ мм} - \Delta A_4 = -0,01;$$

$$D_{щ} = 80 \text{ мм} - \Delta A_4 = 0;$$

$$D_{щ} = 150 \text{ мм} - \Delta A_4 = 0,01. \quad (2.18\text{е})$$

Остаточню визначається алгебраїчна сума  $\sum \Delta A$  поправок ( $\Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3 + \Delta A_4$ ) і знаходиться значення коефіцієнта  $A$  по формулі:

$$A = A_0 + \sum \Delta A. \quad (2.19)$$

І.М. Грушко запропоновано [46] коефіцієнт  $A$  знаходити як добуток коефіцієнтів, які враховують вплив макро-, мезо- і мікроструктури на міцність бетону. Останні у свою чергу залежать від режиму твердіння, мінералогічного складу цементу і добавок, властивостей і кількості щебеню в суміші. Однак для практичних розрахунків систему коефіцієнтів поліструктури бетону ще не можна вважати достатньо розробленою.

Формула (2.13) призначена для розрахунку міцності на стиск бетону нормального твердіння в 28-добовому віці. Представивши коефіцієнт  $A$  як інтегральний мультиплікативний коефіцієнт  $rA_i$ , можна значно збільшити “дозволяючу здатність” цієї формули, зробити її придатною для розрахунку Ц/В бетонів з різними умовами твердіння, у різному віці і т.д.

Вираз для мультиплікативного коефіцієнта  $rA_i$  можна представити у виді:

$$rA_i = A A_1 A_2 \dots A_i, \quad (2.20)$$

де  $A_i$  - вихід міцності, зумовлений дією визначеного фактора, щодо міцності, розрахованої з урахуванням всіх попередніх коефіцієнтів ( $A_{i-1} \dots A$ ). Коефіцієнт  $A$  можна знаходити за методикою [3] з урахуванням поправочних коефіцієнтів за формулами (2.17...2.19). Введення мультиплікативного коефіцієнта у формулу міцності проводять з допущенням, що всі множники  $A_i$  взаємозалежні, а також не залежать від  $R_{ц}$  і В/Ц. З огляду на те, що розрахункові значення міцності є лише базовими і підлягають експериментальному коригуванню, це допущення можна прийняти з відомим ступенем точності.

Звичайна технологічна інформація дозволяє врахувати в мультиплікативному коефіцієнті  $rA_i$ , крім коефіцієнта  $A$ , як правило до 2...3 додаткових коефіцієнтів  $A_i$ . Ступінь огрубленості розрахунків залежить від рівня деталізації використовуваних коефіцієнтів. Наприклад, коефіцієнт  $A_r$ , який характеризує вплив тривалості нормального твердіння можна знайти з відомої логарифмічної залежності:

$$A_r = \lg n / \lg 28 = 0.69 \lg n, \quad (2.21)$$

де  $n$  - тривалість твердіння, діб.

У той же час емпіричні значення цього коефіцієнта для кожного строку твердіння  $n$  можуть знаходитися в досить широких межах, в залежності від речовинного і мінералогічного складу цементів і інших факторів. Для бетону на звичайному й алітовому цементах у віці 7 сут. 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  $A_r$  дорівнюють, відповідно, 0.4...0.6; 1.4...1.65; 1.4...2.0 [47].

При розрахунку складу монолітного бетону, а також врахуванні наступного за пропарюванням росту міцності, важливим фактором, який визначає вихід міцності, є температура твердіння. Значні експериментальні дані щодо впливу температурного фактора на міцність бетону наведені в роботах [48,49] (табл.2.3).

Таблиця 2.3

Вихід міцності бетону на стиск при різних температурах твердіння, у % від 28-добової міцності [48]

| Бетон   | Строк твердіння, діб | Середня температура бетону, °С |    |    |     |     |     |
|---|----------------------|--------------------------------|----|----|-----|-----|-----|
|   |                      | 0                              | 5  | 10 | 20  | 30  | 40  |
| В15 (М 200)<br>на портланд<br>цементі М300                    | 1                    | 4                              | 6  | 10 | 18  | 27  | 36  |
|   | 2                    | 8                              | 12 | 18 | 30  | 43  | 55  |
|   | 3                    | 12                             | 20 | 25 | 40  | 52  | 65  |
|   | 5                    | 20                             | 30 | 40 | 55  | 65  | 78  |
|   | 7                    | 30                             | 40 | 50 | 65  | 74  | 85  |
|   | 14                   | 40                             | 55 | 65 | 80  | 90  | 100 |
|   | 28                   | 55                             | 68 | 80 | 100 | -   | -   |
| В15... 22,5<br>(М 200... 300)<br>на портланд-<br>цементі М400 | 1                    | 5                              | 9  | 12 | 23  | 35  | 45  |
|   | 2                    | 12                             | 19 | 25 | 40  | 55  | 65  |
|   | 3                    | 18                             | 27 | 37 | 50  | 65  | 77  |
|   | 5                    | 28                             | 38 | 50 | 65  | 80  | 90  |
|   | 7                    | 35                             | 48 | 58 | 75  | 90  | 100 |
|   | 14                   | 50                             | 62 | 72 | 90  | 100 | -   |
|   | 28                   | 65                             | 77 | 85 | 100 | -   | -   |

| Бетон  | Термін твердіння, діб | Середня температура бетону, °С |    |    |     |     |     |
|--|-----------------------|--------------------------------|----|----|-----|-----|-----|
|  |                       | 0                              | 5  | 10 | 20  | 30  | 40  |
| В30 (М 400)<br>на портландцементі М500                       | 1                     | 8                              | 12 | 18 | 28  | 40  | 55  |
|  | 2                     | 16                             | 22 | 32 | 50  | 63  | 75  |
|  | 3                     | 22                             | 32 | 45 | 60  | 74  | 85  |
|  | 5                     | 32                             | 45 | 58 | 74  | 85  | 96  |
|  | 7                     | 40                             | 55 | 66 | 82  | 92  | 100 |
|  | 14                    | 57                             | 70 | 80 | 92  | 100 | -   |
|  | 28                    | 70                             | 80 | 90 | 100 | -   | -   |
| В40 (М 500)<br>на портландцементі М600                       | 1                     | 9                              | 13 | 21 | 32  | 45  | 59  |
|  | 2                     | 17                             | 25 | 36 | 52  | 65  | 75  |
|  | 3                     | 23                             | 35 | 46 | 62  | 75  | 85  |
|  | 5                     | 34                             | 47 | 58 | 75  | 83  | 90  |
|  | 7                     | 42                             | 57 | 68 | 85  | 90  | 100 |
|  | 14                    | 58                             | 73 | 82 | 95  | 100 | -   |
|  | 28                    | 75                             | 83 | 92 | 100 | -   | -   |
| В15<br>(М 200) на<br>на шлакопортландцементі М 300           | 1                     | -                              | 3  | 6  | 12  | 20  | 35  |
|  | 2                     | 4                              | 7  | 12 | 20  | 35  | 50  |
|  | 3                     | 7                              | 12 | 18 | 30  | 46  | 63  |
|  | 5                     | 13                             | 20 | 30 | 45  | 60  | 80  |
|  | 7                     | 18                             | 25 | 40 | 55  | 70  | 92  |
|  | 14                    | 25                             | 40 | 55 | 75  | 90  | -   |
|  | 28                    | 35                             | 55 | 70 | 100 | -   | -   |
| В15...22,5<br>(М 200...300)<br>на шлакопортландцементі М 400 | 1                     | 3                              | 6  | 10 | 16  | 30  | 40  |
|  | 2                     | 8                              | 12 | 18 | 30  | 40  | 60  |
|  | 3                     | 13                             | 18 | 25 | 40  | 55  | 70  |
|  | 5                     | 20                             | 27 | 35 | 55  | 65  | 85  |
|  | 7                     | 25                             | 34 | 43 | 65  | 70  | 100 |
|  | 14                    | 35                             | 50 | 60 | 80  | 96  | -   |
|  | 28                    | 45                             | 65 | 80 | 100 | -   | -   |

Нижче наведене рівняння, отримане обробкою експериментальних даних С.А. Миронова [48], для бетонів класів В15...В22,5 (М 200...300) на портландцементі М 400:

$$A_{\tau,t} = -0.023 + 0.068\tau + 0.023t - 0.0016\tau^2 - 0.0003t^2 - 0.0001\tau t, \quad (2.22)$$

де  $\tau$  - строк твердіння, діб;  $t$  - середня температура бетону, °С ( $t=5...40^{\circ}\text{C}$ ).

Застосування рівняння (2.22) дозволяє врахувати вплив на міцність бетону двох факторів: тривалості і температури твердіння.

**Розглянемо приклад.** Необхідно розрахувати В/Ц для отримання бетону з міцністю 20 МПа в 7-мидобовому віці при температурах твердіння (t) 10 і 30 °С. Коэффициент А, який враховує якість заповнювачів і інші поправки за методикою [3], приймаємо 0.52. Активність використаного портландцементу 40 МПа.

$$В/Ц = \frac{A_{\tau,t} AR_{ц}}{R_{ст} + 0.5 A_{\tau,t} AR_{ц}} \quad (2.23)$$

$$\text{При } t=10^{\circ}\text{C}, \quad В/Ц = \frac{0.57 \cdot 0.52 \cdot 40}{20 + 0.5 \cdot 0.57 \cdot 0.52 \cdot 40} = 0.46.$$

$$\text{При } t=30^{\circ}\text{C}, \quad В/Ц = \frac{0.89 \cdot 0.52 \cdot 40}{20 + 0.5 \cdot 0.89 \cdot 0.52 \cdot 40} = 0.63.$$

Використання коефіцієнта  $A_{\tau,t}$  дозволяє розглянути приклад і при іншій постановці задача - яка очікувана міцність бетону у віці 7 діб ( $R_7$ ) при температурах твердіння 10 і 30 °С, якщо він розрахований на міцність у 28 діб  $R_{28}=30$  МПа.

$$\text{При } t=10^{\circ}\text{C}, \quad R_7 = 0.57 \cdot 30 = 17 \text{ МПа.}$$

$$\text{При } t=30^{\circ}\text{C}, \quad R_7 = 0.89 \cdot 30 = 27 \text{ МПа.}$$

Введення мультиплікативного коефіцієнта дозволяє виконувати розрахунки економії і перевитрати цементу із зміною тривалості та температури твердіння.

Ефективним технологічним прийомом регулювання виходу міцності бетонів при  $Ц/В=\text{const}$  є введення в бетонну суміш добавок прискорювачів твердіння, а при знижених температурах - протиморозних добавок. У табл. 2.4, 2.5 наведені за рекомендаціями НДІЗБ [50] коефіцієнти виходу міцності при введенні ряду добавок, які можна використовувати в розрахунках.

Міцність пропареного бетону з добавками  
прискорювачів твердіння [50]

| Цемент  | Добавки і їх<br>сполучення   | Міцність бетону після<br>пропарювання, % від<br>28-добової |                |
|---|--|--|----------------|
|   |  | через 4 год  | у віці 28 днів |
| Швидко-<br>твердіючий<br>або високо-<br>алюмінатний<br>портландце-<br>мент<br>( $C_3A > 10\%$ )                     | Без добавки  | 50   | 100            |
|   | Сульфат натрію   | 60   | 105            |
|   | Хлорид кальцію   | 60   | 110            |
|   | Хлорид кальцію + нітрит<br>натрію, хлорид кальцію +<br>нітрит-нітрат кальцію | 55   | 110            |
|   | Нітрат кальцію   | 55   | 105            |
| Середньо-<br>алюмінатний<br>портланд-<br>цемент ( $C_3A$<br>від 6 до 10%)   | Без добавки  | 50   | 100            |
|   | Сульфат натрію   | 65   | 110            |
|   | Хлорид кальцію   | 65   | 115            |
|   | Хлорид кальцію + нітрит<br>натрію, хлорид кальцію +<br>нітрит-нітрат кальцію | 60   | 115            |
|   | Нітрат кальцію   | 55   | 110            |
| Низькоалюмі-<br>натний порт-<br>ландцемент<br>( $C_3A < 6\%$ ),<br>шлако- або<br>пуцолановий<br>портланд-<br>цемент | Без добавки  | 50   | 100            |
|   | Сульфат натрію   | 70   | 110            |
|   | Хлорид кальцію   | 70   | 125            |
|   | Хлорид кальцію + нітрит<br>натрію, хлорид кальцію +<br>нітрит-нітрат кальцію | 65   | 120            |
|   | Нітрат кальцію   | 60   | 115            |

## Примітки:

1. Міцність пропареного бетону з оптимальною кількістю прискорювача твердіння дана в % від 28-добової міцності бетону нормального твердіння.
2. Наведені в таблиці дані отримані при пропарюванні бетону на щільних заповнювачах до одержання відпускної міцності, рівної 50% проектної. У якості орієнтовних їх можна використовувати при виборі добавок для одержання інших значень відпускної міцності, а також при застосуванні інших методів теплової обробки бетону, у тому числі бетону на пористих заповнювачах і бетону, який витримується в природних умовах.

Міцність бетону на портландцементях із протиморозними добавками [50]

| Добавки і їх сполучення        | Температура твердіння бетону, °С | Міцність, % від 28-добової при твердінні бетону на морозі за період, діб |    |    |     |
|--------------------------------|----------------------------------|--|----|----|-----|
|                                |                                  | 7  | 14 | 28 | 90  |
| Нітрит натрію                  | -5                               | 30   | 50 | 70 | 90  |
|                                | -10                              | 20   | 35 | 55 | 70  |
|                                | -15                              | 10   | 25 | 35 | 50  |
| Хлорид натрію + хлорид кальцію | -5                               | 35   | 65 | 80 | 100 |
|                                | -10                              | 25   | 35 | 45 | 70  |
|                                | -15                              | 15   | 25 | 35 | 50  |
|                                | -20                              | 10   | 15 | 20 | 40  |
| Нітрит кальцію + мочеви́на     | -5                               | 30   | 50 | 70 | 90  |
|                                | -10                              | 20   | 35 | 50 | 70  |
|                                | -15                              | 15   | 25 | 35 | 60  |
|                                | -20                              | 10   | 20 | 30 | 50  |

Примітка: Міцність бетону на швидкотвердіючому портландцементі у віці 28 діб. і менше орієнтовно складає 120%, а на шлако- і пуцоланових портландцементях - 80% від значень, наведених у таблиці.

Вихід міцності після теплової обробки бетону залежить від її режиму, активності цементу при даному виді теплової обробки і Ц/В. У табл. 2.6 наведені експериментальні дані [51], які підтверджують це положення.

Таблиця 2.6

Ріст міцності важкого бетону після теплової обробки [51]

| Клас (марка) бетону | Ц/В       | Загальний цикл теплової обробки, год. | Міцність бетону, % від 28-добової, після закінчення теплової обробки через, год. |         |         |         |
|---------------------|-----------|---------------------------------------|--|---------|---------|---------|
|                     |           |                                       | 0.5  | 4       | 12      | 24      |
| В15 (М200)          | 1.5...1.3 | 5                                     | 20...30  | 30...40 | 34...44 | 38...48 |
|                     |           | 7                                     | 33...43  | 40...50 | 43...53 | 48...58 |
|                     |           | 9                                     | 41...51  | 47...57 | 50...60 | 55...65 |
|                     |           | 11                                    | 47...57  | 52...62 | 55...65 | 60...70 |
|                     |           | 13                                    | 52...62  | 56...66 | 60...70 | 62...72 |
|                     |           | 16                                    | 55...65  | 58...68 | 62...72 | 63...74 |
|                     |           | 20                                    | 57...67  | 60...70 | 63...73 | 65...75 |



| Клас<br>(мар-<br>ка)<br>бетону | Ц/В       | Загальний<br>цикл<br>теплової<br>обробки, год. | Міцність бетону, % від 28-добової,<br>після закінчення теплової обробки<br>через, год. |         |         |         |
|--------------------------------|-----------|--|--|---------|---------|---------|
|                                |           |  | 0.5  | 4       | 12      | 24      |
| В25<br>(М300)                  | 2...1.7   | 5  | 28...38  | 35...45 | 38...48 | 41...51 |
|                                |           | 7  | 38...48  | 45...55 | 48...58 | 50...60 |
|                                |           | 9  | 47...57  | 52...62 | 55...65 | 58...68 |
|                                |           | 11   | 52...62  | 57...67 | 60...70 | 63...73 |
|                                |           | 13   | 56...66  | 60...70 | 64...74 | 66...76 |
|                                |           | 16   | 60...70  | 63...73 | 66...76 | 68...78 |
|                                |           | 20   | 62...72  | 65...75 | 68...78 | 70...80 |
| В30<br>(М400)                  | 2.5...2.2 | 5  | 36...46  | 40...50 | 43...53 | 46...56 |
|                                |           | 7  | 46...56  | 50...60 | 53...63 | 55...65 |
|                                |           | 9  | 52...62  | 56...66 | 60...70 | 61...71 |
|                                |           | 11   | 58...68  | 61...71 | 64...74 | 65...75 |
|                                |           | 13   | 62...72  | 65...75 | 68...78 | 69...79 |
|                                |           | 16   | 65...75  | 68...78 | 70...80 | 71...81 |
|                                |           | 20   | 66...76  | 70...80 | 72...82 | 72...82 |
| В40<br>(М500)                  | 3...2.8   | 5  | 42...52  | 45...55 | 48...58 | 50...60 |
|                                |           | 7  | 55...62  | 55...65 | 58...68 | 60...70 |
|                                |           | 9  | 59...69  | 62...72 | 65...75 | 66...76 |
|                                |           | 11   | 64...74  | 67...77 | 70...80 | 71...81 |
|                                |           | 13   | 67...77  | 70...80 | 73...83 | 74...84 |
|                                |           | 16   | 70...80  | 73...83 | 75...85 | 75...85 |
|                                |           | 20   | 72...82  | 75...85 | 76...86 | 76...86 |

Примітка: Загальна тривалість теплової обробки відповідає наступним режимам (витримка + підйом температури + ізотермічний прогрів + охолодження виробів), год.: 5 - 0.5+2+2+0.5; 7 - 1+2+3.5+0.5; 9 - 1+3+4+1; 11 - 2+3+5+1; 13 - 2+3+6+2; 16 - 2+3+9+2; 20 - 2+3+13+2.

При орієнтовних розрахунках міцності пропареного бетону коефіцієнт  $A_{T,t}$  бажано диференціювати в залежності від необхідної міцності і параметрів режиму. Наприклад, при так званому нормалізованому режимі пропарювання (2+3+6+2 год.) при 80°C з випробуванням через 4 год. після закінчення теплової обробки  $A_{T,t}$  можна прийняти для бетонів проектних класів за міцністю В15...В25 -  $A_{T,t}=0.6$ ; класів В25...В40 -  $A_{T,t}=0.75$  [49].

Р.С.Чеховою і Л.А.Кайсером [42] запропонована на основі великих експериментальних досліджень залежність для міцності бетону через 4 год. після пропарювання по нормалізованому режимі на цементі з активністю після пропарювання  $R_{ц.пр.}$  по тому ж режимі:

$$R_{б.пр.} = (0.41R_{ц.пр.} + 9)Ц/В - 0.83(Ц/В)^2 - 0.35R_{ц.пр.} - 7 \quad (2.24)$$

При  $Ц/В=1.2$  і  $2.5$ ,  $R_{ц.пр.}=30$  МПа ( $R_{ц.пр.}=40$  МПа),  $R_{б.пр.}$  відповідно дорівнює 6.8 МПа і 30.6 МПа.

При використанні формули

$$R_{б.пр.} = A_{т.т.} A (Ц/В - 0.5) \quad (2.25)$$

якщо  $A_{т.т.}=0.6$  і  $0.75$ ,  $A=0.52$ , розрахункові значення міцності дорівнюють 11.2 і 30 МПа. Якщо у формулі використовується лише один коефіцієнт виходу  $A_{т.т.}=0.6$ , розрахункові значення міцності бетону після пропарювання  $R_{б.пр.}$  дорівнюють 11.2 і 24.9 МПа, тобто для бетонів високих класів за міцністю є значна похибка.

У табл.2.7 наведені приклади рівнянь регресії для міцності бетону через 4 години після теплової обробки і 28 діб після пропарювання або нормального твердіння, отриманих нами при розв'язанні різних задач багатопараметричного проектування складів бетону.

Таблиця 2.7

Рівняння регресії для міцності бетону на стиск

| Вид бетону і вихідні матеріали  | Вихідний параметр                              | Рівняння регресії  | Фактори   |
|---|--|--|---|
| Бетон важкий із використанням портландцементу, кварцевого піску і гранітного щебеню | $R_{ст.}$ , МПа<br>(4 год. після пропарювання) | $Y_1 = 24,73 - 1,58X_1 + 12,0X_2 - 0,62X_5 + 3,66X_6 + 3,2X_7 + 2,06X_8 - 0,4X_1^2 - 0,6X_2^2 - 0,4X_5^2 + 0,15X_6^2 - 1,15X_7^2 - 0,68X_8^2 - 1,2X_1X_2 - 0,65X_1X_5 + 0,67X_1X_7 + 2,79X_2X_6 + 1,15X_2X_7 \quad (2.26)$ | $X_1 = \frac{Y - 1}{1}$ $X_2 = \frac{Ц/В - 2,1}{0,8}$ $X_5 = \frac{НГ - 27,2}{2,6}$ |

| Вид бетону і вихідні матеріали  | Вихідний параметр                             | Рівняння регресії   | Фактори   |
|---|---|---|---|
| Бетон важкий із використанням портландцементу, кварцевого піску і гранітного щебеню | $R_{ст}$ , МПа<br>(28 діб після пропарювання) | $Y_2 = 31,96 - 1,63X_1 + 12,21X_2 - 0,69X_5 + 4,0X_6 + 2,13X_7 - 0,74X_8 - 0,3X_1^2 - 1,25X_2^2 - 0,4X_5^2 + 0,05X_6^2 - 0,15X_7^2 - 1,45X_8^2 - 0,98X_1X_2 - 1,68X_1X_6 + 1,01X_2X_7 + 0,99X_2X_8 + 2,64X_2X_6 \quad (2.27)$                             | $X_6 = \frac{R_{ст} - 43,2}{8,7}$ $X_7 = \frac{\tau_{т.о} - 14}{4}$ $X'_7 = \frac{\lg \tau_{нт} - 1,85}{0,4}$ |
|   | $R_{ст}$ , МПа<br>(нормального твердіння)     | $Y_3 = 40,08 - 0,85X_1 + 13,96X_2 - 0,6X_5 + 4,7X_6 + 6,24X'_7 - 0,43X_1^2 - 1,73X_2^2 - 0,35X_5^2 - 0,03X_6^2 - 0,78X_7^2 - 1,59X_1X_2 - 1,3X_1X_6 + 1,24X_1X'_7 + 2,59X_2X_6 + 2,1X_2X'_7 + 0,66X_6X'_7 \quad (2.28)$                                   | $X_8 = \frac{T_{із} - 80}{15}$ $X_9 = \frac{\tau_{нт} - 1,85}{0,40}$  |
| Важкий гідротехнічний із добавкою СНП   | $R_{ст}$ , МПа<br>(нормального твердіння)     | $Y_4 = 37,29 - 1,61X_1 + 16,23X_2 + 3,66X_9 + 5,57X_6 + 5,9X'_7 - 0,44X_1^2 - 0,93X_1^2 - 0,23X_9^2 - 0,78(X'_7)^2 - 0,99X_1X_2 - 0,87X_1X_4 - 1,37X_1X_6 + 0,42X_1X'_7 + 1,17X_2X_9 + 2,75X_2X_6 + 1,95X_2X'_7 + 0,59X_9X_6 + 0,89X_6X'_7 \quad (2.28a)$ |   |
| Бетон важкий золотвміщуючий   | $R_{ст}$ , МПа<br>(4 год. після пропарювання) | $Y_5 = 23,6 + 2,1X_2 + 4,5X_7 + 2,9X_8 - 2,6X_9 - 1X_2^2 + 1,2X_7^2 + 1,2X_8^2 + 2,9X_9^2 - 1,9X_2X_7 - 4,7X_2X_8 + 2,2X_2X_9 + 1,7X_7X_9 - 4,7X_8X_9 \quad (2.29)$   | $X_2 = \frac{Ц / В - 21}{0,8}$ $X_7 = \frac{R_{ст} - 45}{5}$ $X_8 = \frac{\tau_{т.о} - 14}{4}$                |
|   | $R_{ст}$ , МПа<br>(28 діб після пропарювання) | $Y_6 = 37,2 + 5,9X_2 + 4,9X_7 - 1,4X_8 - 4,4X_9 - 1,3X_2^2 + 0,7X_7^2 + 2,2X_8^2 - 2,3X_9^2 - 1,3X_2X_7 + 1,7X_2X_9 - 2,5X_8X_9 \quad (2.30)$   | $X_9 = \frac{OK - 7}{5}$  |

| Вид бетону і вихідні матеріали  | Вихідний параметр                             | Рівняння регресії  | Фактори  |
|---------------------------------|---|--|--|
| Бетон литий важкий золотвіщучий | $R_{ст}$ , МПа<br>(4 год. після пропарювання) | $Y_7 = 26,4 - 4,65X_2 + 3,6X_7 + 1,6X_2^2 - 0,99X_3^2 - 0,19X_6^2 - 1,65X_7^2 - 3,8X_8^2 + 1,35X_2X_7 + 1,06X_3X_6$ (2.31)   | $X_2 = \frac{B/C - 0,6}{0,1}$<br>$X_3 = \frac{B - 190}{10}$        |
|                                 | $R_{ст}$ , МПа<br>(28 діб після пропарювання) | $Y_8 = 29,1 - 7,09X_2 + 3,15X_7 + 3,3X_2^2 - 1,09X_3^2 - 0,3X_6^2 - 1,6X_7^2 - 4,5X_8^2 + 1,25X_2X_7 + 0,67X_3X_6$ (2.32)    | $X_6 = \frac{r_{ш} - 0,53}{0,08}$<br>$X_7 = \frac{r_3 - 0,2}{0,1}$ |
|                                 | $R_{ст}$ , МПа<br>(нормального твердіння)     | $Y_9 = 28,60 - 5,65X_2 + 2,75X_7 + 2,61X_2^2 - 0,53X_3^2 - 2,70X_6^2 - 3,0X_7^2 - 6,5X_8^2 + 1,93X_2X_7 + 0,98X_3X_6$ (2.33) | $X_8 = \frac{M_k - 2,4}{10}$                                       |

Примітки: У - умовний показник легковкладальності бетонної суміші, який знаходять за шкалою:

|                  |      |      |                   |      |       |       |
|------------------|------|------|-------------------|------|-------|-------|
| умовний показник | 0    | 0,6  | 1                 | 1,4  | 1,8   | 2     |
|                  |      |      | осадка конуса, см |      |       |       |
| жорсткість, с    | 40 с | 2 см | 5 см              | 8 см | 11 см | 13 см |

Ц/В и В/Ц- цементно-водне і водоцементне відношення; НГ- нормальна густина цементу, %;  $R_c$ - активність цементу, МПа;  $\tau_{т.о}$  і  $\tau_{н.т}$ - тривалість теплової обробки і тривалість нормального твердіння, діб;  $T_{из}$ - температура ізотермічного прогріву; В - вдовміст бетонної суміші, л/м<sup>3</sup>;  $r_{ш}$  і  $r_3$  - доля щебеню в суміші піску, золи і щебеню і доля золи в суміші золи і піску;  $M_k$ - модуль крупності піску; СНП - повітрявтягувальна добавка СНП, кг/м<sup>3</sup>.

Систему коефіцієнтів  $A_i$  можна конкретизувати, статистично обробивши фактичні експериментальні дані для умов певної будівельної організації або підприємства. У табл.2.8 наведені, як приклад, усереднені для умов Рівненського домобудівного комбінату коефіцієнти, які характеризують вплив на міцність бетону при стиску якості вихід-

них матеріалів ( $A$ ), тривалості твердіння ( $A_t$ ) і теплової обробки  $A_{т.о.}$ , добавок-прискорювачів  $A_y$ , а також розрахункові ( $R_{ст.р}$ ) і фактичні ( $R_{ст.ф}$ ) значення міцності бетону при  $C/B=1.4$  і використанні портландцементу М400. У бетони не вводили наповнювачі і повітряновтягувальні добавки.

Таблиця 2.8

Значення коефіцієнтів  $A_i$ , розрахункові і фактичні значення міцності бетону ( $R_{ц}=40\text{МПа}$ ,  $C/B=1.4$ )

| Вид бетону  | Строк твердіння | Коефіцієнти |       |            |       |            | $R_{ст.р}$<br>МПа | $R_{ст.ф}$<br>МПа |
|---|-----------------|-------------|-------|------------|-------|------------|-------------------|-------------------|
|   |                 | $A$         | $A_t$ | $A_{т.о.}$ | $A_y$ | $\rho A_i$ |                   |                   |
| Бетон нормального твердіння   | 7 діб           | 0.53        | 0.65  | -          | -     | 0.34       | 12.4              | 14.5              |
|   | 28 діб          | 0.53        | -     | -          | -     | 0.53       | 19.1              | 15.3              |
|   | 90 діб          | 0.53        | 1.20  | -          | -     | 0.64       | 22.9              | 25.2              |
|   | 180 діб         | 0.53        | 1.35  | -          | -     | 0.72       | 25.8              | 21.9              |
| Бетон, який твердів при температурі $-5^\circ\text{C}$ , з протиморозною добавкою | 7 діб           | 0.53        | 0.3   | -          | -     | 0.16       | 5.7               | 6.4               |
|   | 14 діб          | 0.53        | 0.5   | -          | -     | 0.26       | 9.5               | 8.5               |
|   | 28 діб          | 0.53        | 0.7   | -          | -     | 0.37       | 13.4              | 11.1              |
| Бетон, пропарений при $80^\circ\text{C}$ за режимом (2+3+6+2) год.                | 4 год.          | 0.53        | -     | 0.63       | -     | 0.33       | 12                | 13.9              |
|   | 12 год.         | 0.53        | -     | 0.71       | -     | 0.38       | 13.5              | 11.5              |
|   | 24 год.         | 0.53        | -     | 0.75       | -     | 0.4        | 14.3              | 12.7              |
| Те ж із добавкою прискорювача твердіння   | 4 год.          | 0.53        | -     | 0.63       | 1.3   | 0.43       | 15.4              | 17.5              |
|   | 12 год.         | 0.53        | -     | 0.71       | 1.25  | 0.47       | 17                | 19                |
|   | 24 год.         | 0.53        | -     | 0.75       | 1.2   | 0.48       | 17.3              | 19.7              |

Відхилення розрахункових значень міцності від середніх фактичних не перевищує 17%, що можна вважати прийнятним на стадії проектування складів.

Додаткові можливості для розширення діапазону розв'язуваних задач за допомогою формули (2.13) з'являються при використанні поняття "приведеного  $C/B$ " і відповідного виразу (1.1). У цьому випадку формула (2.13) приймає вигляд:

$$R_{ст} = K_{ст} \rho A R_{ц} \left( \frac{C + K_{п.е.} D}{B + V_n} - 0.5 \right), \quad (2.33)$$

де  $K_{ст}$  - коефіцієнт, який залежить від рівня варіації нормованої міцнісної характеристики ( $R$ );  $\rho A$  - добуток коефіцієнтів, які враховують якість вихідних матеріалів, ріст міцності в часі, прискорення або уповільнення росту міцності при введенні добавок і використанні інших технологічних прийомів при незмінних значеннях  $\text{Ц}/\text{В}$ ;  $D$  - витрата добавки, яка вводиться у бетонну суміш;  $K_{ц.е.}$  - коефіцієнт "цементуючої ефективності" або "цементний еквівалент" 1 кг наповнювача;  $V_n$  - об'єм втягнутого повітря.

При цьому перехід від "приведеного  $\text{Ц}/\text{В}$ " до фактичного  $\text{Ц}/\text{В}$  можна здійснити за формулою:

$$\text{Ц} / \text{В} = \frac{(\text{Ц} + K_{ц.е.} D) - K_{ц.е.} D}{(\text{В} + V_n) - V_n} \quad (2.34)$$

Одна з перших спроб встановлення "цементуючої ефективності" мінеральних добавок була зроблена А.Смітом [12]. Коефіцієнт "цементуючої ефективності" легко визначити за експериментальними даними для рівноміцних бетонів за формулою:

$$K_{ц.е.} = \frac{\text{Ц}_1 - \text{Ц}_2}{D} \quad (2.35)$$

де  $\text{Ц}_1$  - витрата цементу в бетоні без мінеральних добавок;  $\text{Ц}_2$  - витрата цементу в бетоні з мінеральними добавками;  $D$  - витрата добавки.

"Цементуюча ефективність" активних наповнювачів і, зокрема, золи-виносу є функцією багатьох факторів, які характеризують їх склад, структуру, дисперсність, умови твердіння, вік бетону та ін. Вона залежить і від виду застосовуваного цементу [13].

При відхиленні значення  $D$  від оптимального величина  $K_{ц.е.}$  знижується, вона може переходити через нульове і набувати навіть негативного значення.

Для важких цементних бетонів оптимальна витрата кислій кам'яновугільної золи-виносу рекомендується звичайно в межах 100...200 кг/м<sup>3</sup>. За нашими даними, отриманими обробкою складів бетону класів В7.5...В25 тресту "Південатоменергобуд" на портландцементях Кам'янець-Подільського цементного заводу марок М400 і М500, які містять до 20% доменного гранульованого шлаку для золи Ладжинської ДРЕС при її витраті 150 кг/м<sup>3</sup>,  $K_{ц.е.}$  коливається від 0.2 до 0.42.

Значення "цементуючої ефективності" для золи-виносу Бурштинської ДРЕС і її рекомендована витрата за нашими даними наведені в табл. 2.9, 2.10.

Рекомендована витрата золи у важких бетонах

| ОК, см  | Марка цементу | Витрата золи, кг/м <sup>3</sup> для бетонів |                       |
|---------|---------------|---|-----------------------|
|         |               | пропарених                                  | нормального твердіння |
| 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 2.10

Значення коефіцієнта “цементуючої ефективності” золи Бурштинської ДРЕС

| Марка бетону за міцністю | Коефіцієнт $K_{ц.е.}$ для бетону |   |      |      |
|--------------------------|----------------------------------|---|------|------|
|                          | пропареного                      | нормального твердіння при марці цементу |      |      |
|                          |                                  | 600                                     | 500  | 400  |
| 150                      | 0.5                              | 0.45                                    | 0.38 | 0.31 |
| 200                      | 0.40                             | 0.34                                    | 0.28 | 0.20 |
| 250                      | 0.37                             | 0.32                                    | 0.25 | 0.18 |
| 300                      | 0.33                             | 0.29                                    | 0.22 | 0.15 |
| 350                      | 0.25                             | 0.22                                    | 0.16 | 0.10 |
| 400                      | 0.20                             | 0.18                                    | 0.13 | 0.08 |

Оцінку ефективності добавок можна зробити і за допомогою мультиплікативного коефіцієнта  $\rho A_i$ , однак, оцінка їх показником  $(Ц/В)_{пр}$  фізично більш обґрунтована і у деяких задачах дозволяє знайти необхідну витрату добавки для досягнення бажаної економії цементу. Застосування “приведеного”  $Ц/В$  раціональне особливо для малоцементних бетонів, а також бетонів високої щільності з обмеженою витратою цементу при введенні дисперсних мінеральних наповнювачів.

Для розрахунку витрати наповнювачів, яка забезпечує як необхідну щільність, так і необхідну міцність, відома методика [1]. Передбачається, що задоволення умов щільності і міцності досягається при:

$$X_1 (Ц+Д) = X_2 Ц, \quad (2.36)$$

де  $X_1 = V/(Ц+Д)$ ;  $X_2 = V/Ц$ .

$$\text{Звідси } Д = \frac{Ц(X_2 - X_1)}{X_1}, \quad (2.37)$$

де  $Ц$  - витрата цементу, яка забезпечує одержання бетону заданої міцності без введення мінеральних добавок.

Методика [1] не враховує необхідність при введенні мінеральної добавки в бетон виконання умови:

$$\frac{Ц + K_{ц.е.} Д}{В} \geq Ц / В. \quad (2.38)$$

При забезпеченні цієї умови можна розглянути можливість додаткової економії цементу з умови міцності, і збільшити витрату мінеральної добавки в порівнянні із знайденою за формулою (2.37), а при невиконанні - відповідно її зменшити.

При  $K_{ц.е.} < 0$ ,  $В/Ц$  з умови міцності може наближатися до  $В/Ц$  з умови щільності і навіть перевищувати його, тобто введення мінеральних наповнювачів для підвищення щільності в таких випадках може виявитися нераціональним.

Для рівномірних бетонів з однаковою легковкладальністю економія цементу ( $\Delta Ц$ ) за рахунок введення активного наповнювача може бути знайдена з рівняння:

$$\Delta Ц = (Ц/В)_{пр} \Delta В - K_{ц.е.} Д, \quad (2.39)$$

де  $\Delta В$  - зміна водопотреби бетонної суміші.

Очевидно, при  $\Delta В > 0$  ефект наповнювача знижується, при  $\Delta В < 0$  - зростає. При  $(Ц/В)_{пр} \Delta В \geq K_{ц.е.} Д$  введення активних наповнювачів не дозволяє домогтися економії цементу і клінкеру або веде навіть до їх перевитрати. Ця умова пояснює переваги спільного введення в бетонну суміш активних наповнювачів і пластифікаторів [13].

У виразі (2.33) пропонується враховувати об'єм повітря, яке втягується в бетонну суміш заповнювачами, добавками, у процесі ущільнення і т.д. Більш точно, з огляду на те, що величина  $(Ц/В)_{пр}$  повинна бути безрозмірним показником, під  $V_n$  необхідно розуміти масу води, яка займає при нормальних умовах об'єм, рівний, об'єму втягнутого повітря.

Об'єм повітря як еквівалент надлишкової води в бетонній суміші, уперше введений у формулі Фере [22]. Врахування об'єму втягнутого повітря в розрахункових формулах міцності запропоноване і ін-



шими авторами [1]. Очевидно, що прирівнювання об'єму втягнутого повітря до деякого еквівалентного об'єму води фізично припустиме, оскільки як надлишкова вода, так і втягнуте повітря формують у бетоні пори, які знижують міцність.

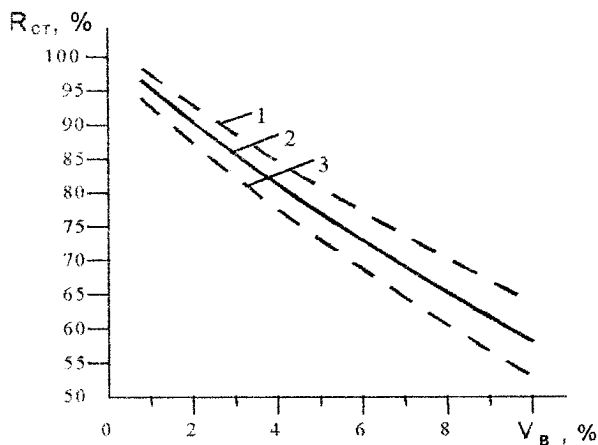
Зниження міцності бетону на стиск, розраховане за формулою (2.33), за рахунок введення кожних 10 л. повітря складає 5...6% (рис. 2.1), що добре відповідає відомим експериментальним даним, отриманим при вмісті втягнутого повітря в бетоні від 1 до 10% [52]. За даними численних дослідів ВНДЗалізобетону, зв'язок між міцністю розчину на стиск і об'ємом втягнутого повітря незалежно від виду піску, складу розчину, умов твердіння виражається наступним рівнянням [53]:

$$R_p^* = R_p \left( \frac{100 - V_e^*}{100} \right)^{4.5}, \quad (2.40)$$

де  $R_p$  - міцність розчину, який не містить втягнуте повітря;  $R_p^*$  - міцність розчину того ж складу і за тих самих умов твердіння, але який

містить втягнуте повітря;  $V_e^*$  - об'єм втягнутого повітря в розчині у %.

При розрахунку за формулою (2.40) усереднене зниження міцності розчину на кожний відсоток втягнутого повітря складає 4%. У роботі [53] відзначається, що вираз (2.40) є дещо наближеним, тому що він не цілком враховує особливості



**Рис. 2.1. Розрахункове зниження міцності бетону за рахунок втягнутого повітря:**

- 1 - за формулою (2.40);
- 2, 3 - за формулою (2.33) відповідно при  $C/V=2$  и  $C/V=1,5$

структури поризованих бетонів. Зокрема, дослідями було встановлено, що показник ступеня у формулі (2.40) має тенденцію до зниження в міру підвищення однорідності і дисперсності поризованої структури. При збільшенні показника ступеня у формулі (2.40) до 5 відповідно збільшується і зниження міцності розчину на кожний відсоток втягнутого повітря, наближаючись до розрахункових даних формули (2.33).

Задану міцність бетону при проектуванні його складу можна вважати такою, що наближається до середнього рівня, який, як відомо, повинен погоджуватись з необхідною однорідністю [54]

$$R_{ст} = R K_T K_{м.п.}, \quad (2.41)$$

де  $K_T$  - коефіцієнт необхідної міцності бетону, табульований в залежності від виду бетону і коефіцієнта варіації;  $K_{м.п.}$  - коефіцієнт, який залежить від середнього для аналізованого періоду коефіцієнта варіації;  $R$  - нормована міцність бетону. У такий спосіб коефіцієнт  $K_{ст}$  у формулі (2.33) дорівнює:

$$K_{ст} = K_T K_{м.п.} \quad (2.42)$$

Коефіцієнт  $K_{ст}$  коливається від 0,85 до 1,29 при коефіцієнті варіації міцності від 6 до 16%, що викликає відповідно зміну Ц/В і витрати цементу [54]. При відсутності фактичних даних про коефіцієнт варіації і з припущення задовільної технології виробництва конструкцій або бетонних робіт при коефіцієнті варіації 13,5%  $K_{ст}$  приймають рівним 1,12.

## 2.2. Морозостійкість

Ще Д.Абрамсом було відзначено, що при проектуванні складу бетону повинні бути забезпечені, головним чином, його міцність, довговічність і дешевина [21]. Багатьма дослідженнями встановлено, що заморожування і відтаювання бетону в насиченому водою стані робить визначальний вплив на його довговічність у конструкціях і спорудах.

Дотепер не розроблена науково обгрунтована методика для встановлення чисельного критерію морозостійкості і призначення його при проектуванні бетону. Існуюча практика призначення числа циклів заморожування і відтаювання, які повинен витримати бетон у конструкціях і спорудах, оснований, головним чином, на досвіді проєктантів, які проаналізували довговічність бетону різного складу в певних кліматичних умовах. Рекомендації, наявні в нормативній літературі,

дуже неповні. Наприклад, згідно ГОСТ-4795 рекомендується призначати число циклів тільки базуючись на кількості переходів через 0°C и найнижчої температури холодного періоду року. При цьому не враховуються такі істотні фактори, що впливають на морозостійкість, як ступінь водонасичення, коливання негативних температур, характер напруженого стану бетону і ряд інших. Не можна вважати досить надійними і методики призначення числа циклів заморожування і відтаювання за допомогою запропонованих емпіричних формул [55,56]. Однак, при проектуванні складу бетону, необхідне число циклів заморожування і відтаювання залишається зручним чисельним критерієм морозостійкості бетону. У ряді країн, наприклад у США і Канаді, при проектуванні складів бетонів прийнято вказувати не конкретне число циклів заморожування і відтаювання, а режим роботи бетону. Для кожного режиму роботи рекомендується певна область допустимих В/Ц.

Відомий дослідник морозостійкості С.В.Шестоцьоров [55] запропонував у якості критерію морозостійкості умовний показник  $M$  - марку за морозостійкістю, виражену числом активних циклів заморожування і відтаювання за проектний термін експлуатації споруди. За С.В.Шестоцьоровим:

$$M = T k_1 k_2, \quad (2.43)$$

де  $T$  - проектний термін експлуатації споруди, років  $k_1$  - середньорічне число циклів заморожування і відтаювання;  $k_2$  - коефіцієнт запасу міцності.

Запропоновано в залежності від умов служби бетону 8 марок за морозостійкістю від  $M_1-25$  до  $M_8-6000$ , які забезпечуються за рахунок 25 параметрів, що враховують якість вихідних матеріалів, склад бетону, технологію бетонних робіт. Реалізація пропозиції С.В.Шестоцьорова, однак, утруднена нечіткістю поняття "активних циклів", під якими розуміють цикли, "які вносять у структуру компонентів, які складають бетон, зміни, пов'язані з порушенням монолітності матеріалу". Не менш проблематичним є застосування для оцінки морозостійкості бетону в спорудах у експлуатаційний період т.зв. "критерію ушкодження", запропонованого А.М.Подвальним [57] і рівного відносному значенню сумарних напруг  $G_{\Sigma}/R_n$ , де  $R_n$  - локальна міцність структури. На наш погляд, раціональним у даний час можна вважати підхід, коли при проектуванні бетону визначається режим його роботи, наприклад за класифікацією [58], і в межах даного ре-

жиму диференціюється умовний критерій - число циклів заморожування і відтаювання до певного, наприклад 5%-ного зниження міцності при стиску стандартних зразків.

Для прогнозування критичного числа циклів заморожування і відтаювання на сьогодні запропоновано досить велику кількість розрахункових параметрів. Більшість структурних параметрів або критеріїв морозостійкості засновано на гіпотезі гідравлічного тиску Т.Пауерса [59], яка отримала найбільше поширення. Ця гіпотеза пояснює механізм захисної дії повітряних пор у бетоні тим, що при їх достатній кількості “надлишкова” вода витискається в ці пори без порушення структури бетону.

Повітряні пори утворюються як у результаті хімічної контракції при твердінні бетону, так і при втягуванні повітря за рахунок введення поверхнево-активних речовин (ПАР). Руйнування бетону в насиченому водою стані при багатократному заморожуванні і відтаюванні наступить тільки тоді, коли всі резервні пори будуть заповнені водою і утвореним при її замерзанні льодом.

У світлі сучасних уявлень гідравлічний тиск не є єдиною причиною руйнування бетону. Показано вплив осмотичних явищ, термічної несумісності компонентів [60]. Однак, з урахуванням всього комплексу фізичних явищ, які виникають при заморожуванні і відтаюванні бетону, ступінь його руйнування буде залежати від кількості утвореного в порах льоду і ступеня заповнення пор водою, тобто в кінцевому рахунку від об'ємів відкритих і резервних пор і їх співвідношення.

З гіпотези гідравлічного тиску, підтвердженої багатьма експериментальними дослідженнями, випливає бажаність обліку і т.зв. “фактора відстані”, який характеризує розподіл умовно-замкнених пор у цементному камені [61]. Всі розрахункові залежності, запропоновані для прогнозування морозостійкості бетону, можна розділити на дві групи:

1. Ті, котрі враховують емпіричні параметри структури затверділого бетону;
2. Ті, які розраховуються на основі параметрів складу бетонної суміші.

Перша група залежностей може бути використана при підборі складів експериментальними методами. Такі методи припускають серію пробних замісів і, після вивчення структури і властивостей отриманих бетонів, вибір необхідних складів з урахуванням комплексу нормованих показників. Доцільність використання таких методів

можлива при наявності достатнього часу для необхідної технологічної підготовки виробництва бетонних робіт.

Т. Пауерс, виконавши для гілотетичної моделі цементного каменю кількісний аналіз рівняння, яке визначає величину фактора відстані ( $L$ ), показав [61], що морозостійкість бетону, забезпечується коли

$$\bar{L} \leq L, \quad (2.44)$$

де  $\bar{L}$  - величина, визначена за даними вимірів фактора відстані в шліфах бетону;  $L$  - розрахункова величина фактора відстані.

За Пауерсом висока морозостійкість бетону забезпечується при  $L \leq 0.25$  мм.

Величина фактора відстані визначається питомою поверхнею повітряних пор, а також співвідношенням об'єму цементного каменю в бетоні до об'єму повітряних пор. Його можна розрахувати за формулою:

$$L = \frac{30}{\alpha_n} \left[ 1.4 \left( \frac{V_{ц.к.}}{V_{п.п.}} + 1 \right)^{-1/3} - 1 \right], \quad (2.45)$$

де  $V_{ц.к.}$  - об'єм цементного каменю в бетоні, %;  $\alpha_n$  - питома поверхня системи повітряних пор;  $V_{п.п.}$  - об'єм повітряних пор у бетоні, %.

При виводі формули (2.45) прийняте допущення про те, що система повітряних пор є ідеалізованою. Вона має той же об'єм і кількість повітряних пор, що і реальна система, але приймає ці пори однаковими і розташованими на рівній відстані одна від одної.

Фактор відстані не враховує істотний вплив В/Ц на морозостійкість бетону зі штучно втягнутим повітрям. У нормах, наприклад, Німеччини для одержання морозостійкого бетону при штучному повітровтягуванні, потрібно не тільки  $L \leq 0.25$  мм, але й  $В/Ц \leq 0.7$ . Для морозо-солестійкого бетону  $L \leq 0.20$  мм і  $В/Ц \leq 0.6$ .

М. Добролюбовим пропонується розраховувати ряд показників на основі мікроскопічного аналізу тонких шліфів з врахуванням макроскопічних характеристик бетону: його міцності і водопоглинання [62]. У іншій роботі [63] запропонований критерій морозостійкості (КМ) бетону, який враховує його відкриту пористість ( $\Pi_v$ ), умовно-замкнуту пористість ( $\Pi_{у.з.}$ ) і об'ємний вміст льоду ( $F$ ):

$$КМ = \frac{\Pi_v - F_t + \Pi_{у.з.}}{F_{-10^\circ C}}, \quad (2.46)$$

де  $F_{-10^{\circ}\text{C}}$  - об'ємний вміст льоду при температурі  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Показники, які входять у формулу (2.46), визначаються експериментально на зразках нормального твердіння у віці 28 діб. Автори [63] показали наявність лінійної залежності між показником КМ і морозостійкістю бетону.

Льодистість матеріалу ( $i_0$ ), яку характеризують відношенням об'ємного вмісту льоду в бетоні до інтегральної пористості, яка доступна воді, у роботі [64] запропоновано використовувати разом з В/Ц як основний параметр морозостійкості:

$$N - N_0 = 1 / (C - C_0), \quad (2.47)$$

де  $N$  - морозостійкість бетону (кількість циклів заморожування і відтаювання);  $C$  - узагальнений параметр;  $N_0$  і  $C_0$  - відповідно граничні значення числа циклів заморожування і відтаювання і параметра  $C$ .

$$C = i_0 (V/Ц)^{1/3}. \quad (2.48)$$

Для визначення вмісту льоду в бетоні пропонуються різні експериментальні методи [64]. Найбільшою популярністю користується калориметричний метод, в основі якого лежить залежність між зміною температури при переході води в лід і масою льоду, який утворився. Застосовують також метод надвисоких частот, ультразвуковий і сорбційний методи.

Перший структурний критерій морозостійкості бетону, який можна віднести до 2-ї групи розрахункових залежностей, був запропонований Т. Уайтсайдом і Х. Світом [65]. Цей критерій, відомий як "ступінь насичення" (СН), дорівнює:

$$\text{СН} = \frac{V_{\text{з.в.}}}{V_{\text{з.в.}} + V_{\text{п}}}, \quad (2.49)$$

де  $V_{\text{з.в.}}$  і  $V_{\text{п}}$  - відповідно об'єми замерзлої води, і повітря на одиницю об'єму бетону.

Було встановлено, що при  $\text{СН} < 0.88$  бетон має високу морозостійкість, а при  $\text{СН} > 0.91$  швидко руйнується. Морозостійкість (F) зв'язана з величиною ступеня насичення загальною залежністю:

$$F \sim \frac{1}{\text{СН}} = 1 + \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{з.в.}}}. \quad (2.50)$$

Спочатку ступінь насичення вважався експериментальним параметром, який визначається як відношення величини водопоглинання бетону при атмосферному тиску до величини його водонасичення

під вакуумом або при надлишковому тиску. Критична величина водонасичення ґрунтується на відомій загальній концепції критичного насичення пористих матеріалів при їх заморожуванні. Об'єм вільних повітряних пор повинен дорівнювати приблизно 9%, для того щоб зміна об'єму при заморожуванні води не приводила до деструкції пористого матеріалу. Багато досліджень підтвердили обґрунтованість цих уявлень для бетону. Водночас Т.Пауерсом [66] показано, що бетон майже завжди має достатній об'єм вільного порового простору за рахунок втягнутого повітря, щоб протистояти тиску, який виникає внаслідок зміни об'єму при заморожуванні насиченою водою порової системи. При недостатці такого внутрішнього простору надлишкова вода повинна просто видалитись з бетону переважно в той бік, де гідравлічний тиск менший. Практика показує, що ні критична величина ступеня насичення, ні навіть менше її значення, взяте з запасом ( $СН < 0.88$ ), не забезпечують однозначно високої морозостійкості бетонів. Це можна пояснити тим, що при постійному  $СН$  співвідношення між об'ємом води, яка замерзає, і загальним об'ємом пор у бетонах різних складів буде різним. Із зменшенням  $В/Ц$  і збільшенням ступеня гідратації зменшуються розміри пор і менша частина води буде замерзати при постійній температурі. Більша частина об'єму повітряних пор, не утворених повітряновтягувальною добавкою, не може бути віднесена до резервних пор [2]. Для бетонів, які відрізняються складами, вихідними матеріалами, умовами твердіння і характером пор, не існує певного критичного ступеня водонасичення. Про останню можна говорити лише для бетонів конкретних складів. При цьому, як показує обробка численних наших експериментальних даних, у залежності від складу і структури бетону критичний ступінь насичення  $(СН)_{кр}$  коливається від 0.6 до 0.92.

Параметр  $(СН)_{кр}$  дозволяє якісно оцінювати морозостійкість бетонів у різних умовах експлуатації.

Розрахунок величини  $СН$  на стадії проектування складів став можливим після розробки теоретичних уявлень про пористість цементного каменю і бетону й обґрунтуванні відповідних формул.

М.Фагерлундом [67] для визначення частки замерзлої води ( $W_3$ ) запропонована наступна формула:

$$W_3 = \frac{В / Ц - 0.25 \alpha (0.73 + K_t)}{В / Ц + 0.32} \quad (2.51)$$

де  $K_t$  - коефіцієнт, який враховує температуру замерзання (для  $t = -20^\circ\text{C}$ ,  $K_t=0.96$ );  $\alpha$  - ступінь гідратації цементу.

Для стандартної температури ( $t = -20^\circ\text{C}$ ):

$$W_3 = \frac{B/\text{Ц} - 0.43\alpha}{B/\text{Ц} + 0.32} \quad (2.52)$$

О.В.Кунцевич пропонує для  $W_3$  близьку формулу, виведену в результаті теоретичного розрахунку, [68]:

$$W_3 = \frac{B/\text{Ц} - 0.38\alpha}{B/\text{Ц} + 0.32} \quad (2.53)$$

Рядом авторів показано [68,25], що об'єм замерзлої води, досить близький при температурах  $-20\dots-30^\circ\text{C}$  до об'єму капілярних пор.

Є різні розрахункові залежності для знаходження капілярної пористості цементного каменю і бетону, в основу яких покладені різні вихідні передумови. Формули, запропоновані Пауерсом і Броунярдом, Коуплендом і Хейсом, Шейкіним і Кунцевичем [25,28,68,69], пропонують обчислювати капілярну пористість тільки як пористість, утворену капілярною водою, яка випаровується, без врахування утвореного при твердінні бетону контракційного об'єму. Капілярна пористість, розрахована за формулою Г.І.Горчакова, не включає контракційний об'єм [19]. Зазначені формули, наведені нижче, відрізняються числовими коефіцієнтами.

Формули капілярної пористості ( $\Pi_k$ ) бетону (об'єму капілярних пор у  $1\text{ м}^3$  бетону):

$$\text{О.В.Кунцевич [68]} \quad \Pi_k = \frac{B - 0.38\alpha\text{Ц}}{1000} \quad (2.54)$$

$$\text{А.Є.Шейкін [25]} \quad \Pi_k = \frac{B - 0.42\alpha\text{Ц}}{1000} \quad (2.55)$$

$$\text{Г.І.Горчаков [19]} \quad \Pi_k = \frac{B - 0.5\alpha\text{Ц}}{1000} \quad (2.56)$$

Формула (2.56) отримана з наступної умови для об'єму капілярних пор  $V_{\text{кап}}$ :

$$V_{\text{кап}} = B - W_t\alpha\text{Ц} - q_k\alpha\text{Ц} \quad (2.57)$$

де  $q_k\alpha\text{Ц}$  - контракційний об'єм;  $W_t$  - кількість води, зв'язана цементним гелем ( $W_t = 0.38\dots0.42$ );  $q_k$  - коефіцієнт контракції ( $q_k = 0.09\dots0.15$ ).

Без врахування контракційного об'єму, як впливає з умови (2.57), формула (2.56) практично збігається з (2.54...2.55).



А.Є.Шейкін при виводі формули (2.55) прийняв допущення, що щільність хімічно зв'язаної води дорівнює 1. Якщо врахувати, що щільність води в кристалогідратах вища 1, то числовий коефіцієнт при величині  $\alpha$  може бути менше 0.42.

Очевидно, що в залежності від мінералогічного складу цементу й умов його твердіння, величина коефіцієнта при  $\alpha$  може відрізнятись від прийнятого у формулах (2.54...2.56).

У ряді досліджень [19,55,68] експериментально доведено, що збільшення відношення контракційного об'єму до капілярної пористості є істотним фактором підвищення морозостійкості. Під контракційним об'ємом можна розуміти частину капілярного об'єму, утвореного в результаті зменшення об'єму гідратних новостворень у міру твердіння цементу в порівнянні з об'ємами цементу і води, які вступили в реакцію. У результаті контракції в капілярних порах створюється вакуум, який заповнюється повітрям, коли бетон твердіє на повітрі, або водою, якщо бетон твердіє у воді.

У роботі [68] стверджується, що в цементному камені, який твердів без зміни кількості води затворення, при наступному його водонасиченні контракційний об'єм повітря зменшується. При цьому зменшення об'єму залежить від витиснення повітря з пор, його стисненням під дією тиску води і розчинення. За даними автора, контракційний об'єм для цементного каменю, який твердів без поглинання і випаровування води, при  $V/C=0.4...0.6$  складає  $0.05...0.04$  при ступені гідратації  $0.02...0.016$ . Відповідно при насиченні водою збільшується і значення ступеня насичення СН капілярних пір.

Водночас запропонована гіпотеза [25,34], що дрібні пори, обумовлені контракцією, маючи великий капілярний потенціал, відсмоктують воду з більших пор, в результаті чого останні збезводнюються і заповнюються пароповітряною сумішшю. Такі зневоднені пори, блоковані цементним гелем, не заповнюються водою навіть в умовах водного твердіння. Є також думка [56], що в міру твердіння цементу і розвитку контракції в капілярах відбувається виділення надлишкового повітря. Пухирці виділеного повітря знижують ступінь заповнення капілярних пор і в такий спосіб сприяють підвищенню морозостійкості.

З огляду на позитивний вплив контракційного об'єму, який можна віднести до умовно-замкнутої резервної пористості, для визначення ступеня насичення СН та інших критеріїв морозостійкості доцільно використовувати для розрахунку капілярної пористості формулу (2.56).

Одна з перших спроб зв'язати морозостійкість із величиною капілярної пористості була зроблена в роботі [19]. Для бетону нормального твердіння, виготовленого на стандартних матеріалах, пропонувалася залежність виду:

$$F = K (P_{\text{поч.}} - P_k)^n, \quad (2.58)$$

де  $F$  - число циклів заморожування (яке викликає певний ступінь руйнування);  $K$ ,  $n$ ,  $P_{\text{поч.}}$  - параметри, які залежать від якості матеріалів, складу бетону, виробничих факторів;  $P_k$  - капілярна пористість у %.

Показник  $n$  для випробуваних бетонів і цементно-піщаних розчинів коливався в межах від 2.7 до 3. Статистична обробка дозволила Г.І.Горчакову конкретизувати залежність (2.58) емпіричним рівнянням:

$$F = (14 - P_k)^{2.7}. \quad (2.59)$$

Формулу пропонується використовувати з врахуванням відношення контракційної пористості до капілярної не меншим 0.25...0.3. Залежність (2.59) дозволила запропонувати [19] метод визначення складу бетону з необхідною морозостійкістю. В залежності від необхідної марки за морозостійкістю, з врахуванням якості застосованого цементу й умов твердіння, даний метод пропонує знаходити величину капілярної пористості проектного бетону, встановлювати за довідковими даними ступінь гідратації цементу, а потім розрахувати витрату цементу, необхідну для одержання розрахованої капілярної пористості. При цьому знайдена витрата повинна бути не меншою необхідної з умови міцності.

Дозволивши, на відміну від методу прогнозування морозостійкості за ступенем насичення, перейти від якісних оцінок до кількісних, водночас залежність (2.59) і запропонований на основі її метод мають ряд недоліків. Головний із них полягає в тому, що не враховується належною мірою вплив на морозостійкість бетону основного структурного параметра - співвідношення замкнутих резервних і відкритих капілярних пір. Це різко обмежує застосування запропонованої залежності (2.59) лише для бетонів без штучного втягування повітря.

Хоча Г.І.Горчаковим експериментально доведений вплив на морозостійкість співвідношення контракційної пористості до капілярної, механізм врахування цього співвідношення в запропонованому ним методі не конкретизований.

У табл.2.11 наведені розрахунки очікуваної морозостійкості бетону в залежності від витрат води і цементу, величини капілярної по-

ристості і співвідношення контракційної пористості ( $\Pi_{\text{кон}}$ ) до капілярної ( $\Pi_{\text{к}}$ ).

До особливостей розрахунку морозостійкості бетону за формулою (2.59), як впливає з табл.2.11, можна віднести:

- вплив витрати води при  $\text{В/Ц}=\text{const}$ ;
- завищення значення морозостійкості бетону при  $\text{В/Ц}\leq 0.6$ .

Обмеження ( $\Pi_{\text{кон}} / \Pi_{\text{к}} \geq 0.25 \dots 0.3$ ) фактично зводиться до обмеження  $\text{В/Ц}$  в межах  $0.64 \dots 0.7$ . По формулі (2.59) при  $\text{В/Ц} < 0.4$ , морозостійкість стрімко зростає, досягаючи 1000 циклів і більше. Водночас за даними Portland Cement Association [70] для бетону, який не містить штучно втягнуте повітря, максимальна морозостійкість не перевищує 200 циклів.

Таблиця 2.11  
Розрахунки морозостійкості бетону за формулою (2.58)

| Витрати в $\text{кг/м}^3$ |         | В/Ц  | $\Pi_{\text{к}}$ , % | $\Pi_{\text{кон}}$ , % | $\Pi_{\text{кон}}/\Pi_{\text{к}}$ | F,<br>цикли |
|---------------------------|---------|------|----------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------|
| води                      | цементу |      |                      |                        |                                   |             |
| 160                       | 200     | 0.8  | 8                    | 1.4                    | 0.175                             | 126         |
|                           | 250     | 0.64 | 6                    | 1.8                    | 0.3                               | 274         |
|                           | 300     | 0.53 | 4                    | 2.2                    | 0.55                              | 501         |
|                           | 400     | 0.4  | 0                    | 2.9                    | -                                 | 1243        |
| 180                       | 200     | 0.9  | 10                   | 1.4                    | 0.14                              | 42          |
|                           | 281     | 0.64 | 6.8                  | 2.0                    | 0.3                               | 206         |
|                           | 300     | 0.6  | 6                    | 2.2                    | 0.37                              | 274         |
|                           | 400     | 0.45 | 2                    | 2.9                    | 1.45                              | 820         |
| 200                       | 200     | 1    | 12                   | 1.4                    | 0.117                             | 6           |
|                           | 300     | 0.67 | 8                    | 2.2                    | 0.275                             | 126         |
|                           | 312     | 0.64 | 7.5                  | 2.25                   | 0.3                               | 157         |
|                           | 400     | 0.5  | 4                    | 2.9                    | 0.725                             | 501         |
|                           | 500     | 0.4  | 0                    | 3.6                    | -                                 | 1243        |

Примітка: Ступінь гідратації цементу прийнятий рівним 0.8.

А.Є.Шейкіним [71] запропонований критерій морозостійкості ( $K_{\text{ф}}$ ), оснований на гіпотезі про те, що умовно-замкнута пористість ( $\Pi_{\text{у.з}}$ ) бетону для запобігання його руйнування при заморожуванні і відтаюванні повинна бути не меншою можливого збільшення об'єму води, яка наповняє поровий простір бетону:

$$K_F = \frac{\Pi_{\text{у.з.}}}{0.09 \Pi_i} \geq 1, \quad (2.60)$$

де  $\Pi_i$  - інтегральна або відкрита пористість, рівна об'ємному водопоглинанню бетону.

По суті критерій А.Є.Шейкіна оснований на тій ж концепції, що і ступінь насичення СН. Під умовно-замкнутою пористістю в критерії  $K_F$  пропонується також розглядати лише контракційний об'єм твердіючого цементного каменю із коефіцієнтом контракції  $q=0.041$ .

Інтегральна пористість бетону ( $\Pi_i$ ) розраховується як різниця загальної пористості ( $\Pi_o$ ) і контракційного об'єму ( $\Pi_{\text{кон.}}$ ), тобто фактично вона дорівнює сумі капілярної і гелевої пористості. За А.Є.Шейкіним:

$$\Pi_i = \Pi_o - \Pi_{\text{кон.}} = (B - 0.23\alpha C) - 0.041\alpha C = B - 0.271\alpha C. \quad (2.61)$$

Припущення про негативний вплив гелевої пористості, поряд із капілярною, на морозостійкість бетону недостатньо обгрунтоване. Як відомо, вода в порах гелю знаходиться в особливому стані і не переходить в лід при низьких температурах порядку  $-40^\circ\text{C}$ , і навіть  $-78^\circ\text{C}$  [66].

Очевидна необхідність включення в критерій морозостійкості об'єму втягнутого повітря обумовила появу ряду відповідних розрахункових параметрів. До найбільш відомих розрахункових параметрів цього типу відноситься "компенсаційний" фактор ( $\Phi_k$ ). Спочатку, він був запропонований у виді виразу [72]:

$$\Phi_k = (V_k + V_{\text{п}}) / V_{\text{л}}, \quad (2.62)$$

де  $V_{\text{п}}$  - об'єм повітря в ущільненій бетонній суміші, %;  $V_k$  - об'єм контракційних пор у бетоні, %;  $V_{\text{л}}$  - об'єм води в бетоні, яка замерзає при  $-20^\circ\text{C}$ .

У виразі (2.62) знайшла відображення помилкова думка про позитивну роль як емульгованого повітря, так і повітря, защемленого в бетонній суміші в процесі ущільнення.

Защемлене у капілярах бетонної суміші повітря принципово відрізняється від повітряної емульсії, яка утворюється при введенні добавок поверхнево-активних речовин (ПАР), тим, що є невпорядкованим, може легко коалескувати, не гідрофобізує поверхню стінок капілярних ходів, не сприяє переходу відкритої пористості в замкнуту. Пухирці випадково затисненого повітря утворюють в бетоні пори розміром до 0.13 см (питома поверхня менша  $760 \text{ см}^{-1}$ ). Розмір пухирців повітря, емульгованого, наприклад, добавкою СНП, коливається від 25 до 250 мкм ( $1440 \dots 2090 \text{ см}^{-1}$ ) [73].

Пізніше для компенсаційного фактора був запропонований вираз:

$$\Phi_k = \frac{V_{п.з.} + V_k}{V_l + V_{п.в.}}, \quad (2.63)$$

де  $V_{п.в.}$ ,  $V_{п.з.}$  - відповідно об'єм відкритого і закритого повітря.

Однак, значення  $V_{п.в.}$  і  $V_{п.з.}$  пропонувалося визначати експериментально, що утруднювало процедуру проектування складу бетону.

Нами з В.А.Шушпановим виконані експериментальні дослідження, які дозволили прогнозувати об'єм защемленого повітря, яке втягується при вібруванні в бетонні суміші типових складів і запропонований модифікований вираз компенсаційного фактора ( $F_k$ ) [2]:

$$F_k = \frac{V_e + V_k}{V_l}, \quad (2.64)$$

де  $V_e$  - об'єм резервних пор, утворених емульгованим повітрям:

$$V_e = V_p - V_3, \quad (2.65)$$

де  $V_3$  - об'єм защемленого повітря, л.

Рівняння для знаходження об'єму защемленого повітря наведені нижче:

$$V_3 = 24.1 + 0.52 \cdot Ж - 1.1 D_{щ} + 0.0005 \cdot Ж^2 + 0.013 D_{щ}^2 - 0.006 \cdot Ж \cdot D_{щ}; \quad (2.66)$$

$$V_3 = 27.1 - 1.19 \cdot ОК - 0.44 D_{щ} + 0.02 \cdot ОК^2 + 0.003 \cdot D_{щ}^2 + 0.01 \cdot ОК \cdot D_{щ}; \quad (2.67)$$

де  $Ж$  - жорсткість бетонних сумішей, сек.;  $D_{щ}$  - найбільша крупність зерен крупного заповнювача, мм;  $ОК$  - осадка конуса бетонних сумішей, см.

При якісній оцінці морозостійкості бетону повинна бути справедливою умова:

$$\frac{V_e + V_k}{0.09 V_l} \geq 1 \quad \text{або} \quad \frac{F_k}{0.09} \geq 1. \quad (2.68)$$

Для знаходження компенсаційного фактора на стадії проектування складу бетону необхідно розрахувати об'єм емульгованого повітря, контракційний об'єм бетону і об'єм утвореного льоду. Контракційний об'єм твердіючого бетону, (%) можна розрахувати, знаючи абсолютні об'єми цементу і води, які вступили в реакцію, і абсолютний об'єм продуктів гідратації:

$$V_k = [(\alpha Ц V_{ц.} + 0.23 \alpha Ц V_p) - (\alpha Ц + 0.23 \alpha Ц) V_{г.ц.}] 100 / 1000, \quad (2.69)$$

де  $\alpha$  - ступінь гідратації цементу;  $Ц$  - витрата цементу в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $V_{ц.}$  - питомий об'єм 1 кг цементу;  $V_{г.ц.}$  - питомий об'єм сухого гідратованого

цементу;  $V_p$  - питомий об'єм рідкої фази цементного тіста (для бетонів без добавок приймається рівним одиниці).

А.Є.Шейкінім [25] при розрахунку  $V_k$  прийняті значення  $V_{гц}=0.317$  л/кг і  $V_{гц}=0.411$  л/кг, тобто відповідно на нижній і верхній межах, в результаті чого значення  $V_k$  (%) виявилось рівним  $0.041\alpha Ц/10$ , що приблизно відповідає нижній межі контракції, встановленої експериментально для портландцементу.

Г.І.Горчаковим [19] коефіцієнт контракції прийнятий  $q_k=0.09$  і, відповідно, об'єм контракційних пор  $V_k$  (%) пропонувався розраховувати за формулою:

$$V_k = 0.09\alpha Ц/10. \quad (2.70)$$

Питомий об'єм гідратованого цементу, точне значення якого визначити дуже важко, за експериментальними даними Пауерса [29], отриманими при адсорбції гелію, коливається в залежності від мінералогії цементу від 0.411 до 0.386 л/кг. Приймавши в розрахунку  $V_{гц}=1/3.1=0.322$  л/кг, одержимо усереднене значення  $V_k$  (%), що добре збігається з експериментальними значеннями контракції за даними С.В.Шестопорова й А.М.Невілля [55,74]:

$$V_k = 0.06\alpha Ц/10. \quad (2.71)$$

Об'єм замерзлої води у бетоні  $V_l$  складається з об'єму капілярних пор і пор, утворених у результаті недоущільнення бетону

$$V_l = \frac{B - 0.5\alpha Ц}{10} + 100(1 - K_y), \quad (2.72)$$

де  $K_y$  - коефіцієнт ущільнення бетонної суміші, який знаходять як відношення фактичної до розрахункової щільності бетонної суміші.

Остаточно, з урахуванням виразів пористості (2.71), (2.72) розрахункова формула  $F_k$  прийме вид:

$$F_k = \frac{10 V_e + 0.06\alpha Ц}{B - 0.5\alpha Ц + 1000(1 - K_y)}. \quad (2.73)$$

Для розрахунку показників пористості необхідне знання ступеня гідратації цементу. Деякі автори [19] пропонують знаходити ступінь гідратації цементу  $\alpha$  за довідковими даними, які, на жаль, недостатньо повні.

При розрахунку компенсаційного фактора  $\Phi_k$ , рекомендованого ГОСТ 10060-76, був виключений ступінь гідратації цементу з формули пористості, що не дозволяло оцінити вплив на морозостійкість часу твердіння й особливостей застосовуваних цементів.

Для розрахунку ступеня гідратації цементу може бути використаний встановлений різними авторами взаємозв'язок його з міцністю цементного каменю на стиск. Наприклад, Пауерс [66] представив цю залежність у вигляді формули:

$$R_{ц.к.} = 238\alpha^3, \quad (2.74)$$

де  $R_{ц.к.}$  - межа міцності на стиск (МПа) цементного каменю.

Ступінь гідратації цементу можна також визначити за формулами А.Є.Шейкіна [25], які зв'язують міцність цементного каменю  $R_{ц.к.}$  активність цементу  $R_{ц}$  при випробуванні стандартних зразків цементно-піщаного розчину з відносною густиною  $d$  цих матеріалів:

$$R_{ц.к.} = 310d^{2.7}, \quad (2.75)$$

$$R_{ц} = 110d^2, \quad (2.76)$$

$$d = \left( \frac{1 + 0,23\alpha\rho_{ц}}{1 + \rho_{ц}B/C} \right). \quad (2.77)$$

Зазначені вище залежності, однак, не дозволяють оцінити ступінь гідратації цементу в бетоні з врахуванням як особливостей застосованого цементу, так і В/Ц бетонної суміші. Для розв'язання цієї задачі можна використовувати вираз основного закону міцності, запропонованого теорією штучних будівельних конгломератів [27]. Стосовно до бетону воно має вигляд:

$$R_{б} = \frac{R_{ц.к.}}{\left( \frac{B/C}{(B/C)_{ц.к.}} \right)^n}, \quad (2.78)$$

де В/Ц і  $(B/C)_{ц.к.}$  - відношення маси води до маси цементу, відповідно в бетоні і цементному камені оптимальних структур;  $n$  - показник ступеня, який залежить від міцності заповнювача, активності його поверхні стосовно в'язучої речовини і щільності суміші заповнювачів [27].

Обчислені значення [27] показника ступеня  $n$  для досліджуваних заповнювачів наведені в табл. 2.12.

Позначивши співвідношення  $\left( \frac{B/C}{(B/C)_{ц.к.}} \right)^n$  як  $x$ , одержимо:

$$R_{ц.к.} = x R_{б}. \quad (2.79)$$

Розрахунковий вираз ступеня гідратації цементу  $\alpha$  можна одержати з формул (2.74) і (2.79):

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{\chi R_6}{238}} \quad (2.80)$$

Очевидно, що формула (2.80) при постійному В/Ц бетону дозволяє врахувати вплив активності цементу і його нормальної густоти.

Таблиця 2.12

Значення показника ступеня  $n$  у формулі (2.78)

| Різновид крупного заповнювача | Порфірова структура бетону (середнє значення і межі) | Контактна структура бетону (середнє значення і межі) |
|-------------------------------|--|--|
| Вапняковий щебінь             | 0.62 (0.72 - 0.53)                                   | 0.56 (0.64 - 0.48)                                   |
| Гранітний щебінь              | 0.68 (0.79 - 0.57)                                   | 0.63 (0.69 - 0.58)                                   |
| Природний гравій              | 1.13 (1.32 - 0.94)                                   | 1.08 (1.20 - 0.94)                                   |
| Керамзитовий гравій           | 2.48 (2.50 - 2.46)                                   | 2.31 (2.46 - 2.16)                                   |

У розрахунках складів бетонних сумішей доцільно  $(В/Ц)_{п.к.}$  приймати рівним нормальній густоті використаного цементу. Згідно до відомих рекомендацій [25], максимально можливий ступінь гідратації при  $В/Ц < 0.42$  (при твердінні у воді) завжди менший 1 і зв'язаний з  $В/Ц$  залежністю:

$$\alpha = 2.38 В/Ц \quad (2.81)$$

З врахуванням коефіцієнта росту міцності бетону  $R_6$  в часі  $K_t$  ( $K_t = R_6/R_{ст}$ ), формула (2.80) матиме вигляд:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{\chi K_t R_{ст}}{238}} \quad (2.82)$$

де  $R_{ст}$  - межа міцності бетону у віці 28 діб.

При відсутності експериментальних значень  $K_t$  можна скористатися відовими довідковими даними [47], наведеними в табл.2.13.

У табл.2.14 наведені розрахункові й експериментальні значення ступеня гідратації цементу в бетонах класів В15, В22.5, В35 при використанні портландцементу Здолбунівського цементного заводу з нормальною густотою  $НГ=0.24$  і  $n=0.68$  (табл.2.12). Експериментальні значення ступеня гідратації визначали рентгенівським аналізом.



Таблиця 2.13

Коефіцієнти наростання міцності бетону на різних цементах

| Вид цементу                                     | Коефіцієнт міцності бетону у віці, діб. |      |           |           |
|---|---|------|-----------|-----------|
|   | 7                                       | 28   | 90        | 180       |
| Алітові портландцементи                         | 0.65-0.75                               | 1.00 | 1.10-1.25 | 1.30-1.40 |
| Белітові портландцементи                        | 0.55-0.65                               | 1.00 | 1.30-1.40 | 1.45-1.60 |
| Шлакопортландцемент із добавкою кислих шлаків   | 0.40-0.50                               | 1.00 | 1.40-1.65 | 1.60-2.00 |
| Шлакопортландцемент із добавкою основних шлаків | 0.40-0.50                               | 1.00 | 1.35-1.65 | 1.55-1.90 |
| Пуцолановий портландцемент із добавкою туфу     | 0.50-0.60                               | 1.00 | 1.45-1.75 | 1.55-1.90 |
| Пуцолановий портландцемент із добавкою опоки    | 0.50-0.60                               | 1.00 | 1.25-1.55 | 1.40-1.65 |

Таблиця 2.14

Значення ступеня гідратації цементу  $\alpha$  в бетонах

| Вік зразків, діб | Межа міцності на стиск, МПа | Розрахункові $\alpha$ | Експериментальні $\alpha$ |
|------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 7                | 15                          | 0.5                   | 0.48                      |
|                  | 24                          | 0.55                  | 0.53                      |
|                  | 29                          | 0.56                  | 0.57                      |
| 28               | 22                          | 0.56                  | 0.58                      |
|                  | 31                          | 0.62                  | 0.67                      |
|                  | 41                          | 0.64                  | 0.69                      |
| 180              | 30                          | 0.63                  | 0.68                      |
|                  | 46                          | 0.69                  | 0.73                      |
|                  | 55                          | 0.7                   | 0.77                      |

У літературі практично відсутні дані про вплив В/Ц бетону на ступінь гідратації цементного каменю, який міститься в ньому. З формули (2.80) і табл. 2.14 випливає, що із зменшенням В/Ц величина  $\alpha$  зростає. Стосовно впливу В/Ц в чистому цементному камені є суперечливі дані. За Л.Е.Коуплендом і Д.Л.Кантро [75] різні В/Ц незначно впливають на початковий ступінь гідратації, але вплив їх підсилюється на проміжних стадіях. Із зменшенням В/Ц зменшується кількість

невипарованої води в цементному тісті даного віку. Д.Таплін [76] у більш ґрунтовних дослідженнях виявив, що цементне тісто з низьким В/Ц спочатку гідратується швидше, ніж тісто з більшим В/Ц. При цьому відзначається, що різні цементи можуть проявляти протилежні властивості.

При оцінці впливу В/Ц на ступінь гідратації цементу в бетоні варто врахувати зміну тепловиділення, що істотно може позначатися на ступені гідратації [77].

Залежність морозостійкості  $F$  від модифікованого компенсаційного фактора  $F_x$  встановлювали експериментально згідно ГОСТ 10060 прискореним методом - заморожуванням при  $-50^{\circ}\text{C}$ , на зразках бетону з В/Ц від 0.4 до 1. Чисельне значення морозостійкості знаходили способом графічної інтерполяції експериментальних результатів.

Після статистичної обробки отриманих результатів було встановлено, що залежність морозостійкості при 5% нормованому зниженні міцності бетону описується показовою функцією вигляду:

$$F = K(10^{F_x} - 1), \quad (2.83)$$

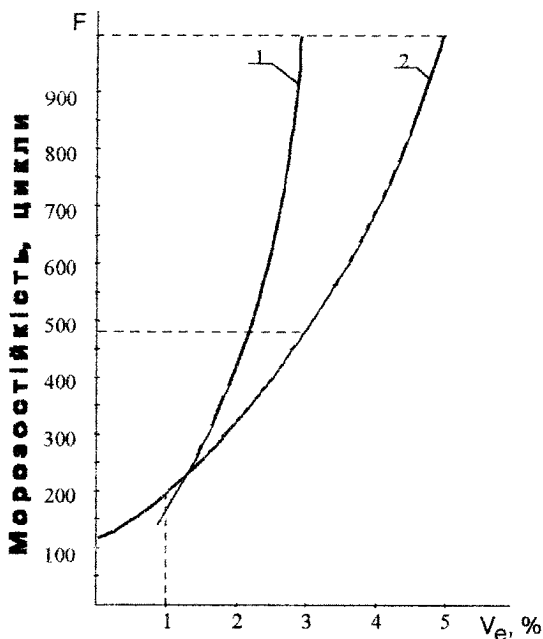
де  $K$  - коефіцієнт, який залежить від особливостей використаного цементу.

Для середньоалюмінатних цементів ( $C_3A = 6...9\%$ )  $K=170$ . Параметр  $K$  для конкретних матеріалів може уточнюватися [2].

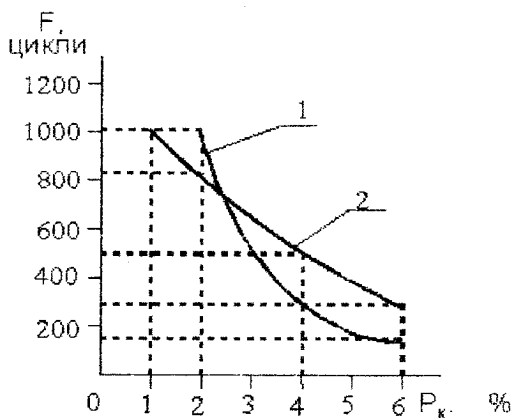
Формула (2.83) справедлива при використанні високоморозостійкого гранітного щебеню і кварцевого піску з вмістом глинистих домішок меншим 3%.

На рис. 2.2 наведені розрахункові значення морозостійкості за формулою (2.83) і експериментальні значення за даними Portlandcement Association [70]. При схожому характері залежності  $F = f(V_e)$  американські дані відрізняються більш високими значеннями  $F$  при  $V_e \geq 2\%$ , що можна пояснити більш високим нормованим зниженням міцності - 25% замість 5%. Крім того, при  $F > 700$  розрахункова оцінка подальшого підвищення морозостійкості навряд чи є доцільною.

Формула (2.83) добре підтверджує експериментально встановлені багатьма авторами залежності морозостійкості від величини капілярної пористості  $P_k$  (рис.2.3), співвідношення контракційного об'єму до капілярної пористості і В/Ц.



**Рис. 2.2. Вплив втягнутого повітря на морозостійкість бетону:**  
 1 - за даними [70]; 2 - за формулою (2.83) при  $\alpha=0,7$ ,  $K=170$ ,  $\rho=400$   $\text{кг/м}^3$ ,  $V=200$   $\text{кг/м}^3$



**Рис. 2.3. Порівняльний вплив капілярної пористості на морозостійкість:**  
 1 - за формулою (2.83) при  $\alpha=0,7$ ,  $K=170$ ,  $\rho=400$   $\text{кг/м}^3$ ,  $V_e=0$ ;  
 2 - за формулою  $F=(14-P_k)^{2,7}$  при  $\alpha=0,7$ ,  $K=170$ ,  $\rho=400$   $\text{кг/м}^3$  [19]

З рис. 2.4. випливає, що В/Ц для морозостійких бетонів, як без, так і з втягнутим повітрям повинне бути не більшим 0.7.

Формули для визначення  $F_k$  і  $F$  (2.83 і 2.73) дозволяють розрахувати необхідний об'єм емульгованого повітря для досягнення заданої морозостійкості бетону певного складу. Вони можуть бути також використані при проектуванні бетону з комплексом нормованих властивостей.

Для прогнозування морозостійкості бетону при зміні в заданих межах певної сукупності технологічних факторів можуть бути використані емпіричні залежності у вигляді рівнянь регресії. Ряд таких залежностей отриманий у наших роботах, виконаних у різні роки (табл. 2.15) [2].

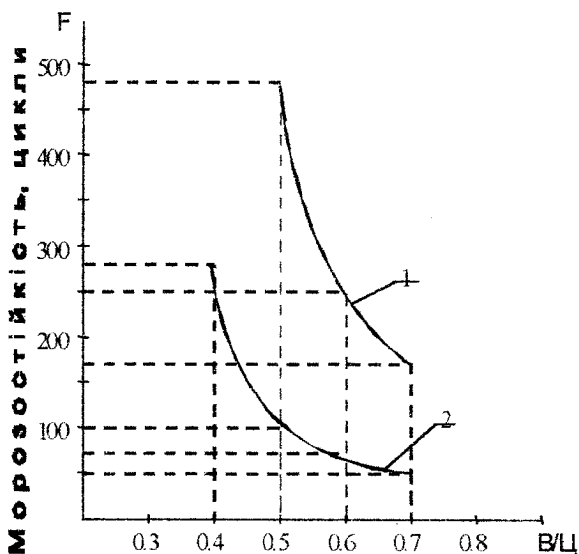


Рис. 2.4. Вплив емульгованого повітря на морозостійкість бетону (розрахунок виконаний за формулою (2.83) при  $\alpha=0,6$ ): 1 -  $V_e = 3\%$ ; 2 -  $V_e = 0$

Таблиця 2.15

Рівняння регресії для морозостійкості бетону

| Вид бетону   | Вихідний параметр                               | Рівняння регресії  | Фактори   |
|--|---|--|---|
| Бетон важкий гідротехнічний із використанням портландцементу, кварцевого піску і гранітного щебеню.<br>Добавка СНП | Морозостійкість (F), цикли, твердіння нормальне | $Y_{10} = 378,9 - 67,8X_1 + 162,3X_2 + 147,7X_9 - 27,4X_5 + 21,8X_6 + 63,2X_7^1 + 9,7X_1^2 - 38,8X_2^2 + 6,7X_9^2 - 9,8X_5^2 + 11,7X_6^2 + 29,4X_1X_2 + 15,2X_1X_9 - 16,6X_1X_7^1 + 26,6X_2X_9 - 15,8X_2X_5 + 18,7X_2X_7^1 + 23,7X_9X_7 + 13,8X_6X_7^1$ (2.84) | $X_1 = \frac{Y - 1}{1}$ $X_2 = \frac{\text{Ц} / \text{В} - 2,1}{0,8}$ $X_5 = \frac{\text{НГ} - 27,2}{2,6}$ $X_6 = \frac{R_u - 41,2}{6,7}$ |

| Вид бетону   | Вихідний параметр  | Рівняння регресії  | Фактори   |
|--|--|--|---|
| Бетон важкий гідротехнічний із використанням портландцементу, кварцевого піску і гранітного щебеню.<br>Добавка СНП | Морозостійкість (F), цикли, пропарювання                             | $Y_{11} = 281,9 - 8,3X_1 + 145,4X_2 + 89,2X_9 - 16X_5 + 17,7X_7^1 + 8,3X_1^2 - 15,7X_2^2 - 12,2X_9^2 + 9,3X_6^2 - 13,3X_7^2 - X_1X_2 - 14,8X_1X_9 + 21,2X_6X_7$ (2.85) | $X_7^1 = \frac{\lg \tau_n - 1,85}{0,40}$ $X_9 = \frac{\text{СНП} - 0,06}{0,06}$ $X_7 = \frac{\lg \tau_{т.о} - 14}{4}$   |
| Бетон важкий литий золовміщуючий з добавкою суперпластифікатора С-4  | Морозостійкість (F), цикли, пропарювання за режимом 2+3+6+2 при 80°C | $Y_{12} = 165 - 57X_2 - 30X_3 + 16X_7 - 6X_8 + 15X_2^2 + 15X_3^2 - 11X_6^2 + 10X_7^2 - 18X_2X_6 + 18X_3X_6 + 8X_3X_7 + 11X_3X_8 + 13X_6X_7 + 16X_7X_8$ (2.86)          | $X_2 = \frac{B/\text{Ц} - 0,6}{0,1}$ $X_3 = \frac{B - 190}{10}$ $X_6 = \frac{r_{ш} - 0,53}{0,08}$ $X_7 = \frac{r_3 - 0,2}{0,1}$ $X_8 = \frac{M_k - 2,4}{1,0}$ |

Примітки: У- умовний показник легковкладальності бетонної суміші, який знаходять за шкалою

|               |      |      |      |                   |       |       |
|---------------|------|------|------|-------------------|-------|-------|
| показник      | 0    | 0,6  | 1    | 1,4               | 1,8   | 2     |
|               |      |      |      | осадка конуса. см |       |       |
| жорсткість, с | 40 с | 2 см | 5 см | 8 см              | 11 см | 13 см |

Ц/В і В/Ц- цементно-водне і водоцементне відношення; НГ- нормальна густина цементу,%; R<sub>ц</sub>- активність цементу, МПа; τ<sub>н.т</sub> і τ<sub>т.о</sub> - тривалість нормального твердіння, діб і теплової обробки, годин; СНП- витрата добавки СНП у кг/м<sup>3</sup>; r<sub>ш</sub> і r<sub>3</sub> - доля щебеню в суміші піску, золи і щебеню і доля золи в суміші золи і піску; M<sub>к</sub>- модуль крупності піску.

### 2.3. Водонепроникність

Водонепроникність бетону призначають, виходячи з допустимих фільтраційних втрат через бетон і стійкості його до корозії. Фільтраційні втрати мають особливо істотне значення в гідротехнічних спорудах, наприклад, для висотних напірних гребель, лицювань каналів і т.п.

З водонепроникністю бетону зв'язані його щільність і, відповідно, інтенсивність процесів вилуговування вапна у воді. Недостатньо щільний бетон легко насичується агресивними іонами, наприклад іонами  $SO_4^{2-}$ , що приводить до його активного руйнування.

Правильне призначення вимог до бетону за водонепроникністю, так само як і його морозостійкості, зустрічає багато труднощів. Водночас, отримання досить водонепроникного бетону часто зв'язано, за інших рівних умов, із помітним збільшенням витрати цементу, тому врахування вимог до бетону за водонепроникністю при проектуванні його складу може бути визначальним.

У практиці проектування складу бетону можливе використання двох нормативних характеристик водонепроникності:

1. Найбільшого тиску води (МПа), який можуть витримати стандартні зразки з висотою і діаметром 150 мм без появи на їх відкритому боці ознак просочування води.
2. Коефіцієнта фільтрації бетону, який характеризує кількість води, що проникає через одиницю перетину за одиницю часу, при градієнті (відношенні напору в м. водяного стовпа до товщини конструкції в м.), рівному 1.

У залежності від першого показника розрізняють т.зв. марки бетону за водонепроникністю: W2, W4 і т.д. Марки бетону за водонепроникністю призначають в залежності від напірного градієнту:

| Марка бетону за водонепроникністю | W2 | W4 | W6 | W8 | W10 |
|-----------------------------------|----|----|----|----|-----|
|-----------------------------------|----|----|----|----|-----|

|                             |      |      |       |       |       |
|-----------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| Градієнт напору згідно СНиП | до 5 | 5-10 | 10-15 | 15-20 | 20-30 |
|-----------------------------|------|------|-------|-------|-------|

В залежності від марки за водонепроникністю і водопоглинання бетони поділяють на групи за щільністю (табл.2.16).

Варто зауважити, що є пропозиції класифікувати бетон за щільністю [78] безпосередньо в залежності від його пористості у віці 28 діб. ( $P_{28}$ ):

- бетон високої щільності -  $P_{28}=0.13...0.08$ ;
- бетон підвищеної щільності -  $P_{28}=0.16... 0.14$ ;
- бетон середньої щільності -  $P_{28}=0.19...0.17$ ;
- бетон зниженої щільності -  $P_{28}=0.22... 0.20$ ;
- бетон низької щільності -  $P_{28}=0.25...0.23$ .

## Групи бетону за щільністю

| Вид бетону           | Умовне позначення | Марка за водонепроникністю | Водопоглинання, % за масою | В/Ц, не більше |
|----------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|
| Нормальний           | Н                 | W4                         | 5,7...4,8                  | 0,6            |
| Підвищеної щільності | П                 | W6                         | 4,7...4,3                  | 0,55           |
| Особливо щільний     | О                 | W8                         | 4,2 і менше                | 0,45           |

В.В.Стольников [79], скориставшись рівнянням Дарсі, розрахував коефіцієнт швидкості руху води в бетоні в залежності від його марки за водонепроникністю (табл.2.17).

Таблиця 2.17

Зв'язок між марками бетону за водонепроникністю і коефіцієнтом швидкості руху води в бетоні [79]

| Марки за водонепроникністю | Коефіцієнт швидкості руху води, см/с |
|----------------------------|--------------------------------------|
| W2                         | $2,6 \cdot 10^{-6}$                  |
| W4                         | $8 \cdot 10^{-7}$                    |
| W6                         | $4 \cdot 10^{-7}$                    |
| W8                         | $2 \cdot 10^{-7}$                    |
| W14                        | $7 \cdot 10^{-8}$                    |

Як видно з табл.2.17 при зміні марки бетону за водонепроникністю з W2 до W4 коефіцієнт швидкості руху води зменшується на один порядок. Щоб зменшити цей коефіцієнт ще на один порядок треба мати вже марку W14.

В.В.Стольниковим розраховані також необхідні марки за водонепроникністю для різних бетонних гребель [79]. Ним показано, що марка бетону за водонепроникністю носить умовний характер. Фактичні градієнти напору забезпечують у спорудах зайвий запас, який у десятки разів перевищує нормативний.

Значно більш обґрунтованим показником водонепроникності є коефіцієнт фільтрації  $K_f$ , який визначається з рівняння:

$$K_f = \eta \frac{Q_{tm} \delta}{S \tau P}, \quad (2.87)$$

де  $Q_f$  - кількість фільтрату;  $\delta$  - товщина зразка;  $S$  - площа поверхні зразка бетону;  $\tau$  - час фільтрації;  $P$  - тиск води;  $\eta$  - коефіцієнт, який враховує в'язкість води ( $\eta=1$  при  $t=20^{\circ}\text{C}$ ).

Коефіцієнт фільтрації бетону має кореляційний зв'язок із маркою за водонепроникністю, рекомендованою СНиП (табл.2.18). Однак, є й інші рекомендації. Наприклад, за даними М.Г.Елбакідзе [80], який виконав великі дослідження з фільтрації води через бетон, коефіцієнт фільтрації залежить від напору капілярного всмоктування і у середньому дорівнює при: W4 -  $1 \cdot 10^{-8}$ ; W6 -  $5 \cdot 10^{-9}$ ; W8 -  $3 \cdot 10^{-9}$ .

Таблиця 2.18

Зв'язок між марками бетону за водонепроникністю і коефіцієнтом фільтрації (СНиП II-21-75)

| Марка бетону за водонепроникністю | Коефіцієнт фільтрації $K_f$ (см/с) при випробуванні на зразках у стані |  |
|-----------------------------------|--|--|
|                                   | рівноважної вологості  | водонасичення                                  |
| W2                                | Понад $7 \cdot 10^{-9}$ до $2 \cdot 10^{-8}$                           | Понад $5 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-9}$  |
| W4                                | Понад $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$                           | Понад $1 \cdot 10^{-10}$ до $5 \cdot 10^{-10}$ |
| W6                                | Понад $6 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$                          | Понад $5 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-10}$ |
| W8                                | Понад $1 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-10}$                         | Понад $1 \cdot 10^{-11}$ до $5 \cdot 10^{-11}$ |
| W10                               | Понад $6 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-10}$                         | Понад $5 \cdot 10^{-12}$ до $1 \cdot 10^{-11}$ |
| W12                               | $6 \cdot 10^{-10}$ і менше   | $5 \cdot 10^{-12}$ і менше                     |

Примітка. Коефіцієнт фільтрації визначають відповідно до ГОСТ 19426-74 на зразках у стані: рівноважної вологості - для конструкцій, які працюють в умовах попереминого зволоження і висихання, а також у повітряно-вологих умовах; водонасичення - для конструкцій, які працюють постійно у воді.

За даними В.В.Стольникова [79] значення коефіцієнта фільтрації, які відповідають певним маркам за водонепроникністю, значно більше ніж ті, які рекомендуються СНиП (табл.2.19).

Таблиця 2.19

Зв'язок між марками бетону за водонепроникністю і коефіцієнтом фільтрації за В.В.Стольниковим [79]

| Марка бетону по водонепроникності | Коефіцієнт фільтрації (см/с)                 |
|-----------------------------------|--|
| W2                                | $2,08 \cdot 10^{-7} \dots 6,5 \cdot 10^{-7}$ |
| W4                                | $6,4 \cdot 10^{-8} \dots 2,0 \cdot 10^{-7}$  |
| W6                                | $3,2 \cdot 10^{-8} \dots 5,8 \cdot 10^{-8}$  |
| W8                                | $1,6 \cdot 10^{-8} \dots 5,8 \cdot 10^{-8}$  |
| W14                               | $5,6 \cdot 10^{-9} \dots 1,75 \cdot 10^{-8}$ |

Як видно з табл.2.18 і 2.19 у межах однієї марки коефіцієнт фільтрації змінюється в широких межах.



Нормування коефіцієнта фільтрації можливе при відомому значенні допустимих фільтраційних втрат. На рис. 2.5 наведена побудована нами номограма [81], яка може використовуватись при розрахунку бетонних облицювань каналів і зв'язує напір, втрати води, товщину облицювання з коефіцієнтом фільтрації. Наприклад, для облицювання каналу товщиною 0,1 м при напорі  $H=2$  м і фільтраційних втратах  $Q_{\phi}=0.003$  л/(доба · м) необхідний бетон із коефіцієнтом фільтрації  $K_{\phi}=3 \cdot 10^{-10}$  см/с. Такому коефіцієнту фільтрації відповідає бетон марки W4.

При ненормованих значеннях фільтраційних втрат для визначення коефіцієнта фільтрації можна використовувати в напірних гідропорудах емпіричну залежність [80].

Для корозійно-стійкого бетону з коефіцієнтом фільтрації безпосередньо пов'язаний термін служби конструкції [82]:

$$K_{\phi} = wL / H\tau, \quad (2.88)$$

де  $L$  - товщина конструкції, м;  $H$  - напір води, м;  $\tau$  - розрахунковий термін служби споруди, роки;  $w$  - кількість води яка фільтрується в одиницю часу через одиницю площі.

У роботі [82] запропоноване рівняння гранично допустимого коефіцієнта фільтрації в залежності від кількості речовини ( $Q_{agr}$ ) у розрахунку на 1 см<sup>2</sup> поверхні, яка може бути винесена з бетону або внесена в нього без втрати ним несучої здатності:

$$K_{\phi} = Q_{agr} \cdot L / c_{agr} \cdot H\tau, \quad (2.89)$$

де  $c_{agr}$  - концентрація речовини, винесеної або внесеної в бетон.

$Q_{agr}$  визначається за формулою:

$$Q_{agr} = \zeta L_x \quad (2.90)$$

де  $L_x$  - допустима глибина пошкодженого бетону, см;  $\zeta$  - витрата цементу, кг/м<sup>3</sup>.

При корозії вилигування -

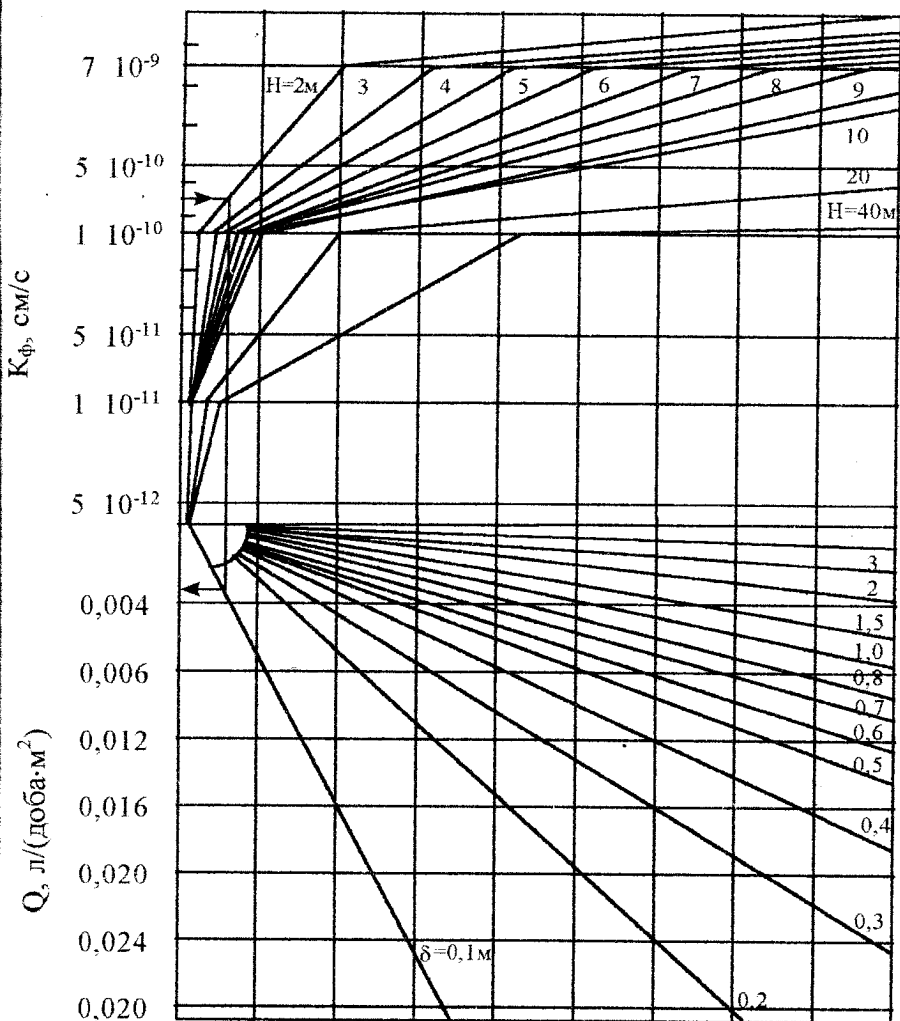
$$Q_{agr} = \alpha_v q_{CaO} \zeta, \quad (2.91)$$

де  $\alpha_v$  - допустимий ступінь вилигування оксиду кальцію;  $q_{CaO}$  - його вміст у грамах на 1 грам цементу.

Коефіцієнт фільтрації води через бетон може бути використаний і для прогнозування проникності стосовно інших флюїдів. Відповідно до рівняння Пуазейля, яке характеризує проникність пористого тіла в залежності від радіуса капіляра і в'язкості флюїду, справедливе відношення:

$$(K_{\phi}/K) = (\eta/\eta_v), \quad (2.92)$$

де  $K$  і  $\eta$  - коефіцієнт проникності і в'язкість флюїду, відмінного від води;  $K_f$  і  $\eta_v$  - коефіцієнт фільтрації і в'язкість води.



**Рис. 2.5. Номограма для визначення класу бетону за водонепроникністю:**

вище осі абсцис - криві напорів  $H$ , нижче - товщина лицювання;  $K_f$  - коефіцієнт фільтрації,  $Q$  - фільтраційна витрата через бетон лицювання

З умови (2.92) випливає, що  $K_{\phi}$  повітря в 55.5 раз повинен бути більшим  $K_{\phi}$  води. Однак, численні роботи показали [25, 83], що при зростанні впливу на процес фільтрації капілярних сил висновки, які випливають із рівняння Пуазейля, не підтверджуються. Експериментальні дані, наприклад, [83] показали, що для цементного каменю з  $V/C=0.4$  через 6 год. випробувань коефіцієнт газопроникності вищий коефіцієнта водопроникності приблизно в 16 разів, а коефіцієнт бензопроникності в 2 рази.

Для визначення коефіцієнта фільтрації в монолітних бетонних спорудах рекомендується використовувати його кореляційний зв'язок із питомим водопоглинанням  $q_v$  [80]. Перехідний коефіцієнт  $c=K_{\phi}/q_v$ , коливається в межах 0.001.

До даного часу через складний механізм переносу води в бетоні і велике число впливаючих факторів не розроблена кількісна теорія, яка зв'язує проникність бетону і його структуру. Водночас велика кількість виконаних досліджень дозволяє класифікувати механізм переносу флюїдів у бетоні на 3 види:

1. При радіусі пор більшому  $10^{-4}$  см - вязкісний потік (звичайний бетон, пористість більша або дорівнює 8%).
2.  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  - капілярний потік (щільний бетон, пористість 3...8%).
3. Менше  $10^{-5}$  см - молекулярна дифузія (особливо щільний бетон, пористість 1...3%).

Відповідно коефіцієнт проникності в залежності від механізму переносу може бути більшим  $10^{-4}$  см/с,  $10^{-4} \dots 10^{-7}$  см/с, меншим  $10^{-7}$  см/с.

Для цементного каменю, розчину або бетону характерний змішаний механізм переносу, який визначається переважним розміром пор.

Для більшості складів бетону рух води йде по капілярах із радіусом  $10^{-3}$  см і більшим. Висота підняття рідини в капілярах обернено пропорційна їх радіусу.

Для цементного каменю запропоноване [20, 84] рівняння зв'язку коефіцієнта фільтрації з величиною гідравлічного радіуса пор і пористістю, які по суті відображають головні особливості порової структури:

$$\lg K_{\phi} = 38.45 + 4.08 \lg(\Pi r_p^2), \quad (2.93)$$

де  $r_p$  - гідравлічний радіус;  $\Pi$  - пористість.

Практичне використання зазначеної залежності, однак, утруднене насамперед у зв'язку зі складністю розрахункового визначення гідравлічного радіуса, під яким розуміють середній розмір капілярів, на кінцях яких спостерігається перепад тисків. Гідравлічний радіус капілярів у цементному камені звичайно розраховують як частку від ділення об'єму профільованої води на площу змочуваної поверхні. Спроба теоретичного розрахунку гідравлічного радіусу пор зроблена Пауерсом і Коуплендом із застосуванням рівняння Козени-Кармана [29]. Однак, для практики цей розрахунок виявився неприйнятним.

Для експериментального визначення величини радіуса капілярів у бетоні необхідне знання максимального капілярного тиску  $P$  і величини поверхневого натягу  $\sigma$  на межі рідина - газ. За В.В.Стольниковим  $r_{II}$  [79] дорівнює:

$$r_{II} = \frac{4\sigma}{2.028 \cdot 10^6 P} \text{ (см)}. \quad (2.94)$$

Рівняння (2.93) можна записати як ступеневу функцію виду:

$$K_{\Phi} = A(\Pi r_{II}^2)^m, \quad (2.95)$$

де  $A$  і  $m$  - емпіричні константи.

А.М.Невіллем [74] підтверджений ступеневий характер залежності між проникністю і капілярною пористістю цементного каменю (рис. 2.6, 2.7). Аналогічний вид залежності коефіцієнта газопроникності розчину від наскрізної пористості отриманий у роботі [82].

Одна з перших спроб зв'язати коефіцієнт фільтрації води в бетоні з його пористістю зроблена В.В.Стольниковим [79]. Він запропонував наближену формулу:

$$K_{\Phi} = K_0 \Pi_{28}, \quad (2.96)$$

де  $\Pi_{28}$  - пористість у 28-добовому віці;  $K_0$  - коефіцієнт швидкості руху води.

Розрахунки по цій формулі за допомогою значень  $K_0$ , наведених у табл. 2.16, дозволяють визначити коефіцієнт фільтрації для кожної марки бетону за водонепроникністю в залежності від його загальної пористості.

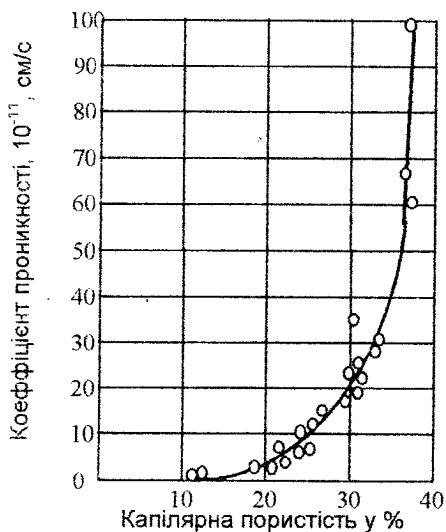


Рис. 2.6. Залежність між проникністю і капілярною пористістю цементного каменю [74]

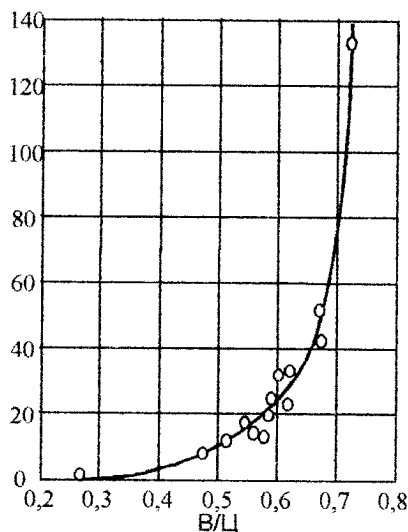


Рис. 2.7. Співвідношення між проникністю і водопементамним відношенням цементного каменю [71]

У світлі сучасних даних формула (2.96) має ряд недоліків. Розрахунок коефіцієнта швидкості  $K_0$  виконаний для умов стандартного визначення марки за водонепроникністю бетонних циліндрів із діаметром і висотою 15 см у припущенні, що швидкість руху води в бетоні підкоряється рівнянню Дарсі, справедливому лише для в'язкісного (Пуазейлівського) потоку. Як відомо, це рівняння придатне для системи рідина - бетон, пори якого обмежуються радіусом  $r_p = 10^{-4} \dots 10^{-3}$  см. За даними [25], отриманими із застосуванням ртутної порометрії, у цементному камені з В/Ц=0.3 об'єм пор менших  $10^{-4}$  см складає 15%, а при В/Ц=0.5 - 25%. У інших роботах [85] повідомляється, що вміст пор менших  $10^{-4}$  см у цементно-піщаному розчині при повітряно-вологому твердінні досягає більше 62%, а при твердінні у воді майже 90%.

Можна вважати експериментально доведеним [86], що водонепроникність бетону визначається не загальною, а наскрізною або ефективною пористістю. Під останньою розуміють відношення об'єму пор, які виконують роль шляхів фільтрації, до об'єму зразка. На відміну від загальної і капілярної пористості вона змінюється у великих межах, в залежності від тривалості взаємодії зразків із водою. У табл.2.20 наве-

дені експериментальні дані Г.П.Вербецького [87] по загальній і ефективній пористості зразків цементного каменю і розчину після зберігання у воді.

На величину ефективної пористості впливають багато процесів: набрякання гідратованих зерен цементу, кольматація пор продуктами вилугування, які відкладаються, і дрібними зваженими у воді мінеральними частками й ін. На формування ефективної пористості, як відомо, роблять також вплив седиментаційні процеси в бетонній суміші [79].

М.Г.Елбакідзе і В.М. Насбергом отриманий ряд формул [88], які дозволяють враховувати ефективну пористість  $P_e$  (коефіцієнт водопоглинання) при визначенні коефіцієнта фільтрації бетону. Для обчислення  $K_f$  при випробуванні зразків запропонована емпірична формула:

$$K_f = \frac{78.2 \cdot 10^{-7} P_e}{(1 + n + 0.2 h_k) n} \quad (2.97)$$

де  $n$  - число ступенів напору води;  $h_k$  - напір капілярного всмоктування.

Таблиця 2.20

Загальна й ефективна пористість зразків цементного каменю і розчину після зберігання у воді

| Матеріал          | В/Ц | Тривалість зберігання зразків у воді, діб після 28 діб повітряно-вологого твердіння | Пористість окремих зразків |           |
|-------------------|-----|---|----------------------------|-----------|
|                   |     |   | загальна                   | ефективна |
| Цементний камінь  | 0.3 | 3   | 0.34                       | 0.188     |
|                   |     | 30  | 0.327                      | 0.001     |
|                   |     | 42  | 0.349                      | 0         |
|                   | 0.5 | 3   | 0.442                      | 0.321     |
|                   |     | 28  | 0.463                      | 0.042     |
|                   |     | 40  | 0.45                       | 0.033     |
| Розчин складу 1:2 | 0.6 | 3   | 0.349                      | 0.272     |
|                   |     | 30  | 0.332                      | 0.018     |
|                   |     | 43  | 0.342                      | 0.014     |

До нинішнього часу, з огляду на складність процесів, які формують величину  $P_e$ , не розроблений розрахунковий метод її визначення. Тому формули типу (2.97) можуть бути використані для прогнозування  $K_f$  після експериментального визначення  $P_e$ . Методика експериментального визначення  $P_e$  описана в роботах [80, 87].

Для проектування складів водонепроникних бетонів можуть бути використані регресійні залежності, які зв'язують показники водонепроникності як із технологічними факторами (табл.2.21), так і з іншими показниками властивостей бетону. Експериментально обґрунтований [80, 89], зокрема, зв'язок між коефіцієнтом фільтрації бетону і його міцністю на стиск.

Наявність цього зв'язку дозволила запропонувати методику визначення міцності бетону за його водонепроникністю [80, 89].

Зв'язок коефіцієнта фільтрації з міцністю бетону встановлений і нашими експериментами. Для виготовлення бетону застосовували: нормальний середньоалюмінатний портландцемент М400 і М500 із вмістом активної мінеральної добавки (опоки) 15%; гранітний щебінь фракції 5-40 мм; середньозернистий кварцевий пісок.

Коефіцієнт фільтрації визначали на зразках-циліндрах із діаметром і висотою 150 мм. Випробовували зразки у віці 28 діб. Результати випробувань наведені на рис.2.8. Вони виявилися досить близькі до даних М.Г.Елбакідзе [80], отриманими при визначенні коефіцієнта фільтрації для бетону з міцністю на стиск 10...30 МПа.

Експериментальні дані добре апроксимуються ступеневою залежністю типу:

$$K_{\phi} = A R_{\text{ст}}^m, \quad (2.101)$$

де  $A$  і  $m$  - коефіцієнти, на величину яких впливають особливості складів бетонних сумішей, умови і тривалість твердіння і т.д.

Для вищенаведених умов залежність (2.101) перетвориться у формулу:

$$K_{\phi} = 126 R_{\text{ст}}^{-7.7}. \quad (2.102)$$

Відхилення експериментальних даних від отриманих за формулою (2.102) для бетонів міцністю на стиск 15...50 МПа не перевищують 15%.

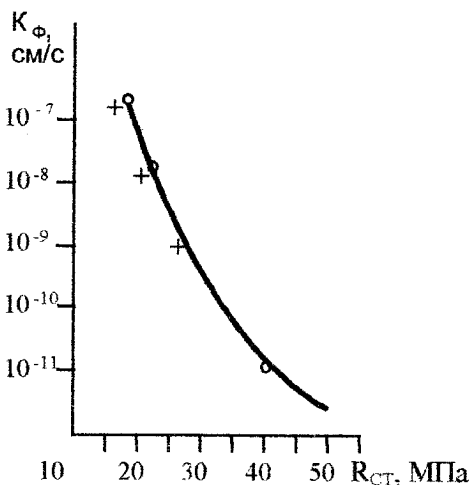


Рис. 2.8. Залежність коефіцієнта фільтрації бетону від міцності на стиск ("+" - за даними М.Г.Елбакідзе [80])

Таблиця 2.21

Рівняння регресії для водонепроникності бетону (W) [7]

| Вид бетону  | Вихідний параметр  | Рівняння регресії  | Фактори   |
|---|--|--|---|
| Бетон важкий із використанням портландцементу, кварцевого піску і гранітного щебеню.<br>Добавка СНВ | Водонепроникність (W), МПа (пропарювання при 80°C)                     | $Y_{13} = 0,92 + 0,04X_1 + 0,56X_2 + 0,02X_9 + 0,06X_6^2 + 0,25X_{17}^2 + 0,08X_2^2 + 0,03X_6^2 - 0,02X_{17}^2 + 0,02X_1X_2 - 0,02X_1X_5 + 0,04X_1X_6 + 0,14X_2X_7^1$ <p style="text-align: right;">(2.98)</p> $Y_{14} = 0,57 + 0,07X_1 + 0,43X_2 + 0,03X_5 + 0,06X_6 + 0,05X_7 - 0,02X_1^2 + 0,08X_2^2 + 0,02X_9^2 + 0,07X_1X_2 + 0,03X_1X_2 - 0,04X_2X_9 + 0,03X_2X_5 + 0,06X_2X_6 - 0,02X_9X_6 + 0,02X_6X_7$ <p style="text-align: right;">(2.99)</p> | $X_1 = \frac{Y - 1}{1}$ $X_2 = \frac{Ц / В - 2,1}{0,8}$ $X_5 = \frac{НГ - 27,2}{2,6}$ $X_6 = \frac{R_u - 43,2}{8,7}$ $X_7^1 = \frac{\lg \tau_{н} - 1,85}{0,40}$ $X_7 = \frac{\tau_{т.о} - 14}{4}$ $X_9 = \frac{СНП - 0,06}{0,06}$ |
| Бетон важкий литий золовміщуючий з добавкою суперпластифікатора С-4                                 | Водонепроникність (W), МПа. (пропарювання за режимом 2+3+6+2 при 80°C) | $Y_{15} = 0,93 - 0,15X_2 + 0,07X_6 + 0,02X_2^2 - 0,04X_6^2 - 0,08X_6^2 - 0,08X_7^2 - 0,03X_3 - 0,03X_2X_3 - 0,07X_3X_6 + 0,03X_3X_7 + 0,03X_6X_7 + 0,05X_7X_8$ <p style="text-align: right;">(2.100)</p>   | $X_2 = \frac{В / Ц - 0,6}{0,1}$ $X_3 = \frac{В - 19,0}{1,0}$ $X_6 = \frac{r_{ш} - 0,53}{0,08}$ $X_7 = \frac{r_3 - 0,2}{0,1}$ $X_8 = \frac{M_k - 2,4}{1,0}$  |

Примітки: У - умовний показник легкоукладальності бетонної суміші, який знаходиться за шкалою:

|                  |                   |      |      |      |       |       |
|------------------|-------------------|------|------|------|-------|-------|
| умовний показник | 0                 | 0,6  | 1    | 1,4  | 1,8   | 2     |
|                  | осадка конуса, см |      |      |      |       |       |
| жорсткість, с    | 40 с              | 2 см | 5 см | 8 см | 11 см | 13 см |

Ц/В и В/Ц- цементно-водне і водоцементное відношення; НГ- нормальна густина цементу, %; R<sub>u</sub> - активність цементу, МПа; τ<sub>н.т.</sub> і τ<sub>т.о.</sub> - тривалість нормального твердіння, діб і теплової обробки, годин; СНП- витрата добавки СНП у кг/м<sup>3</sup>; r<sub>ш</sub> і r<sub>3</sub>- доля щебеню в суміші піску, золи і щебеню і доля золи в суміші золи і піску; M<sub>k</sub>- модуль крупності піску.





донепроникності в атм., а не коефіцієнтом фільтрації, робить її також більш грубою, ніж залежність типу (2.102), що, однак, не виключає можливість її застосування. Спірним є негативний вплив мінеральних добавок на водонепроникність, що впливає з номограми В.П.Сизова (рис. 2.9). Багато авторів стверджують, як відомо, зворотне.

У ряді випадків на практиці необхідно оцінити зміну коефіцієнта фільтрації бетону при тривалій дії напору води, тобто з врахуванням самоущільнення бетону. Самоущільнення бетону в натурних умовах відзначено багатьма авторами. Так, дані про водонепроникність бетону, визначені на кернах, вибурених у різний час з італійських гребель Гуале, Мораско і Борегар [92], свідчать про зниження коефіцієнта фільтрації бетону за період від 90 днів до 27 років на 3 порядки (табл.2.22).

Таблиця 2.22  
Умови фільтрації і значення параметрів функції самоущільнення бетону деяких складів

| Склад бетону |                      | Умови фільтрації |                               |                 | Параметри самоущільнення |      |       |
|--------------|----------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------|------|-------|
| Ц:П:Щ        | Ц, кг/м <sup>3</sup> | В/Ц              | гідрокарбонатна лужність води | градієнт напору | K <sub>ф0</sub> , м/с    | b    | T     |
| 1:2.4:3.6    | 325                  | 0.51             | 3.2                           | 320             | 2.45                     | 0.27 | 0.316 |
|              |                      |                  | 0.8                           | 86              | 1.92                     | 0.24 | 1.55  |
| 1:2.5:5.7    | 245                  | 0.65             | 3.2                           | 213             | 7.2                      | 0.35 | 1.2   |
|              |                      |                  | 3.2                           | 57              | 11.1                     | 0.34 | 2.14  |
|              |                      |                  | 0.8                           | 57              | 12.9                     | 0.27 | 2.63  |
|              |                      |                  | 0.06                          | 213             | 9.4                      | 0.29 | 5.13  |
|              |                      |                  | 0.06                          | 57              | 10.5                     | 0.27 | 6.76  |
| 1:2.9:6.1    | 222                  | 0.74             | 3.2                           | 213             | 31.2                     | 0.34 | 1.47  |
|              |                      |                  | 3.2                           | 57              | 33.7                     | 0.32 | 2.51  |
|              |                      |                  | 0.8                           | 57              | 39.2                     | 0.32 | 5.01  |
|              |                      |                  | 0.06                          | 213             | 27.1                     | 0.32 | 8.9   |
|              |                      |                  | 0.06                          | 57              | 30.4                     | 0.3  | 10.7  |

Як показав Г.П.Вербецький [87], коефіцієнт фільтрації бетону в часі при  $\tau > 1$  доби описується двопараметричною експоненціальною функцією:

$$K_{\phi(\tau)} = K_{\phi 0} e^{-(\tau/T)^b}, \quad (2.104)$$

де  $K_{\phi(\tau)}$  - коефіцієнт фільтрації бетону через  $\tau$  діб фільтрації води, м/с;  $K_{\phi 0}$  - початковий коефіцієнт фільтрації, який визначається у першу добу просочування води через бетон, м/с;  $b, T$  - емпіричні параметри функції самоущільнення, які залежать від складу бетону, гідрокарбонатної лужності води і градієнту напору (табл.2.22).

## 2.4. Тепловиділення

Тепловиділення бетону є результатом екзотермічних реакцій твердіння цементу. У практиці виконання бетонних робіт і виготовлення залізобетонних конструкцій доводиться враховувати як позитивну, так і негативну роль тепловиділення бетону. Перша характерна при зимовому бетонуванні і в умовах тепловологісної обробки конструкцій, друга - при зведенні масивних споруд і в інших випадках, коли можливе виникнення значних температурних градієнтів у бетоні.

Нормоване тепловиділення для масивних конструкцій часто знаходиться з умови обмеження температури бетону до визначеного терміну твердіння. Допустиме значення тепловиділення в  $\text{кДж/м}^3$  можна знайти [77] за формулою:

$$Q = \frac{C\rho_0}{K}(t_{\text{крит.}} - t_0), \quad (2.105)$$

де  $C$  - питома теплоємність бетону в  $\text{кДж/(кг град)}$ ;  $\rho_0$  - середня густина бетону в  $\text{кг/м}^3$ ;  $t_{\text{крит.}}$  - критичне значення температури бетону, встановлене проектом;  $K$  - коефіцієнт, рівний або менший одиниці, який залежить від умов охолодження бетону в конструкції;  $t_0$  - початкова температура укладки.

Критична температура бетону в масивних спорудах призначається з урахуванням середньорічної температури ( $t_{\text{год}}$ ):

$$t_{\text{крит}} = t_{\text{год}} + \Delta t, \quad (2.106)$$

де  $\Delta t$  - допустиме перевищення критичної температури над середньорічною.

Наприклад, при  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{год}} = 5^\circ\text{C}$ ,  $C\rho_0=2318$ ; ( $C=0,966$   $\text{кДж/кг град}$ ;  $\rho_0=2400$   $\text{кг/м}^3$ );  $K=0,8$ ;  $t_0=8^\circ\text{C}$  максимально допустиме значення тепловиділення:

$$Q = \frac{2318}{0,8}(25 - 8) = 49257 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.107)$$

Тепловиділення бетону разом із кількістю тепла, витраченою на нагрівання компонентів при виконанні робіт у зимових умовах із за-

стосуванням способу термоса, повинно бути не меншим кількості тепла, яке втрачається (теплові втрати) при охолодженні конструкції до кінцевої температури і одержання заданої міцності бетону. З формули Б.Г.Скрамтаєва [93] можна визначити необхідне тепловиділення бетону при заданій тривалості охолодження бетону  $\tau$ , год. у конструкціях із модулем поверхні  $M_n$  (відношенням площі її зовнішньої поверхні в  $m^2$  до об'єму в  $m^3$ ):

$$Q = KM_n (t_{б.ср.} - t_{п.ср.})\tau - c\rho_0 (t_{б.п.} - t_{б.к.}), \quad (2.108)$$

де  $K$  - коефіцієнт теплопередачі опалубки або покриття неопалублених поверхонь  $kJ/(m^2 \cdot год \cdot град)$ ;  $t_{б.ср.}$  - середня температура бетону за час охолодження бетону  $^{\circ}C$ ;  $t_{п.ср.}$  - середня температура зовнішнього повітря за час охолодження  $\tau$ ,  $^{\circ}C$ ;  $t_{б.п.}$  - температура бетону на початок охолодження,  $^{\circ}C$ ;  $t_{б.к.}$  - температура бетону на кінець охолодження (для бетонів без протиморозних добавок приймається не нижчою  $5^{\circ}C$ ).

Середню температуру бетону за час остигання,  $^{\circ}C$  рекомендується [93] визначати за формулою:

$$t_{б.ср.} = t_{б.к.} + \frac{t_{б.п.} - t_{б.к.}}{1,03 + 0,18M_n + 0,006(t_{б.п.} - t_{б.к.})}. \quad (2.109 а)$$

Час охолодження  $\tau$  вибирається з умови досягнення бетоном міцності, передбаченої проектом виконання робіт (рис. 2.10). До моменту можливого замерзання рекомендується досягнення міцності бетону на стиск для класів: В7,5 і В10 - 50%; В15 і В25 - 40%; В30 і В40 - 30%.

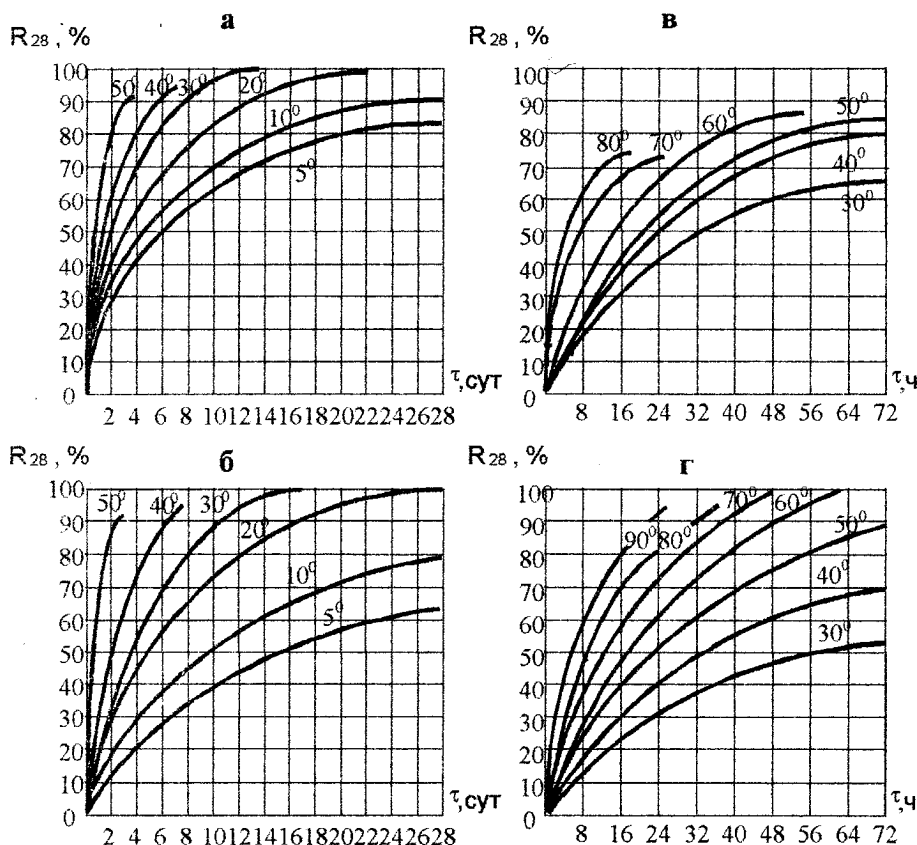
Незалежно від класу бетону рекомендується досягнення 70% проектною міцності для пролітних будівель мостів, попередньо напружених і особливо відповідальних залізобетонних конструкцій, 100% проектною міцності для конструкцій, які піддаються відразу після затвердіння багатократному попереминому заморожуванню і відтаюванню або дії розрахункового тиску води і конструкцій, до яких ставляться спеціальні вимоги за морозостійкістю і водонепроникністю.

Для бетонів із протиморозними добавками до моменту можливого замерзання міцність на стиск звичайно повинна бути не меншою 5 МПа.

При заданій міцності бетону на момент замерзання необхідну тривалість ізотермічного витримування знаходять за відомими рекомендаціями [93]. Апроксимацією графічних залежностей, які використовуються для цієї мети, отримана розрахункова формула:

$$\eta = R_{\tau,t} / R_{28,20} = K_{II} t \tau^{K_I}, \quad (2.109 \text{ б})$$

де  $\eta$  - рівень міцності бетону ( $R_{\tau,t}$ ), який твердів при температурі  $t^{\circ}\text{C}$  у віці  $\tau$ , діб відносно марочної міцності ( $R_{28,20}$ );  $K_{II}$  - коефіцієнт, який залежить від виду цементу (для портландцементу  $K_{II}=0,012$ );  $K_I$  - коефіцієнт, який залежить від температури твердіння (для портландцементу  $K_I = 0,001 (0,37t^2 - 25,7t + 814)$ ).



**Рис. 2.10.** Графіки наростання міцності бетону [93]:

- а - при температурі до  $40^{\circ}\text{C}$  на портландцементях М400, М500;
- б - те ж, на шлакопортландцементях М300, М400;
- в - при прогріві на портландцементях М400, М500;
- г - те ж, на шлакопортландцементях М300, М400.

З формули (2.109 б) випливає, що необхідний час витримування бетону способом термоса дорівнює:

$$\tau = \left( \frac{\eta}{K_{\text{II}} t} \right)^{1/K_t} \quad (2.109 \text{ в})$$

Експериментальне визначення тепловиділення бетонів проводять в калориметрах термосного, адиабатичного або ізотермічного типів [77]. Найбільше поширення одержали прості за конструкцією термосні калориметри, недоліком яких є змінний і, по суті, випадковий температурний режим твердіння бетонних зразків. Для перерахування отримуваних даних на ізотермічний режим твердіння розроблена [94] розрахункова методика встановлення т.зв. еквівалентних строків, тобто таких строків, у які бетон при постійній температурі твердіння 20°C буде показувати ті ж величини тепловиділення, які спостерігаються при проведенні досліду. Встановлена таким шляхом залежність ізотермічного тепловиділення від часу твердіння є основною характеристикою бетону для розрахунку температурних втрат.

У адиабатичних калориметрах підвищення температури адекватне температурі в середній частині великих бетонних масивів, однак вони складні за конструкцією і рідко використовуються на практиці. Найкращими є калориметри ізотермічного типу, які дозволяють підтримувати температуру бетону в процесі вимірювання тепловиділення на постійному рівні.

Для наближеної розрахункової оцінки тепловиділення бетону запропоновані [77] залежності, які враховують питоме тепловиділення цементу, параметри складу бетону, температуру і тривалість твердіння.

Основна доля тепла при твердінні цементу в бетоні виділяється вже в перші 3...7 діб твердіння (табл.2.23).

Найзручніша для розрахункового визначення тепловиділення бетону залежність, яка враховує питоме тепловиділення цементу.

У роботі [77] запропоновано тепловиділення бетону у віці 7 діб у кДж/м<sup>3</sup> обчислювати за формулою:

$$Q_7 = 0,83q_7(\text{Ц} + 22,3 \text{ ОК}), \quad (2.110)$$

де  $q_7$  - питоме тепловиділення цементу, знайдене стандартним термосним методом; ОК - осадка конуса бетонної суміші; Ц - витрата цементу в кг/м<sup>3</sup>.

Цією формулою рекомендується користуватись в межах наступних значень Ц і ОК:

|                      |       |
|----------------------|-------|
| Ц, кг/м <sup>3</sup> | ОК,см |
| більше 250           | 2-12  |
| від 200 до 250       | 2-8   |
| менше 200            | 2-4   |

Таблиця 2.23

## Інтенсивність тепловиділення цементу в бетоні

| Строк<br>твер-<br>діння,<br>діб | Тепловиділення   |                |                |   |                |                |
|---------------------------------|--|----------------|----------------|---|----------------|----------------|
|                                 | за даними Вудса, Стейнора,<br>Старке (середнє з 17 цементів)<br>[45] |                |                | за даними Кінда, Окорскова,<br>Вольфсон (середнє для 20 це-<br>ментів) [96] |                |                |
|                                 | кДж/кг   | % до 28<br>діб | % до 1<br>року | кДж/кг  | % до 28<br>діб | % до 1<br>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            |

Для інженерних розрахунків при оцінці тепловиділення бетону в різні терміни твердіння ( $Q_t$ ) може бути використана формула

$$Q_t = q_t \cdot \rho \quad (2.111)$$

Ця формула використовується у виразі теплового балансу для термосного витримування бетону, запропонованого Б.Г.Скрамтаєвим [93]. При витраті цементу, наприклад, 300 кг/м<sup>3</sup> і осадці конуса 2 см за формулою (2.110)  $Q_t = 286q_t$ , за формулою (2.111)  $Q_t = 300q_t$ , тобто відхилення не перевищує 5%.

Для розрахунку  $q_t$  при використанні портландцементу без мінеральних добавок справедлива аддитивна формула:

$$q_t = a_t C_3S + v_t C_2S + c_t C_3A + d_t C_4AF, \quad (2.112)$$

де  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  - розрахунковий вміст відповідних мінералів, %;  $a_t$ ,  $v_t$ ,  $c_t$ ,  $d_t$  - долеві частки мінералів у тепловиділенні цементу для віку  $t$  діб (табл.2.24).

Використання формули (2.112) при прогнозуванні тепловиділення реальних цементів на практиці зустрічається рідко. Це обумовлене тим, що бездобавочні цементы використовуються в дуже обмеженій кількості, однак і для них крім мінералогічного складу на тепловиділення істотно впливають тонкість помелу, наявність домішок і ін. [77].

Цінність адитивної залежності тепловиділення, водночас, може бути досить високою, якщо стоїть задача проектування цементного клінкеру з заданим тепловиділенням.

Таблиця 2.24

Долеві частки клінкерних мінералів у процесі тепловиділення портландцементу в кДж/кг, % на 1% мінералу [77]

| Час твердіння, діб | 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              |

І.Д.Запорожцем для портландцементу без добавок і з добавками в кількості до 15% запропонована формула питомого тепловиділення цементу в 7-добовому віці в кал/гр ( $q_7$ ) в залежності від активності цементу, визначеної випробуванням жорсткого розчину, кгс/см<sup>2</sup> [77]:

$$q_7 = 1,2 \left( R_{\text{п}}^{\text{ж}} \right)^{2/3} \quad (2.113)$$

Ввівши коефіцієнти 0,8 на випробування активності цементу в пластичних розчинах і 4.2 для переходу в кДж/кг одержимо:

$$q_7 = 4,03 \left( R_{\text{п}}^{\text{п.л}} \right)^{2/3} \quad (2.114)$$

Ширші можливості для прогнозування тепловиділення цементу відкриває формула Е.В.Шніпко [97]

$$q_{\tau} = 4,28 V e^{-mz}, \quad (2.115)$$

де  $V$  і  $m$  - параметри, постійні для даного виду і марки цементу (табл.2.25);  $z$  - тривалість твердіння цементу.

Е.В.Шніпко запропонована також формула для визначення тепловиділення цементу за певний період (від  $z_x$  години до  $z_y$  години):

$$q_{\tau} (z_y - z_x) = 4.2 C \left( e^{-mz_x} - e^{-mz_y} \right), \quad (2.116)$$

де  $m$  і  $z$  приймаються за табл.2.24.

Формули Е.В.Шніпко розраховані на постійну температуру твердіння +15° (при середній температурі твердіння 7÷10° табличні дані рекомендується множити на коефіцієнт 0,6÷0,7).



Параметри тепловиділення цементу (за Е.В.Шніпко)

| Вид<br>Цементу                     | Мар-<br>ка це-<br>менту | Тепловиділення 1 кг<br>цементу (кДж) при<br>$t=15^\circ$ при тривалості<br>твердіння, діб |     |     | Параметри<br>теповиділення<br>цементу |       |     |
|------------------------------------|-------------------------|---|-----|-----|---------------------------------------|-------|-----|
|                                    |                         | 3   | 7   | 28  | B                                     | m     | c   |
| Портландцемент                     | 500                     | 252   | 273 | 336 | 0,76                                  | 0,01  | 76  |
|                                    | 400                     | 273   | 231 | 294 | 0,6                                   | 0,01  | 60  |
|                                    | 300                     | 168   | 189 | 252 | 0,45                                  | 0,01  | 45  |
| Швидкотвердіючий<br>портландцемент | 600                     | 315   | 357 | 378 | 0,85                                  | 0,01  | 85  |
| Шлакопортланд-<br>цемент           | 400                     | 126   | 189 | 252 | 0,55                                  | 0,01  | 55  |
|                                    | 300                     |   |     |     | 0,41                                  | 0,01  | 41  |
| Пуцолановий пор-<br>тландцемент    | 400                     | 105   | 168 | 231 | 0,55                                  | 0,01  | 55  |
|                                    | 300                     | 126   | 168 | 252 | 0,41                                  | 0,01  | 41  |
| Глиноземистий<br>цемент            | 500                     | 105   | 147 | 210 | 0,028                                 | 0,028 | 100 |
|                                    | 600                     | 378   | 399 | 420 |                                       |       |     |

Примітка: Марка цементу зазначена при випробуванні в жорстких розчинах

Подальші дослідження дозволили істотно розширити температурний інтервал у залежностях, які використовуються для прогнозування тепловиділення цементів і бетонів. Цьому сприяли, насамперед, дослідження Раструпа, який запропонував [98] температурну функцію виду:

$$f_{20} = 2 \frac{t-20}{10} \quad (2.117)$$

Наведена формула показує, що з підвищенням температури твердіння бетону на кожні  $10^\circ\text{C}$  швидкість тепловиділення збільшується вдвічі (якщо порівняння швидкостей робити в терміни досягнення однакових теплових ефектів). Ряд авторів показали, однак, що не всі цементы підкоряються формулі Раструпа.

Дослідженнями Н.Б.Марьямова встановлено [99], що для даного цементу при постійному водоцементному відношенні тепловиділення можна представити як функцію добутку температури бетону (цементу) на час, тобто як функцію градусо-годин:

$$V = t_6 \tau \quad (2.118)$$

Н.Б.Марьямовим запропонована формула для визначення тепловиділення портландцементу в залежності від В/Ц і градусо-годин (кДж/кг):

$$q_{\tau} = 7,77q_{28}(В/Ц)^{0,44} (1 - e^{-bv}), \quad (2.119)$$

де  $a = 1,00$ ,  $b = 0,0015$  при  $0 \leq v \leq 375$ ;  
 $a = 0,666$ ,  $b = 0,0004$  при  $375 < v < 2000$ .

Для практичних розрахунків за цією формулою побудована номограма (рис. 2.11). При зміні величини  $v$  у межах від 0 до 300 зручно користуватися більш простою формулою:

$$q_{\tau} = 0,00097q_{28}(В/Ц)^{0,44} t_{\delta} \tau. \quad (2.120)$$

Формули (2.119) і (2.120) можна використовувати для оцінки тепловиділення цементу і бетону в процесі пропарювання при  $t_{\delta} 50-90^{\circ}\text{C}$ . Як відомо, [99] тільки за перші 3...4 год. пропарювання бетону виділяється біля 20% усього тепла, яке витрачається на нагрівання виробів, і

воно повинне враховуватись у теплотехнічних розрахунках. Недоліками формул є необхідність знання 28-добового тепловиділення цементу і неврахування особливостей тепловиділення різних видів цементу при нагріванні.

При розрахунках тепловиділення бетону в масивах і при зимовому бетонуванні зручно використання усереднених експериментальних даних про пито́ме тепловиділення різних видів цементу в залежності від температури і часу твердіння (табл.2.26 і 2.27) бетону [48].

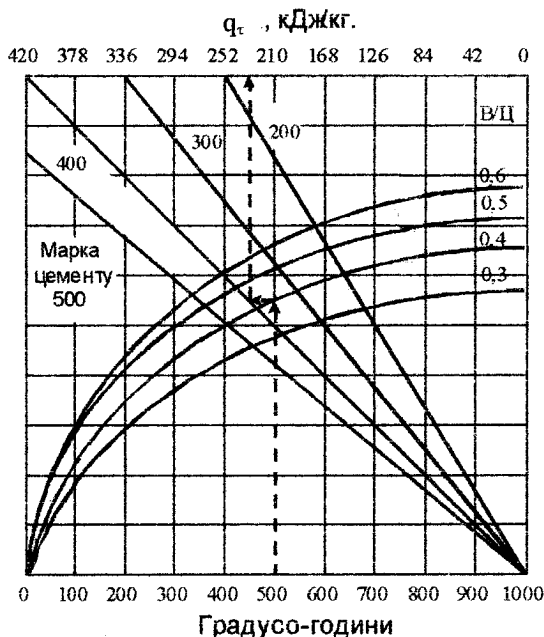


Рис. 2.11. Номограма для визначення тепловиділення бетону, виготовленого на портландцементі, при тепловій обробці

Питоме тепловиділення цементу в бетонах  
із протиморозними добавками при різних температурах  
ізотермічного твердіння [48]

| Темпе-<br>ратура,<br>°С                | Добавки                        |     | Питоме тепловиділення, кДж/кг,<br>у віці, год. |       |       |       |       |       |       |
|--|--------------------------------|-----|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | вид                            | %   | 24   | 48    | 72    | 120   | 168   | 192   | 240   |
| <b>Портландцемент</b>                  |                                |     |  |       |       |       |       |       |       |
| 0                                      | без добавки                    | 0   | 18   | 52,8  | 88,8  | 132,3 | 161,2 | 171,2 | 187   |
|  | CaCl <sub>2</sub> +NaCl        | 3+7 | 39,8   | 78,7  | 111,8 | 169   | 207,7 | 221,9 | 245,8 |
|  | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 10  | 54   | 104,7 | 159,1 | 225,7 | 257,5 | 269,2 | 288,5 |
|  | NaNO <sub>2</sub>              | 10  | 36,8   | 72,4  | 100,5 | 150,3 | 193,9 | 212,7 | 244,9 |
|  | без добавки                    | 0   | 0  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| -10                                    | CaCl <sub>2</sub> +NaCl        | 3+7 | 2,5  | 6,3   | 9,6   | 22,6  | 33,1  | 36    | 45,2  |
|  | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 10  | 5  | 12,9  | 21,8  | 53,2  | 82,1  | 96,3  | 118,5 |
|  | NaNO <sub>2</sub>              | 10  | 0  | 0     | 0,8   | 7,5   | 15,5  | 20,9  | 29,3  |
| 20                                     | без добавки                    | 0   | 111,4  | 185,9 | 220,2 | 262,9 | 289,7 | 299,8 | 316,5 |
| <b>Швидкотвердіючий портландцемент</b> |                                |     |  |       |       |       |       |       |       |
| -10                                    | без добавки                    | 0   | 0  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
|  | CaCl <sub>2</sub> +NaCl        | 3+7 | 10,5   | 20,9  | 22,6  | 60,3  | 82,5  | 90,9  | 108,4 |
|  | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 10  | 10,9   | 23,7  | 40,6  | 78,7  | 112,2 | 126,4 | 145,7 |
|  | NaNO <sub>2</sub>              | 10  | 0  | 0     | 5,9   | 36,8  | 68,7  | 82,1  | 105,9 |
| 20                                     | без добавки                    | 0   | 137,3  | 212,7 | 257,9 | 310,7 | 335,8 | 345,4 | 357,2 |

Примітка: У третій колонці вказана витрата добавок NaNO<sub>2</sub> і K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> в % від маси цементу, CaCl<sub>2</sub> і NaCl - від маси води.

Статистична обробка даних табл.2.26 дозволила нам одержати поліноміальні рівняння для розрахунку питомого тепловиділення портландцементу марок М300...М600 ( $q_1$ ) і шлакопортландцементу марки М300 ( $q_2$ ), кДж/кг:

$$q_1 = -46,59 - 0,365R_6 + 7,1 \lg t + 212,98 \lg \tau + 0,038R_6^2 - 0,054t^2 - 29,7(\lg \tau)^2 - 0,36t \lg \tau ; \quad (2.121)$$

$$q_2 = 12,24 + 4,886t + 130,47 \lg \tau - 0,046t^2 - 18,33(\lg \tau)^2. \quad (2.122)$$

Таблиця 2.27

Питоме тепловиділення цементу різних видів  
і марок у залежності від температури  
і часу твердіння [48] бетону

| Вид і марка цементу                                   | Температура, °С | Тепловиділення, кДж/кг, через діб. |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-----------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |                 | 0,25                               | 0,5   | 1     | 2     | 3     | 7     | 14    | 28    |
| Портланд-цемент М300                                  | 5               | -                                  | -     | 25,2  | 58,8  | 88,2  | 168,0 | 205,8 | 235,2 |
|   | 10              | 8,4                                | 21,0  | 42,0  | 84,0  | 126,0 | 197,4 | 231,0 | 273,0 |
|   | 20              | 29,4                               | 42,0  | 75,6  | 126,0 | 168,0 | 231,0 | 252,0 | 294,0 |
|   | 40              | 50,4                               | 84,0  | 147,0 | 201,6 | 231,0 | 252,0 | 294,0 | -     |
|   | 60              | 84,0                               | 147,0 | 193,2 | 243,6 | 264,6 | 294,0 | -     | -     |
| Портланд-цемент М400                                  | 5               | -                                  | -     | 29,4  | 63,0  | 84,0  | 168,0 | 210,0 | 252,0 |
|   | 10              | 12,6                               | 25,2  | 50,4  | 105,0 | 138,6 | 210,0 | 252,0 | 294,0 |
|   | 20              | 46,2                               | 67,2  | 105,0 | 168,0 | 210,0 | 273,0 | 315,0 | 336,0 |
|   | 40              | 54,6                               | 126,0 | 189,0 | 231,0 | 273,0 | 315,0 | 336,0 | -     |
|   | 60              | 105,0                              | 168,0 | 231,0 | 273,0 | 315,0 | 336,0 | -     | -     |
| Портланд-цемент М500                                  | 5               | 12,6                               | 21,0  | 42,0  | 84,0  | 126,0 | 189,0 | 231,0 | 252,0 |
|   | 10              | 21,0                               | 42,0  | 63,0  | 105,0 | 159,6 | 252,0 | 285,6 | 315,0 |
|   | 20              | 50,4                               | 84,0  | 126,0 | 189,0 | 252,0 | 294,0 | 336,0 | 378,0 |
|   | 40              | 105,0                              | 168,0 | 210,0 | 268,8 | 294,0 | 357,0 | 378,0 | -     |
|   | 60              | 189,0                              | 231,0 | 273,0 | 315,0 | 348,6 | 378,0 | -     | -     |
| Портланд-цемент швидко-твердіючий М600                | 5               | 16,8                               | 33,6  | 54,6  | 92,4  | 147,0 | 210,0 | 252,0 | 315,0 |
|   | 10              | 33,6                               | 50,4  | 75,6  | 126,0 | 168,0 | 273,0 | 336,0 | 378,0 |
|   | 20              | 63,0                               | 105,0 | 147,0 | 210,0 | 294,0 | 336,0 | 378,0 | 420,0 |
|   | 40              | 117,6                              | 189,0 | 231,0 | 294,0 | 336,0 | 378,0 | 420,0 | -     |
|   | 60              | 210,0                              | 252,0 | 294,0 | 336,0 | 378,0 | 420,0 | -     | -     |
| Шлакопортландцемент і пуцолановий портландцемент М300 | 5               | -                                  | 12,6  | 21,0  | 42,0  | 71,4  | 126,0 | 168,0 | 189,0 |
|   | 10              | -                                  | 21,0  | 33,6  | 63,0  | 96,6  | 163,8 | 210,0 | 231,0 |
|   | 20              | -                                  | 37,8  | 63,0  | 126,0 | 138,6 | 205,8 | 243,6 | 273,0 |
|   | 40              | 42,0                               | 75,6  | 117,6 | 168,0 | 201,6 | 247,8 | 273,0 | -     |
|   | 60              | 63,0                               | 105,0 | 147,0 | 201,6 | 222,6 | 273,0 | -     | -     |

Наведені рівняння дозволяють прогнозувати питоме тепловиділення цементу в бетоні в діапазоні температур 10...60°С при тривалості твердіння від 0,5 до 28 діб.

## 2.5. Деформативні властивості

Поведінка бетону в конструкціях значною мірою визначається його пружньо-пластичними деформаціями. Повна деформація бетону в певний момент часу  $\varepsilon_t$  складає:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{пр} + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_{ус}, \quad (2.123)$$

де  $\varepsilon_{пр}$  - пружна деформація,  $\varepsilon_{пл}$  - пластична деформація,  $\varepsilon_{ус}$  - деформація усадки.

Пружна деформація виникає при миттєвому завантаженні бетону. Вона визначається співвідношенням різних елементів структури бетону: гелево-кристалічної маси, капілярних пор, негідратованого цементу й ін. [25]. Характеристикою деформативності бетону в пружній області служить модуль пружності, який називають також початковим або миттєвим модулем пружності бетону  $E_6$  (МПа). У лабораторних умовах його знаходять при порівняно невисокому рівні напруги  $\sigma$  (20...30% від межі міцності дослідних зразків) із відношення:

$$E_6 = \sigma / \varepsilon, \quad (2.124)$$

тобто як тангенс кута нахилу на графіку  $\sigma - \varepsilon$  із незначною кривизною.

При проектуванні конструкцій для прогнозування модуля пружності бетону при завантаженні його у віці  $\tau$  найбільше застосування знайшли [14] залежності типу:

$$E_6 = \frac{E_m R_\tau}{S + 10R_\tau}, \quad (2.125)$$

де  $R_\tau$  - кубикова міцність бетону на стиск;  $E_m$  і  $S$  - емпіричні константи.

У будівельних нормах рекомендуються значення  $E_m = 5,3 \cdot 10^5$ ;  $S=200$ .

Європейським комітетом по бетону [18] і нормами ряду країн рекомендується залежність

$$E_6 = C (10 R_\tau)^\gamma, \quad (2.126)$$

де  $C=1,9 \cdot 10^3$ ;  $\gamma = 0,5$ .

Рядом авторів запропоновані різні модифікації формули (2.126) і значення коефіцієнтів.

Розбіжності між значеннями  $E_6$ , обчисленими за формулами (2.125) і (2.126), зростають (до 35%) у міру підвищення міцності бетону.

При значних коливаннях у вмісті цементного каменю для бетонів із різним модулем пружності заповнювачів  $E_3$  справедлива більш загальна формула [14]:

$$E_6 = \frac{\varphi E_{к.м} R_{\tau}}{\varphi S \rho_{\tau} + R_{\tau}}, \quad (2.127)$$

де  $E_{к.м}$  - граничне значення модуля пружності цементного каменю ( $E_{к.м} = 5 \cdot 10^4$ );  $\rho_{\tau}$  - масовий вміст цементного каменю в бетоні,

( $\varphi$  і  $S$  - коефіцієнти:  $\varphi = \frac{n}{1 + \rho_{к}(n - 1)}$ , де  $n = E_s / E_{к}$ ;  $S \approx 800$ ).

При використанні високоякісних крупних заповнювачів із вивержених порід типу граніту в сполученні з кварцовим піском ( $E_s = 5,5 \cdot 10^4$  МПа. Є.Н.Щербаковим показано [101], що для широкої області складів бетону вираз (2.127) перетвориться у формулу:

$$E_6 \cdot 10^{-4} = \frac{5,3 R_{\tau}}{85 \rho_{к} + R_{\tau}}. \quad (2.128)$$

При розрахунку елементів залізобетонних конструкцій у ряді випадків враховують граничні деформації бетону при короткочасному навантаженні, тобто такі деформації, які можуть бути досягнуті до моменту втрати бетоном несучої здатності або порушення щеплення з арматурою. Звичайно при стиску приймають граничні деформації  $\epsilon_{R_{ст}} = 200 \cdot 10^{-5}$ , а при розтягу  $\epsilon_{R_p} = 15 \cdot 10^{-5}$ . Для бетону, до якого ставлять підвищені вимоги за тріщиностійкістю, нормують граничні деформації, особливо при розтягу. Наприклад, для гідротехнічного масивного бетону в 180-добовому віці гранична розтяжність повинна бути у відповідності з нормами не меншою  $5 \cdot 10^{-5}$  для бетону внутрішніх зон і  $7 \cdot 10^{-5}$  - зовнішніх.

У ряді робіт [14] встановлено, що граничні деформації бетону при осьовому стиску лінійно зростають із збільшенням його призмової міцності  $R_{пр}$ . Статистична обробка численних експериментальних даних [14] дозволяє вважати, що середнє значення  $R_{пр} \approx 0,78 R_{ст}$ . Г.І.Писанко й Є.Н.Щербаковим кореляційний зв'язок між граничною деформацією при стиску і призмовою міцністю бетону апроксимований аналітичним виразом:

$$\frac{\epsilon_{R_{ст}} \cdot 10^4}{R_{пр}} = 0,1 + \frac{11}{R_{пр}}. \quad (2.129)$$

Для граничної деформації бетону при розтягу, визначеної прямим методом, не відомі досить обґрунтовані залежності, які зв'язують її з міцносними й іншими параметрами бетону. Значною мірою це можна пояснити складністю і трудомісткістю тензометричних визначень

деформативності, що робить, як правило, обмеженим число вимірів, недостатнє для статистичної обробки. Однак відомі розрахункові формули для визначення величини т.зв. умовної деформативності [102], яка чисельно близька до величини граничної деформації бетону при розтягу.

Умовну деформативність  $\epsilon_y$  запропоновано знаходити як відношення межі міцності при розтягу розколюванням ( $R_{p,p}$ ) до величини динамічного модуля пружності. Динамічний модуль пружності визначається резонансним або ультразвуковим методами і за своєю величиною він приблизно дорівнює початковому модулю пружності, визначеного при статичних випробуваннях. Динамічний модуль пружності зв'язаний [103] із міцністю бетону на стиск залежністю:

$$E_{дин} = \frac{4 \cdot 10^3 R_{ст}}{1 + 0,07R_{ст}} \quad (2.130)$$

У процесі лабораторного контролю величину  $\epsilon_y$  можна знайти, знаючи міцності при розколюванні і стиску:

$$\epsilon_y = \frac{R_{p,p}(1 + 0,07R_{ст})}{4 \cdot 10^3 R_{ст}} \quad (2.131)$$

При невідомих значеннях  $R_{p,p}$  можна, використовуючи співвідношення  $R_{p,p} = 0,055(10R_{ст})^{2/3}$  [14], перетворити залежність (2.131):

$$\epsilon_y = \frac{0,0638(1 + 0,07R_{ст})}{10^3 \sqrt[3]{R_{ст}}} \quad (2.132)$$

Залежності (2.131 і 2.132) можуть бути використані лише для орієнтованих оцінок граничних деформацій при навантаженні бетону в тому числі і при проєктуванні складів. Варто мати на увазі істотний вплив на ці параметри особливостей вихідних матеріалів і добавок [14]. Величина граничної розтяжності бетону помітно збільшується також із збільшенням вмісту цементного каменю і при збільшенні долі дрібного заповнювача в суміші заповнювачів [14,100].

Повзучість - здатність бетону деформуватися в часі при тривалій дії постійного навантаження. Існує [25] ряд гіпотез, які розглядають механізм деформацій повзучості під дією зовнішнього навантаження як: капілярну усадку, обумовлену зміною розмірів пор у бетоні (Фрейсине); течу гелю гідросилікатів кальцію в цементному камені під дією теплових флуктуацій і механічних напруг (А.Є.Шейкін); результат механічного видавлювання вологи з цементного каменю (Р.Лерміт); наслідок виникнення і розвитку мікротріщин (О.Я.Берг).

Мабуть повзучість  $\epsilon$  в тій або іншій мірі результатом комплексу зазначених фізичних явищ, що виявляється у великій кількості факторів, які визначають цей вид деформацій.

У якості міри повзучості приймають питомі деформації бетону на одиницю постійно діючого навантаження. Запропоновано ряд емпіричних формул для розрахунку міри повзучості бетону в залежності від його міцності й основних параметрів складу. Деякі найбільш відомі з цих формул наведені в табл. 2.28.

Таблиця 2.28

Основні розрахункові формули для прогнозування міри повзучості (1/МПа) важкого бетону

| № п/п | Ф о р м у л а   | Автори             |
|-------|---|--------------------|
| 1     | $C_{m(28)} = K / R_{ст} , \quad (2.133)$ <p><math>C_{m(28)}</math> – граничне значення міри повзучості бетону при завантаженні його в 28 діб; <math>R_{ст}</math> – кубікова міцність бетону на стиск у віці 28 діб, МПа; <math>K=2500 \cdot 10^{-6}</math></p> | Вельмі [104]       |
| 2     | $C_{m(28)} = \frac{K(B + 0,33Ц)B / \Gamma!}{R_{ст}} , \quad (2.134)$ <p><math>B</math> і <math>Ц</math> – витрати води і цементу на <math>1 \text{ м}^3</math> бетону; <math>K = 14 \cdot 10^{-6}</math>.</p>   | Вельмі [104]       |
| 3     | $C_{m(28)} = \frac{KV_n}{R_{ст} \sqrt[3]{R_m / R_{ст}}} , \quad (2.135)$ <p><math>V_n</math> – об'єм пор у цементному камені за умови 15% хімічно зв'язаної води; <math>R_m</math> – граничне значення кубікової міцності; <math>K=94 \cdot 10^{-6}</math>.</p> | Гуммель [105]      |
| 4     | $C_{m(28)} = \frac{K(B + 0,33Ц)B / Ц}{\sqrt{R_{ст}}} \quad (2.136)$ <p><math>K=0,92 \cdot 10^{-6}</math>.</p>   | ЕКБ [18]           |
| 5     | $C_{m(28)} = K \frac{1 + B / Ц}{1 + B / Ц + m} (B / Ц)^2 , \quad (2.137)$ <p><math>K = 11 \cdot 10^{-6}</math>; <math>m</math> – масове співвідношення між заповнювачем і цементом.</p>   | Є.І.Уліцький [106] |
| 6     | $C_{m(28)} = \frac{KB}{R_{ст}} , \quad (2.138)$ <p><math>K=16 \cdot 10^{-6}</math>.</p>   | Є.М.Щербаков [14]  |



Всі формули для прогнозування міри повзучості за винятком самих ранніх показують її неоднозначний зв'язок із міцністю бетону на стиск. Більшістю дослідників доведено, що на міру повзучості впливає як В/Ц, так і вміст цементного каменю в бетоні, що погоджується з гіпотезами про механізм її розвитку в бетоні.

Більшість емпіричних формул повзучості може бути зведена до виразу (2.138), якщо коефіцієнт  $K$  в них представити деякою функцією В/Ц і  $R_{ct}$ . Вираз (2.138) є найпростішим експериментально обгрунтованим і зручним при проектуванні складів для оцінки міри повзучості  $C_{m(28)}$ , хоча не можна виключити можливість застосування й інших розрахункових формул (табл.2.28).

У найбільш загальному вигляді вираз для оцінки граничної міри повзучості можна представити [14] як

$$C_m(\tau) = C_{m(28)} \xi_{\bar{r}} \xi_{\theta} \xi_{\tau}, \quad (2.139)$$

де  $\xi_{\bar{r}}$ ;  $\xi_{\theta}$ ;  $\xi_{\tau}$  - коефіцієнти, які враховують вплив розмірів перерізу елемента, вологості навколишнього середовища і віку бетону в момент прикладання навантаження.

Чисельні значення коефіцієнтів пропонується [14] знаходити за формулами:

$$\xi_{\bar{r}} = 0,9 \left( 0,7 + \frac{1}{\bar{r}} \right) \quad (2.140)$$

$$\xi_{\theta} = 1,54 \left( \frac{135 - \theta}{100} \right) \quad (2.141)$$

$$\xi_{\tau} = 0,45 + \frac{30}{27 + \tau} \quad (2.142)$$

де  $\bar{r}$  - приведений радіус перерізу елемента, см ( $\bar{r} = F/p$ ,  $F$  - площа поперечного перетину,  $p$  - периметр);  $\theta$  - відносна вологість повітря, %;  $\tau$  - тривалість твердіння бетону, діб.

Для пропарених бетонів у вираз (2.139) вводять додатковий коефіцієнт  $\xi_n = 0,9$ . У формулу (2.139) можливе введення і інших емпіричних коефіцієнтів, наприклад, тих, які характеризують вплив різних добавок на деформативні властивості бетону. Відомо, зокрема, що добавки, які знижують водопотребу, і прискорювачі твердіння, збільшуючи міцність, водночас зменшують повзучість [107]

При виконанні умови  $0,7 \leq R_{ct} / R \leq 1$  для оцінки міри повзучості без врахування  $\bar{r}$  і  $\theta$  може бути використана [14] формула:

$$C_{m(\tau)} = \frac{KB}{R_{\tau}} \quad (2.143)$$

Для розрахунку повзучості в залежності від часу навантаження найбільше проста формула була запропонована Лорманном [108]:

$$C_{m(\tau)} = C_{m(\infty)} \left( \frac{\tau}{a + \tau} \right), \quad (2.144)$$

де  $a$  - час прикладання навантаження;  $\tau$  - вік бетону.

Після швидкої деформації в перші години навантаження ріст деформацій повзучості сповільнюється. У першому наближенні за період від 3 діб до 2 років вона змінюється як логарифм часу. При цьому навантаження повинне бути значно (наприклад, на 50%) менше граничної руйнуючої напруги.

Усадка бетону характеризує його власні деформації, тобто деформації, не зв'язані з дією зовнішніх навантажень і які супроводжуються зменшенням об'єму. Розрізняють вологісну, карбонізаційну і контракційну усадку бетону. Найбільше позначається на поведінці бетону в конструкціях вологісна або гідравлічна усадка, характерна для періоду висихання бетону. Зменшення об'єму бетону в процесі його висихання обумовлене, насамперед, дією капілярних сил, які виникають у цементному камені при випаровуванні води з капілярів і видаленні міжкристалічної води, а також адсорбційно-зв'язаної води з тоберморітового гелю [25]. Механізм об'ємних змін цементного каменю залежить від вологості середовища. При низкій вологості середовища капілярні сили стають незначними й усадка викликається випаровуванням міжкристалічної води, а при подальшому сушінні і адсорбційно-зв'язаній воді гелю.

Усадочні деформації викликають у бетоні внутрішні напруження, особливо значні при нерівномірному висиханні конструкцій і роботі їх у стиснутих умовах [108]. Вони можуть бути причиною розривів у контактній зоні і розчинній частині бетонів і викликати, особливо в сполученні з температурними напруженнями, появу тріщин. Усадочні напруження несприятливо впливають на морозостійкість, водонепроникність, втомлюваність, викликають втрати попереднього напруження при натягу арматури.

А.Є.Десов [15], припускаючи, що зразки деформуються при усадці рівномірно по перерізу, обчислив модуль тріщиноутворення цементного каменю, обумовлений усадочними напруженнями:

$$T = R_p / \varepsilon_{yc}, \quad (2.145)$$

де  $R_p$  - міцність зразків на розтяг;  $\epsilon_{yc}$  - величина усадочних деформацій до моменту появи тріщин.

Ним встановлено, що тріщиноутворення цементного каменю характерне при  $T < 3,5$  МПа, тріщини від усадки утворюються в цементному камені при абсолютних значеннях усадки від 40 до 150 мкм/м.

Для бетонів, до яких ставляться вимоги за тріщиностійкістю, величина усадочних деформацій може нормуватися. Наприклад, для гідротехнічного бетону при відносній вологості повітря 60% і температурі 18°C у віці 28 діб лінійна усадка звичайно допускається не більшою 0,3 мм/м ( $0,3 \cdot 10^{-3}$ ), а у віці 180 діб - 0,7 мм/м ( $0,7 \cdot 10^{-3}$ ).

Усадку бетону  $\epsilon_{yc}$  у залежності від об'єму введеного заповнювача можна [74] знайти з виразу

$$\epsilon_{yc} = \epsilon_{yc}^n (1 - V_{зап})^n, \quad (2.146)$$

де  $\epsilon_{yc}^n$  - усадка цементного каменю;  $V_{зап}$  - об'ємна доля заповнювача.

Загальна усадка цементного каменю звичайно складає від 3 до 5 мм/м, у бетоні вона коливається в основному від 0,2 до 0,4 мм/м.

На усадці цементного каменю позначаються численні фактори: хіміко-мінералогічний склад, питома поверхня цементу, вміст у ньому гіпсу і лугів, водоцементне відношення й ін. За інших рівних умов кінцева усадка цементного каменю збільшується із збільшенням вмісту  $C_2S$ , при гідратації якого утворюється приблизно на 25% більше тоберморітового гелю, ніж  $C_3S$ . Підвищується також усадка цементного каменю з ростом вмісту  $C_3A$ , питомої поверхні цементу, вмісту лугів. Як вважає М.Венюа [108], в залежності від виду цементу усадка цементного каменю може змінюватися в 2-3 рази. Однак з огляду на те, що хіміко-мінералогічний склад і дисперсність сучасних заводських портландцементів змінюються в порівняно вузькій області і вирішальний вплив має описання цементного каменю заповнювачем, вплив особливостей портландцементів на величину усадки бетону виявляється малоістотним [14]. Лише при використанні белітових високоалюмінатних цементів, які промисловістю виготовляються в особливих випадках, вплив мінералогічної характеристики цементу на усадку бетону може стати досить вагомим [108].

На величині усадки бетону позначаються пружні властивості заповнювачів. Зерна заповнювачів, покриті оболонкою цементного каменю, перешкоджають усадці тим більше, чим вищий їх модуль де-

формації. За даними А.М.Невілля [74] до річного віку бетони з використанням у якості заповнювача піщанику мали приблизно в 2 рази більшу усадку, ніж на вапняку. Збільшують усадку бетону домішки глинистих часток у заповнювачі. Водночас, для рядових бетонів на високоміцних щільних заповнювачах коливання модуля пружності заповнювачів, як показує аналіз численних експериментальних даних, не позначається істотно на величині усадки бетону.

Відомі емпіричні формули, запропоновані для прогнозування усадки важкого бетону в атмосферних умовах при незмінних розмірах перерізу елементів, відрізняються особливостями врахування витрати води і цементу в бетоні, а також їх співвідношення (табл.2.29).

Таблиця 2.29

Основні розрахункові формули для прогнозування усадки бетону

| № п/п | Формули   | Автори                     |
|-------|---|----------------------------|
| 1     | $\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,24B^{3/2} \frac{(1 + \text{Ц} / B)^{3/2}}{6 + (\text{Ц} / B)^2}, \quad (2.147)$ <p><math>B</math> - витрата води в л/м<sup>3</sup>; <math>\text{Ц}/B</math>- цементно-водне відношення.</p> | Є.Н.Щербаков [14]          |
| 2     | $\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125B\sqrt{B} \quad (2.148)$   | Є.Н.Щербаков [14]          |
| 3     | $\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = \frac{5B / \text{Ц}}{1 + m} (667 + \text{Ц}), \quad (2.149)$ <p><math>m</math>- масове співвідношення між заповнювачем і цементом.</p>  | Вельмі [104]               |
| 4     | $\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 5500 \frac{1 + B / \text{Ц}}{1 + B / \text{Ц} + m} (B / \text{Ц})^2 \quad (2.150)$  | ЕКБ [18]                   |
| 5     | $\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,25[(\text{Ц} + 2,75) + 6,9(\text{Ц} - 75)(B / \text{Ц})^2] \quad (2.151)$   |                            |
| 6     | $\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 300[0,7 + 0,15(\frac{\text{Ц} - 225}{25} + \frac{B / \text{Ц} - 0,4}{0,1})] \quad (2.152)$  | С.В.Александровський [109] |

Аналіз, виконаний у роботі [14], показав, що вирішальним фактором, який визначає усадку бетону, є витрата води. При незмінній витраті води в суміші величина  $\epsilon_{yc}$  мало залежить від витрати цементу і Ц/В. Для інженерних розрахунків найбільш простою і зручною є формула (2.148).

За межами області сталості 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 коригуватись з врахуванням Ц/В. Для цієї області Є.Н.Щербаков запропонував використовувати залежність

$$\epsilon_y \cdot 10^6 = V_o \sqrt{V_c} \cdot f(\text{Ц} / \text{В}), \quad (2.153)$$

$$\text{де } f(\text{Ц} / \text{В}) = \frac{18,5}{6 + (\text{Ц} / \text{В})^2} \left( \frac{1 + \text{Ц} / \text{В}}{1 - 0,08\text{Ц} / \text{В}} \right)^{3/2} \cdot 10^{-2}.$$

При зміні Ц/В від 2,5 до 3,5 середнє значення функції  $f(\text{Ц/В})$  коливається в межах від 14,2 до 15,6, тому для спрощення розрахунків при похибці  $\pm 5\%$  його рекомендовано приймати рівним 15.

Для обчислення граничної деформації усадки бетону в певній конструкції необхідно крім т.зв. нормативної усадки, яка обчислюється за формулами табл.2.29, врахувати вплив розмірів елемента ( $\xi_r$ ) і відносної вологості повітря  $\theta$  ( $\xi_\theta$ )[14]:

$$\epsilon_{yc.m} = \epsilon_{yc} \xi_r \xi_\theta, \quad (2.154)$$

$$\text{де } \xi_r = 0,1035(31 - \bar{r}); \quad \xi_\theta = 1,52 \left[ 1 - \left( \frac{\theta}{100} \right)^3 \right].$$

Для бетонів, пропарених при режимах, які найчастіше застосовуються, у вираз (2.154) ще варто ввести коефіцієнт  $\xi_n = 0,9$  [14].

Прогнозування усадочних деформацій в часі може бути виконане з врахуванням типових залежностей (рис. 2.12).

За даними міжнародної федерації попередньо напруженого бетону (ФІП) і Європейського комітету по бетону (ЄКБ) через 7 діб твердінні усадка складає 0,2; 28 діб. - 0,4; 180 діб. - 0,7; 365 діб. - 0,8  $\epsilon_{yc.m}$  [108].

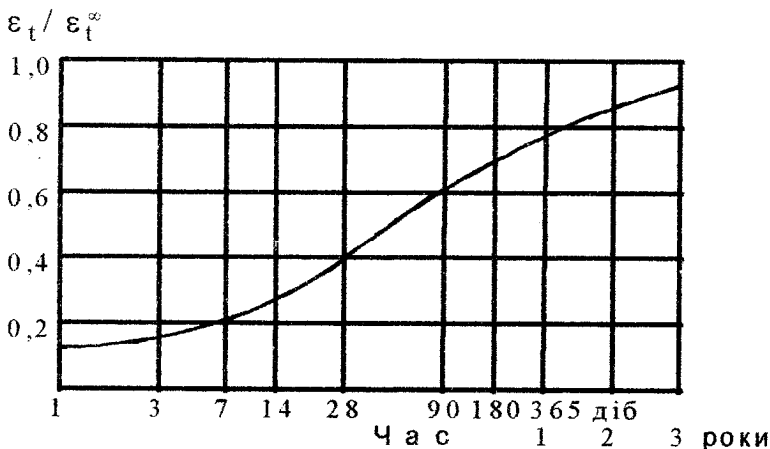


Рис. 2.12. Залежність деформацій усадки бетону в часі [108]

Для залізобетону усадка ( $\epsilon_{yc.m}^1$ ) додатково залежить від відсотка конструктивного армування  $W_o$ :

$$\epsilon_{yc.m}^1 = \epsilon_{yc.m} (1 - 10W_o) \quad (2.155)$$

Термічну усадку  $\epsilon_{yc}^T$  можна розрахувати за формулою [108]:

$$\epsilon_{yc}^T = K_{T,p} \Delta t, \quad (2.156)$$

де  $K_{T,p}$  коефіцієнт термічного розширення бетону (він коливається від 7 до 14  $\mu\text{м}/\text{м}^\circ\text{C}$  і в середньому приймається 10  $\mu\text{м}/\text{м}^\circ\text{C}$ ),  $\Delta t$ - перепад температур

## РОЗДІЛ 3. ВОДОПОТРЕБА І СПІВВІДНОШЕННЯ ЗАПОВНЮВАЧІВ У БЕТОННІЙ СУМІШІ

### 3.1. Водопотреба

Водопотреба - одна з найважливіших технологічних властивостей бетонних сумішей, яка однозначно пов'язана з їх легкоукладальністю або формуемістю і істотно впливає на ряд технічних властивостей затверділого бетону.

У практиці проектування складів бетону водопотребу бетонних сумішей визначають звичайно за усередненими емпіричними даними за допомогою графіків або таблиць, які пропонують деякі базові значення витрати води в л/м<sup>3</sup> у залежності від показників рухливості і жорсткості суміші. Потім ці величини уточнюються в залежності від особливостей вихідних матеріалів [1,3]. При цьому широко використовується встановлене незалежно один від одного В.І.Сорокером у СРСР [43] і Макмілланом у США [110] правило сталості водопотреби, відповідно до якого витрата води для досягнення необхідної легкоукладальності суміші в широкому діапазоні витрат цементу залишається практично постійною. За даними Ю.М.Баженова [1] критична витрата цементу, вище якої правило сталості водопотреби порушується, складає 400 кг/м<sup>3</sup>, за даними В.П.Сизова [3] - 350 кг/м<sup>3</sup>.

Більш пізні дослідження [43] показали, що водопотреба бетонної суміші знаходиться в тісній залежності не від витрати цементу, а від цементно-водного відношення. Відповідно до уявлень реології зі збільшенням Ц/В до деякого критичного значення ріст структурної в'язкості цементного тіста у бетонній суміші компенсується збільшенням його кількості. За межами критичного Ц/В таке збільшення кількості "мастила" уже не компенсує прогресивно зростаючу в'язкість тіста. Значення критичного (Ц/В)<sub>кр</sub> запропоновано знаходити в залежності від величини нормальної густоти цементного тіста (K<sub>н.г</sub>) [43]:

$$\left(\frac{Ц}{В}\right)_{кр} = \frac{1}{1,68K_{н.г}} \quad (3.1)$$

За І.Н.Ахвердовим [111] граничне В/Ц, яке відповідає 1,65 K<sub>н.г</sub>, характеризує статичну водоутримуючу здатність цементного тіста. При більшому водовмісті цементного тіста утворюється нестійка система і відокремлюється вільна вода. За іншими даними [112] водоут-

римуюча здатність портландцементу характеризується значенням  $1,6...1,8K_{н.г.}$ .

Для аналітичного розрахунку водопотреби бетонних сумішей запропонований ряд залежностей, оснований на використанні реологічних і структурних параметрів бетонної суміші. Однак вони мають, в основному, лише теоретичне значення, застосування їх на практиці хоча і можливе, однак зв'язане із значними складностями, необхідністю знання параметрів складу бетонної суміші, які на першій стадії проектування невідомі, а також ряду емпіричних коефіцієнтів.

Всі ці залежності виходять із того, що реологічні властивості бетонної суміші значною мірою визначаються якістю і кількістю цементного тіста, яке утворює оболонки своєрідного "мастила" на зернах заповнювача. Нижче наведені найбільше відомі залежності цього типу. І.Д.Запорожець запропонував [77] лінійну залежність показника осадки конуса (ОК) від вмісту вільної мобільної води у бетонній суміші ( $V_v$ ):

$$OK = nV_v, \quad (3.2)$$

де  $n$  - коефіцієнт пропорційності.

Загальний водовміст бетонної суміші складається з вільної води  $V_v$ , а також води, яку утримують цемент  $V_{ц}$  і заповнювачі  $V_3$ .

$$V = V_v + V_{ц} + V_3. \quad (3.3)$$

Для знаходження складових рівняння (3.3) пропонуються залежності:

$$V_v = \frac{1}{n} OK; \quad (3.4)$$

$$V_{ц} = \alpha_{ц} Ц / \rho_{ц}; \quad (3.5)$$

$$V_3 = \alpha_3 (1000 - V - Ц / \rho_{ц}), \quad (3.6)$$

де  $n$ ,  $\alpha_{ц}$  і  $\alpha_3$  - емпіричні коефіцієнти.

Ю.Сторк вважає [8], що рухливість бетонної суміші можна виразити рівнянням:

$$OK = 20 / 2^{\frac{2\tau}{2}}, \quad (3.7)$$

де  $\tau$  - параметр, що залежить від багатьох структурно-технологічних факторів:



$$\tau = \frac{n_1 V_{ц_1} + n_2 V_{п_2} + n_3 V_{ц_3} + 173 - 46,5 \log D_{\max} / 15 - B_0}{20}, \quad (3.8)$$

де  $V_{ц_1}$ ,  $V_{п_2}$ ,  $V_{ц_3}$  - абсолютні об'єми цементу, піску і крупного заповнювача;  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  - коефіцієнти змочування;  $D_{\max}$  - максимальний розмір крупного заповнювача, мм;  $B_0$  - витрата води, л/м<sup>3</sup> без урахування води, поглиненої порами заповнювача.

Одна з перших спроб врахувати вплив на рухливість бетонної суміші об'ємного співвідношення цементного тіста і заповнювачів, а також параметра водовмісту цементного тіста зроблена І.М.Ахвердовим [111]. Ним запропонована залежність:

$$OK = 20 \rho_{с.м} \frac{V_{ц.т} X_T - 0,878}{V_3 \cdot 0,774}, \quad (3.9)$$

де  $V_{ц.т}$  і  $V_3$  - об'ємні концентрації цементного тіста і заповнювачів;  $X_T = B/\text{Ц}K_{ц.т}$  - характеристика водовмісту цементного тіста;  $\rho_{с.м}$  - густина бетонної суміші.

Розрахункові дані за формулою (3.9) погоджуються з експериментальними лише при ОК до 8 см. У випадку застосування більш пластичних сумішей розходження розрахункових і експериментальних значень рухливості зростає до 3 разів.

І.М.Ахвердов, використовуючи запропонований ним параметр  $X_T$ , встановив [28], що в загальному вигляді водопотреба бетонних сумішей визначається консистенцією цементного тіста, водопоглинанням суміші піску і щебеню (гравію), а також їх вологістю, і теоретично одержав відповідні рівняння. Розрахунок водопотреби за цими рівняннями, однак, не становить інтересу для практики проектування складів бетонних сумішей, оскільки не ув'язаний із показниками легкоукладальності бетонних сумішей і вимагає також знання витрат усіх компонентів.

Розвиваючи концепцію про залежність рухливості бетонної суміші від характеристики водовмісту цементного тіста з урахуванням води, іммобілізованої заповнювачами, а також вмісту цементного тіста між зернами заповнювача, М.П.Блещик вивів [113] рівняння рухливості і жорсткості бетонних сумішей:

$$OK = K_{ок} (10V_{п.т_1})^2 [(10V_{ц.т_2} - 1)^2 + 0,7] \cdot \left( \frac{B - B_{погл}}{\text{Ц} K_{ц.т}} - 0,5 \right)^3, \quad (3.10)$$

$$Ж = \frac{K_{ж}}{(10V_{ц.т_1})^2 [(10V_{ц.т_2} - 1) + 0,7] \left( \frac{B - B_{погл.}}{ЦК_{н.г}} - 0,5 \right)^3}, \quad (3.11)$$

де  $K_{ок} = 1,4 \text{ см}$ ,  $K_{ж} = 30 \text{ с}$ ;  $V_{ц.т_1}$  - об'ємна концентрація цементного тіста, плівкової і капілярної води в прошарках між зернами заповнювача;  $V_{ц.т_2}$  - об'ємна концентрація цементного тіста, яке знаходиться в міжзерновому просторі;  $B_{погл.}$  - кількість води, поглиненої заповнювачем.

Одним із найпростіших структурних критеріїв рухливості бетонної суміші є критерій  $N$ , рівний відношенню товщини шару цементного тіста між зернами заповнювача до величини поверхні зерен [1]. Цей критерій, однак, справедливий лише при певній консистенції цементного тіста, що не дозволяє врахувати правило сталості водопотреби і вплив нормальної густоти.

Нами разом із В.А.Шушпановим запропоновані [2] більш універсальні структурні критерії рухливості ( $L_{ок}$ ) і жорсткості бетонної суміші ( $L_{ж}$ ):

$$L_{ок} = \frac{N}{\ln_0} = \frac{V_{ц.т} - P_{\alpha} V_3}{(U_3 V_3)^2 \ln_0}; \quad (3.12)$$

$$L_{ж} = \frac{N}{\ln_m} = \frac{V_{ц.т} - P_{\alpha} V_3}{U_3 V_3 \ln_m}. \quad (3.13)$$

У наведених вище рівняннях  $V_{ц.т}$  і  $V_3$  - об'єм відповідно цементного тіста і заповнювача в  $1 \text{ м}^3$  бетонної суміші,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $P_{\alpha}$  і  $U$  - пористість і питома поверхня заповнювача;  $\ln_0$  і  $\ln_m$  - параметри структурної в'язкості цементного тіста у бетонній суміші без вібрування і при стандартних коливаннях вібромайданчика.

$$\ln_0 = e^{e^{-m_1 s} - 1}; \quad (3.14)$$

$$\ln_0 = e^{e^{-m_1 s} - 1}, \quad (3.15)$$

де  $m \approx 4.4$ ;  $m_1 \approx 2.2$ .

$$S = B / Ц - 1,68 K_{н.г} \quad (3.16)$$

З запропонованими структурними критеріями однозначно пов'язані показники рухливості і жорсткості бетонних сумішей:

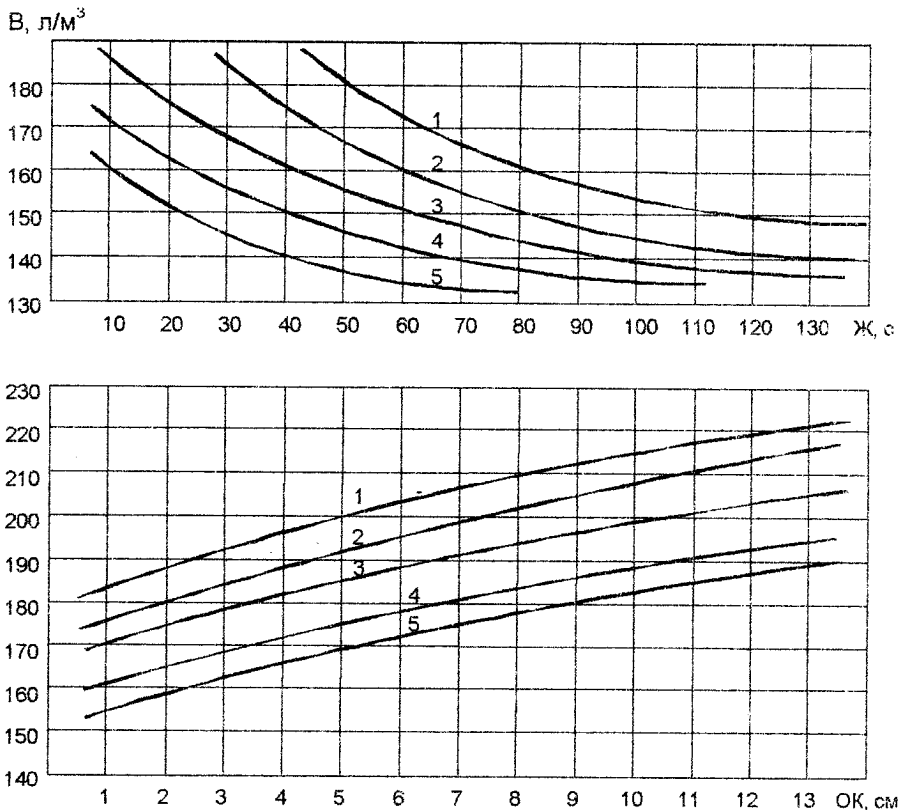
$$OK = \alpha_0 L_{ок} + B_0 ; \quad (3.17)$$

$$Ж = \frac{100a_m}{L_ж} + B_m , \quad (3.18)$$

де  $a_0, B_0, a_m, B_m$ - коефіцієнти рівнянь регресії.

При використанні рядового портландцементу, кварцового піску і гранітного щебеню усереднені значення коефіцієнтів виявилися різними:  $a_0=2,08; B_0=-7,0; a_m=74,0; B_m=-23,0$ .

Запропоновані критеріальні рівняння відбивають характер зміни водопотреби при зміні показників легкоукладальності (рис.3.1).



**Рис. 3.1. Розрахункові залежності впливу показників рухливості і жорсткості бетонної суміші (за технічним віскозиметром) на водопотребу при різній крупності гранітного щебеню [2]:**  
**1 – 5 мм; 2 – 10 мм; 3 – 20 мм; 4 – 40 мм; 5 – 70 мм.**

Інший тип залежностей, які зв'язують показники легкоукладальності і водопотреби, ряд авторів одержали статистичною обробкою як "пасивних" так і "активних" або алгоритмізованих експериментів. Ці залежності, хоча і не претендують на врахування структурних параметрів бетонних сумішей і фізичні обґрунтування, водночас значно зручніші при проектуванні складів.

Найпростіше рівняння зв'язку між показником легкоукладальності бетонних сумішей і їх водопотребою було запропоноване В.І.Сорокером і В.Г.Довжиком [43]:

$$Ж \cdot В^k = C \quad \text{або} \quad \frac{Ж}{Ж_1} = \left( \frac{В_1}{В} \right)^k, \quad (3.19)$$

де Ж і В - жорсткість в с и водовміст у л/м<sup>3</sup> бетонної суміші обумовленого складу; Ж<sub>1</sub> і В<sub>1</sub>- жорсткість і водовміст бетонної суміші будь-якого складу; С- константа, яка залежить від властивостей матеріалів і складу бетону; К - показник ступеня рівний 8,5.

З рівняння (3.19) випливає, що досить однієї експериментальної точки, щоб відкоригувати залежність між водовмістом і жорсткістю бетонної суміші для конкретних матеріалів. Залежність (3.19), однак, не дозволяє на стадії попереднього розрахунку водопотреби прямо врахувати вплив особливостей вихідних матеріалів. Він щораз повинен позначатися на величині константи С.

У роботі [46] наведені рівняння водопотреби бетонних сумішей для рухливих (В<sub>0</sub>) і жорстких (В<sup>1</sup><sub>0</sub>) бетонних сумішей з урахуванням питомої поверхні щебеню (S<sub>щ</sub>, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>), водопотреби піску (В<sub>п</sub>) за методикою Ю.М.Баженова [1] і нормальної густоти цементу (НГ,%)

$$В_0 = 60 + 4 ОК + 0,07S_{щ} + 5В_{п} + 1,5НГ. \quad (3.20)$$

$$В^1_0 = (60 + 0,07S_{щ} + 5В_{п}) \frac{1,38}{\sqrt[3]{Ж}}. \quad (3.21)$$

Питому поверхню в м<sup>2</sup> на 1 м<sup>3</sup> крупного заповнювача, ущільненого протягом хвилини на стандартному вібростолі (S<sub>щ</sub>), обчислюють за формулою:

$$S_{щ} = К \frac{\rho_{н.щ}}{\rho_{щ}} (a_{40} + 2a_{20} + 4a_{10} + 8a_5), \quad (3.22)$$

де  $K$  - коефіцієнт, який характеризує вплив форми зерен щебеню або гравію. При вмісті зерен лещадної форми в щебені менше 15%  $K=1,5$ , менше 30%  $K=1,6$ , більше 30%  $K=1,7$ . Для гравію  $K=1,0 \dots 1,25$ ;  $\rho_{н.ц}$  і  $\rho_{д.ц}$  - відповідно насипна і дійсна густина крупного заповнювача;  $a_{40}$ ,  $a_{20}$ ,  $a_{10}$ ,  $a_5$  - часткові залишки на ситах 40, 20, 10 і 5 мм.

Навряд чи можна вважати виправданим вибір у залежностях (3.20 і 3.21) різних параметрів якості піску і щебеню, які характеризують їх водопотребу. Залежності (3.20 і 3.21) не прогнозують водопотребу бетонних сумішей за межами правила сталості водопотреби.

В.І.Шейним [9] оброблені методом найменших квадратів відомі графічні дані Ю.М.Баженова і Б.Г.Скрамтаєва і отримані рівняння регресії для водопотреби рухливих  $V_{рх}$  і жорстких  $V_{ж}$  бетонних сумішей, виготовлених із застосуванням портландцементу, піску середньої крупності з  $V_{п} = 7\%$  і гравію:

$$V_{рх} = 0,1Ц + 2,5OK + 1,08 \lg D \cdot OK - 0,35 \lg D^2 \cdot OK + \frac{234,02 D - 50,82 \lg D \cdot D}{1,01 D - 0,02} - 40 \quad (3.23)$$

$$V_{ж} = 0,1Ц - 18,78 \lg Ж - 43,16 \lg D - 5,08 \lg Ж \cdot \lg D + 216,13, \quad (3.24)$$

де  $D$  - найбільша крупність заповнювача;  $OK$  і  $Ж$  - осадка конуса в см і жорсткість у секундах (за технічним віскозиметром) бетонних сумішей.

При розрахунку водопотреби за рівняннями (3.23 і 3.24) необхідно також враховувати відповідні поправки [1].

Розбіжності значень водопотреби, обчисленої за рівняннями (3.23 і 3.24) і знайденої за графіками [1], не перевищує 5% (10 л/м<sup>3</sup>). Знаходження витрати води за рівняннями (3.23 і 3.24) передбачає знання витрати цементу, яка до моменту обчислення ще не відома, що вимагає використання послідовних наближень. Рівняння (3.23 і 3.24) також не відбивають правило сталості водопотреби, хоча на відміну від (3.20 і 3.21) тут витрата цементу враховується. Із збільшенням витрати цементу у всьому діапазоні вони прогнозують плавне збільшення водопотреби сумішей на 10 л на кожні 100 кг цементу.

У практиці проектування складів важких бетонів поряд із методикою призначення витрати води Ю.М.Баженова і Б.Г.Скрамтаєва [1] широко використовується методика В.П.Сизова [3], яка відрізняється, в основному, використанням більш розвиненої системи поправок до базової витрати води, яка також знаходиться в залежності від осадки конуса або жорсткості і найбільшої крупності заповнювача. Базові

значення витрати води за рекомендованими графіками в обох методиках при приведенні їх до одного виду і крупності заповнювачів практично збігаються.

Аналіз численних експериментальних даних показує, що водопотреба бетонної суміші ( $V_0$ ) пов'язана з показниками легкоукладальності (осадкою конуса або жорсткістю) і розміром крупного заповнювача квадратичною поліноміальною функцією.

При зміні осадки конуса в межах  $OK=0...20$  см, жорсткості від 4 до 31 с (стандартним способом) і максимальної крупності заповнювача від 5 до 80 мм водопотреба може бути обчислена за рівняннями:

$$V_0 = 179 - 0,8D_{ш} + 6,4OK + 0,0029D_{ш}^2 - 0,14OK^2; \quad (3.25)$$

$$V_0 = 211 - 0,77D_{ш} - 1,12KЖ + 0,0026 D_{ш}^2 + 0,0047K^2 Ж^2, \quad (3.26)$$

де  $D_{ш}$  - найбільша крупність щебеню, мм;  $K$  - коефіцієнт переходу від жорсткості за технічним віскозиметром до жорсткості згідно ГОСТ 10181-76 ( $K \approx 4.5$ ).

Для врахування особливостей вихідних матеріалів, витрати цементу і температури бетонної суміші розрахункові значення  $V_0$  можна коригувати за відомими рекомендаціями [3] (табл.3.1).

У розрахунок водопотреби при наявності відповідного експериментального матеріалу можна ввести й інші поправки, однак прагнення врахувати вплив усіх факторів на водопотребу, як і на інші властивості бетонної суміші і бетону при розрахунку складу, непродуктивне. Остаточна корекція дійсно необхідної витрати води для досягнення заданого показника легкоукладальності повинна виконуватись в процесі виробничої адаптації складів. Задача розрахунку витрати води полягає у врахуванні найбільше значимих факторів, до числа яких можна віднести, безумовно, і ефект впливу пластифікуючих добавок, якщо такі вводяться. У табл.3.2 наведені значення поправочних коефіцієнтів до розрахункового водовмісту бетонних сумішей, отриманих на рядових матеріалах, за нашими експериментальними даними [7].

На відміну від залежностей (3.23, 3.24) рівняння (3.25, 3.26) припускають існування правила сталості водопотреби, однак оскільки вихідні дані [3] пов'язують водопотребу з витратою цементу, а не  $Ц/В$ , розв'язання задачі визначення витрати води і у даному випадку стає неоднозначним і вимагає використання методу послідовних наближень: знаходження спочатку попередньої витрати води, потім витрати цементу, розрахункового коригування витрати води і цементу і т.д.

## Поправки для коригування водопотреби бетонних сумішей [3]

| №   | Фактори, які враховуються   | Поправка $\Delta B$ , л/м <sup>3</sup>  |
|---|---|---|
| <b>I. Порода і вид крупного заповнювача</b> |   |   |
| 1.  | Щебінь із метаморфічних і осадових порід із межею міцності 40...80 МПа                    | $\Delta B_1 = B_0 + (4 \dots 13)$   |
| 2.  | Гірський гравій   | $\Delta B_2 = B_0 - (5 \dots 10)$   |
| 3.  | Морський і річковий гравій  | $\Delta B_3 = B_0 - (9 \dots 15)$   |
| 4.  | Щебінь із порід каменю з гладкою поверхнею зламу (діабаз, базальт і ін.)                  | $\Delta B_4 = B_0 - 3$  |
| 5.  | Промитий щебінь   | $\Delta B_5 = B_0 - 6$  |
| 6.  | Вміст у щебені мулу і пилу в % понад 1% ( $X_1$ ) і часток менше 5 мм ( $X_2$ ) понад 5%  | $\Delta B_{6'} = B_0 + X_1$<br>$\Delta B_{6''} = B_0 + 2X_2$                  |
| <b>II. Крупність і забрудненість піску</b>  |   |   |
| 7.  | Зміна модуля крупності піску на кожні 0,5 менше 3 ( $X_3$ )<br>більше 3 ( $X_4$ )         | $\Delta B_7 = B_0 + (3 \dots 5)X_3$<br>$\Delta B_{7'} = B_0 - (3 \dots 5)X_4$ |
| 8.  | Пісок із гладкою добре окатаною поверхнею   | $\Delta B_8 = B_0 - 4$  |
| 9.  | Пісок промитий  | $\Delta B_9 = B_0 - 7$  |
| 10.   | Збільшення вмісту в піску мулу і пилу на кожний % понад 3% ( $X_5$ )                      | $\Delta B_{10} = B_0 + 2X_5$  |
| 11.   | Зміна нормальної густоти цементного тіста у % більше 28% ( $X_6$ )<br>менше 28% ( $X_7$ ) | $\Delta B_{11} = B_0 + 4X_6$<br>$\Delta B_{11'} = B_0 - 4X_7$                 |
| 12.   | Зміна витрати цементу на кожні 10 кг понад 350 кг/м <sup>3</sup> ( $X_7$ )                | $\Delta B_{12} = B_0 + X_7$   |
| <b>IV. Температура бетонної суміші, °C</b>  |   |   |
|   | 5   | $\Delta B_{13} = B_0 - 5$   |
|   | 10  | $\Delta B_{13} = B_0 - 4$   |
|   | 15  | $\Delta B_{13} = B_0 - 2$   |
|   | 25  | $\Delta B_{13} = B_0 + 3$   |
|   | 30  | $\Delta B_{13} = B_0 + 7$   |
|   | 35  | $\Delta B_{13} = B_0 + 11$  |

Примітки: 1.  $B_0$  - розрахункова витрата води без поправок.

2. Більш докладні вказівки стосовно поправок наведені в роботі [3].

Таблиця 3.2

Поправочні коефіцієнти при використанні пластифікуючих добавок

| Рухливість,<br>см | Жорст-<br>кість, с | Цементно-водне відношення |             |             |             |             |
|-------------------|--------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                   |                    | 1.4                       | 1.8         | 2.2         | 2.6         | 3.0         |
| -                 | 30...50            | <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 в кількості 0,25% від маси цементу, у знаменнику - С-3 в кількості 0,7% від маси цементу.

Одна з перших формул для прогнозування водопотреби бетонної суміші при  $\frac{Ц}{В} > (\frac{Ц}{В})_{кр}$  була запропонована Л.І.Левіним [114]:

$$B = B_0 \frac{1 - 1,68AK_{н.г} \frac{Ц}{В}}{1 - A}, \quad (3.27)$$

де  $B_0$  - водопотреба суміші при  $\frac{Ц}{В} < (\frac{Ц}{В})_{кр}$  ;

$$A = 1 - A_1 Ж^{0,11} \left( 1 + \frac{0,19}{K_{н.г}} \right). \quad (3.28)$$

Тут  $A_1$  - константа, яка характеризує властивості заповнювачів.

Нами разом із В.А.Шушпановим [2] для визначення зміни водопотреби бетонних сумішей за межами правила сталості водопотреби запропоновано збільшення водопотреби  $\Delta B$  знаходити за емпіричною формулою:

$$\Delta B = \left( \frac{Ц}{В} - \frac{1}{1,68K_{н.г}} \right) \left( \frac{B_0}{100} \right)^{5,5}. \quad (3.29)$$

У табл.3.3 наведені значення водовмісту бетонної суміші при  $\frac{Ц}{В} \leq (\frac{Ц}{В})_{кр}$  і різних показниках осадки конуса і жорсткості бетонної суміші, а також значення  $\Delta B$ , обчислені за формулою (3.29) і знайдені за методикою В.П.Сизова [3] відповідно в залежності від  $\frac{Ц}{В}$  і витрати цементу. Водовміст бетонних сумішей знаходили за умови використання портландцементу ( $K_{н.г} = 0,27$ ), кварцевого піску ( $M_k = 3$ ) і гранітного щебеню ( $D=20$  мм).



Розрахункові значення  $V_0$  і  $\Delta B$ 

| ОК,<br>см | Ж,<br>с | $V_0$ при<br>$(C/B)_{кр} \leq$<br>2,20 | $\Delta B$ за (3.29) |               | $C=V_0$ $C/B$ |               | $\Delta B^*$ за [3] |               |
|-----------|---------|--|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|
|           |         |  | $C/B=$<br>2,5        | $C/B=$<br>3,0 | $C/B=$<br>2,5 | $C/B=$<br>3,0 | $C/B=$<br>2,5       | $C/B=$<br>3,0 |
| 5         | -       | 190                                    | 10,2                 | 27,3          | 475           | 570           | 12,5                | 22,0          |
| 10        | -       | 207                                    | 16,4                 | -             | 517           | -             | 16,7                | -             |
| 15        | -       | 220                                    | 22,9                 | -             | 550           | -             | 20,0                | -             |
|           | 7       | 167                                    | 5,0                  | 13,4          | 417           | 501           | 6,7                 | 15,1          |
|           | 17      | 155                                    | 1,6                  | 4,2           | 337           | 405           | 0                   | 5,5           |

Примітка: 1. Жорсткість наведена за ГОСТ 10181-76.

2.  $\Delta B^*$  наведене після першого коригування витрати цементу

Застосування рівнянь (3.25,3.26) разом із формулою (3.29) дозволяє більш обгрунтовано оцінити водопотребу бетонних сумішей у всьому діапазоні можливих складів і однозначно після розрахунку  $C/B$  знаходити необхідну витрату води.

Розрахунок водопотреби бетонних сумішей може бути виконаний і за допомогою рівнянь регресії, отриманих для конкретних умов, наприклад, із застосуванням математичного планування експерименту. У табл.3.4 наведені деякі з таких рівнянь, отриманих нами зі співавторами при рішенні ряду задач [7].

Для оперативних практичних розрахунків можуть бути використані номограми, отримані на основі рівнянь регресії. На рис. 3.2 наведена така номограма для визначення водопотреби литої шлаковміщуючої бетонної суміші.

### 3.2. Зерновий склад і співвідношення заповнювачів

Перші роботи з проектування зернового складу заповнювачів бетонів були спрямовані на забезпечення мінімальної пористості сумішей зерен різної крупності [115]. Сформувався два підходи в цьому напрямку: вибір фракційного (преривчастого) або безперервного складу суміші заповнювачів.

Прибічники преривчастої гранулометрії суміші заповнювачів виходять із геометричних закономірностей укладки зернистих матеріалів. Так, відомо [36], що при кубічній укладці дрібних і крупних куль із діаметром відповідно  $d$  і  $D$ :

Таблиця 3.4

Рівняння регресії для розрахунку водопотреби бетонних сумішей [7]

| Вид бетону і вихідні матеріали  | Вихідний параметр                 | Рівняння регресії  | Фактори  |
|---|-----------------------------------|--|--|
| Важкий із використанням портландцементу, кварцевого піску і гранітного щебеню | Водопотреба (В), л/м <sup>3</sup> | $Y_{16} = 186,0 + 28,9X_1 + 10,3X_2 + 21,5X_3 + 14,1X_4 + 9,1X_5 - 2,7X_1^2 + 6,8X_2^2 + 11,3X_3^2 + 7,8X_4^2 + 5,3X_5^2 + 1,6X_1X_4 + 2,1X_1X_5 + 2,1X_3X_4 - 2,4X_3X_5 \quad (3.30)$ | $X_1 = (Y - 1) / 1$ $X_2 = (\text{Ц/В} - 2,1) / 0,8$ $X_3 = (B_{\text{щ}} - 4) / 3$ $X_4 = (B_{\text{п}} - 9) / 5$ $X_5 = (\text{НГ} - 27,2) / 2,6$  |
| Бетон важкий гідротехнічний із добавкою СНП                                   | Водопотреба (В), л/м <sup>3</sup> | $Y_{17} = 169,2 + 26,4X_1 + 13,4X_2 - 20X_3 - 8,3X_9 + 9,3X_5 - 5,2X_1^2 + 5,8X_2^2 + 8,8X_3^2 + 2,8X_9^2 + 3,8X_5^2 + 2,6X_1X_5 + 3,1X_2X_9 + 2,25X_2X_5 \quad (3.31)$                | $X_1 = (Y - 1) / 1$ $X_2 = (\text{Ц/В} - 2,1) / 0,8$ $X_3 = (D_{\text{щ}} - 40) / 30$ $X_5 = (\text{НГ} - 27,2) / 2,6$ $X_9 = (\text{СНП} - 0,06) / 0,06$  |
| Бетон литий із добавкою паливного шлаку                                       | Водопотреба (В), л/м <sup>3</sup> | $Y_{18} = 208,6 - 7,7X_1 - 3,4X_2 - 5,5X_3 + 8,4X_4 + 2,5X_5 + 10,0X_6 + 17,0X_1^2 + 26,5X_2^2 + 1,5X_3^2 + 12,1X_1X_2 + 5,6X_1X_3 - 5,1X_1X_5 + 8,5X_2X_4 - 10,0X_2X_5 \quad (3.32)$  | $X_1 = (r_{\text{щ}} - 0,33) / 0,33$ $X_2 = (r_{\text{шл}} - 0,5) / 0,5$ $X_3 = (B_{\text{щ}} - 2,5) / 1,0$ $X_4 = (B_{\text{шл}} - 9,0) / 2,0$ $X_5 = (B_{\text{п}} - 10,0) / 5,0$ $X_6 = (\text{Ц/В} - 1,9) / 0,6$ |

Примітки: 1. Y - умовний показник легкоукладальності бетонної суміші, який знаходиться за шкалою:

|                  |   |     |   |                   |     |   |
|------------------|---|-----|---|-------------------|-----|---|
| Умовний показник | 0 | 0,6 | 1 | 1,4               | 1,8 | 2 |
|                  |   |     |   | осадка конуса, см |     |   |

Жорсткість, с                      40 с    2 см    5 см    8 см    11 см    13 см

2.  $B_{\text{щ}}$ ,  $B_{\text{п}}$ ,  $B_{\text{шл}}$  - відповідно водопотреба щебеню, піску і шлаку, визначені за методикою Ю.М.Баженова.

3.  $r_{\text{щ}}$  і  $r_{\text{шл}}$  - об'ємні частки щебеню і шлаку в суміші заповнювачів.

4. НГ - нормальна густина цементу в %.

5.  $D_{\text{max}}$  - максимальна крупність щебеню, мм.

6. СНП - вміст повітряновтягувальної добавки СНП, кг/м<sup>3</sup>.

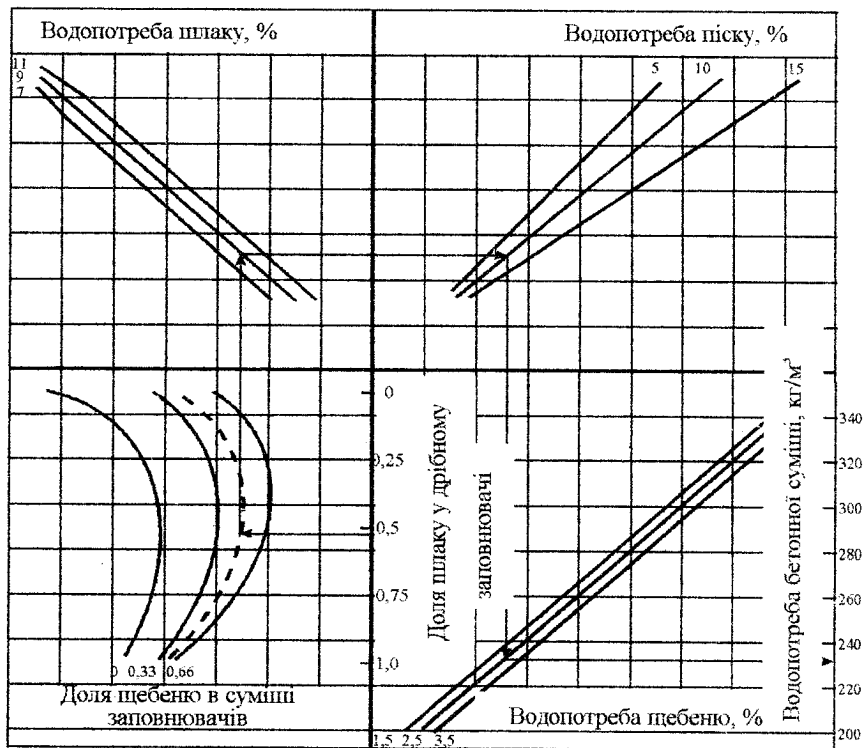


Рис. 3.2 Номограма визначення водопотреби литої шлаковміщуючої бетонної суміші

$$d = D\sqrt{2} - D = 0,41D . \quad (3.33)$$

При тетраедричній укладці

$$d = \frac{2}{3}D\sqrt{3} - D = 0,155D . \quad (3.34)$$

Кубічна упаковка куль має пористість 47,6, тетраедрична - 26%.

Є різні рекомендації щодо вибору оптимальних співвідношень діаметрів менших фракцій, які заповнюють, до діаметра більшої фракції (яка заповнюється): за одними даними [36], наприклад, воно дорівнює 1/16, за іншими [116] коливається від 1/14 до 1/28. У роботі [117] доводиться, що оптимальне співвідношення розмірів зерен суміжних фракцій при компонуванні багатofракційного заповнювача прагне до 0.226.

А.І.Кудяковим [117] запропонована формула, за якою можна визначити необхідну кількість n-ної фракції багатofракційного запов-

нювача:

$$P_n = \rho(1 - \varphi'_1)(1 - \varphi'_2) \dots (1 - \varphi'_{n-1})\varphi''_n, \quad (3.35)$$

де  $\rho$  - густина матеріалу;  $\varphi'_1, \varphi'_2, \varphi'_n$  - коефіцієнти заповнення, вони показують зміну об'єму пустот крупної фракції при послідовному заповненні їх більш дрібними зернами. На практиці значення  $\varphi'_2 \dots \varphi'_n$  можна приймати рівним 0.2.

Тоді:

$$P_n = \rho(1 - \varphi'_1)(0,8^{n-2})\varphi''_n, \quad (3.36)$$

де  $n$  - число фракцій;  $\varphi''_n$  - коефіцієнт заповнення, який показує необхідну кількість останньої фракції.

Для граніту, базальту, вапняку  $\varphi''_n = 0,307 \dots 0,351$ .

Хоча переривчастий зерновий склад і забезпечує меншу пустотність суміші зерен, стосовно до бетонних сумішей більшість дослідників віддає перевагу безперервному зерновому складу заповнювачів. Це пояснюється необхідністю при однаковій рухливості сумішей в останньому випадку меншого об'єму дрібних фракцій і відповідно витрати цементу на обмазку зерен. Крім того, суміші з безперервним зерновим складом менше схильні до розшарування.

Для вибору безперервного зернового складу заповнювачів запропоновані різні "ідеальні" криві просіювання, з яких найбільшу популярність одержали криві Фуллера, Боломей і Гуммеля [118, 119, 120], які виражаються досить близькими формулами:

Формула Автор

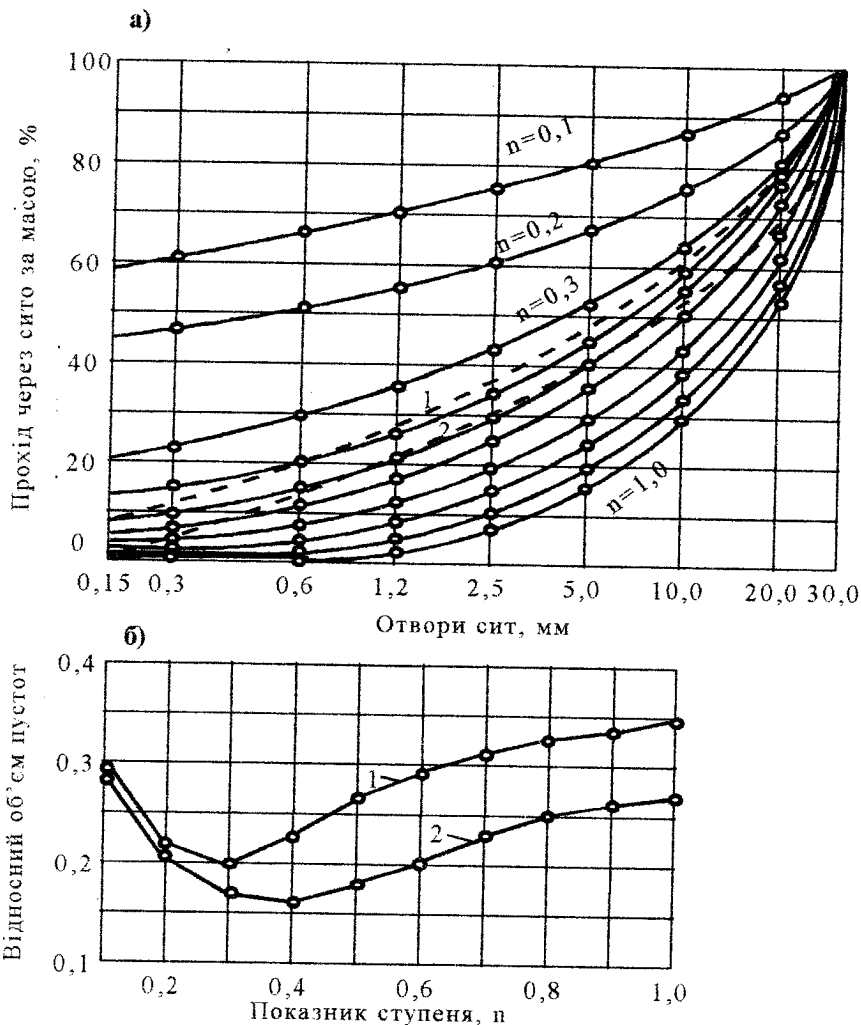
$$Y = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (3.37) \quad \text{Фуллер [118]}$$

$$Y = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (3.38) \quad \text{Боломей [119]}$$

$$Y = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^n \quad (3.39) \quad \text{Гуммель [120]}$$

У формулах (3.37-3.39)  $d$  розмір зерен даної фракції;  $D$  - гранична крупність заповнювача;  $A$  - коефіцієнт, рівний 8 для гравію і піску для жорстких і 10 для пластичних бетонних сумішей. При використанні щебеню і піску - 10 для жорстких і 12 для пластичних бетонних сумішей;  $n$  - показник ступеня рівний у сумішах на щебені 0,2...0,4, на

гравію 0,3...0,5 (за Гуммелем показник ступеня  $n$  може коливатися від 0,1 до 1 (рис.3.3).



**Рис. 3.3** Зміна пористості крупних заповнювачів в залежності від кривих просіювання [36]:

а – криві просіювання сумішей заповнювачів за формулою  $y=(d/D)^n$  при  $n=0.1...1$ ; б – пористість сумішей заповнювачів, складених за кривими просіювання на основі даних Гуммеля:

- 1 – оптимальна крива просіювання сумішей заповнювачів на щебені;
- 2 – те ж на гравію;

Оскільки криві просіювання складені для сумішей заповнювача і цементу, при розрахунках зернового складу самих заповнювачів можна використовувати формулу:

$$Y_3 = (Y - C) \frac{100}{100 - C}, \quad (3.40)$$

де  $C$  - витрата цементу у відсотках від суміші його з заповнювачем.

Методика побудови кривих щільних сумішей, яка використовується при доборі складу заповнювачів асфальтових бетонів, запропонована Н.Н.Івановим [121].

Ним прийняте ідеальне співвідношення об'єму кожної наступної фракції до об'єму попередньої, максимальна крупність якої більша в 2 рази (т.зв. коефіцієнт збігу), яке дорівнює  $K=0,81$ . При розрахунку за формулою Фуллера таке відношення (за умови рівності густин кожної фракції) дорівнює  $K=0,707$ , за формулою Гуммеля при  $n=0,3$   $K=0,812$ . Досить щільні суміші за Н.Н.Івановим можна одержати при значенні коефіцієнта збігу в межах 0,65...0,9 (рис.3.4).

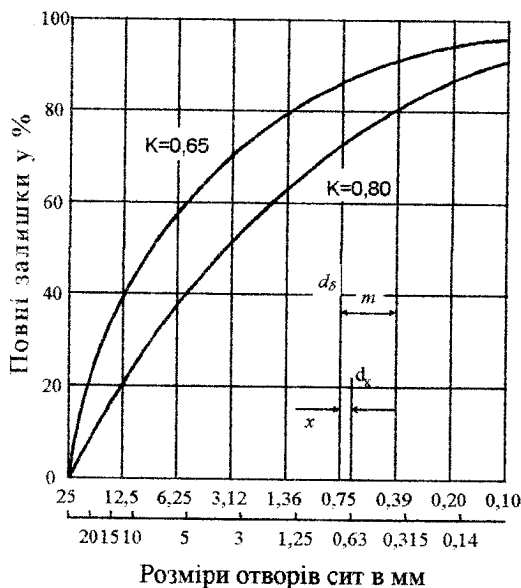


Рис. 3.4 Криві щільних мінеральних сумішей при різних значеннях коефіцієнта збігу (K).

Якщо прийняти вміст у % першої фракції рівним  $a$ , то вміст другої буде  $a_1 k$ , третьої  $a_2 k$  і т.д. Кількість останньої фракції повинна дорівнювати  $a_{n-1} k$ .

Сума об'ємів усіх фракцій може бути записана в наступному вигляді:

$$a(1 + k + k^2 + \dots + k^{n-1}) = 100\% \quad (3.41)$$

Отже, вміст першої фракції (тобто частковий залишок на відповідному ситі):

$$a_1 = \frac{1 - k}{1 - k^n} \cdot 100. \quad (3.42)$$

Для цементних бетонів використання кривих щільних сумішей заповнювачів раціональне лише в деяких випадках, наприклад, для пресованих або вібропресованих бетонів, які виготовляються із сипучих сумішей.

Для звичайних пластичних бетонних сумішей істотний вплив на оптимальне співвідношення фракцій заповнювача роблять товщина і консистенція цементного тіста, які змінюються в залежності від заданих значень властивостей бетонної суміші і бетону. З позицій мінімізації витрати цементу важливо, щоб при цьому склад заповнювача забезпечував мінімально можливу пустотність при найменшій сумарній поверхні.

Необхідний об'єм цементного тіста при одержанні щільного бетону:

$$V_{ц.т} = P_a V_3 + \delta U_3 V_3 + V_{пов.}, \quad (3.43)$$

де  $P_a$  і  $U_3$  - пустотність і питома поверхня заповнювача;  $V_3$  - об'єм заповнювача;  $V_{пов.}$  - об'єм повітря;  $\delta$  - товщина шару цементного тіста.

На величину питомої поверхні заповнювача впливає максимально допустима крупність заповнювача, встановлювана в залежності від проектних вимог до конструкції й умов бетонування. Пустотність і питома поверхня заповнювача залежать від зернового складу дрібного і крупного заповнювача і їх співвідношення в бетонній суміші. Зерновий склад піску і щебеню (гравію) регламентується нормативними документами в певній припустимій області.

Коригування параметрів заповнювачів шляхом змішування, наприклад, двох пісків може виконуватися за допомогою формули:

$$n = \frac{P_1 - P}{P_1 - P_2}, \quad (3.44)$$

де  $P$  - необхідне значення, параметра, який коригується (модуля крупності, питомої поверхні, вмісту зерен певної фракції);  $P_1$  і  $P_2$  - значення параметра, який коригується в заповнювачі, відповідно з більшим і меншим його значенням;  $n$  - об'ємна частка заповнювача з меншим значенням  $P$  в сумі об'ємів заповнювачів, які змішуються. При кори-

губанні вмісту певної фракції в піску або щебені необхідно зробити перевірочний розрахунок на вміст інших із наявних фракцій, який повинен знаходитись у встановлених стандартом межах, і при необхідності уточнити значення  $n$ .

Для розрахунку співвідношення дрібного ( $\Pi$ ) і крупного ( $\Щ$ ) заповнювачів у бетоні використовують кілька параметрів. Одним із них є об'ємне співвідношення заповнювачів  $\gamma$ :

$$\gamma^1 = V_{\Pi} : V_{\Щ} = \frac{\Pi \rho_{\Щ}}{\Щ \rho_{\Pi}}, \quad (3.45)$$

де  $V_{\Pi}$  і  $V_{\Щ}$  - абсолютні об'єми;  $\rho_{\Pi}$  і  $\rho_{\Щ}$  - густини дрібного і крупного заповнювачів.

При застосуванні в якості заповнювачів кварцевого піску і щебеню або гравію зі щільних порід, з огляду на те, що  $\rho_{\Pi} \approx \rho_{\Щ}$ , можна з достатньої для практики точністю приймати  $\gamma^1 = \Pi / \Щ$ .

Більш часто використовується параметр  $\gamma$  - об'ємна частка дрібного заповнювача в суміші дрібного і крупного заповнювачів.

$$\gamma = \frac{\Pi / \rho_{\Pi}}{\Pi / \rho_{\Pi} + \Щ / \rho_{\Щ}}. \quad (3.46)$$

Параметри  $\gamma'$  і  $\gamma$  зв'язані співвідношенням

$$\gamma = \frac{\gamma'}{1 - \gamma'} \quad \text{або} \quad \gamma' = \frac{\gamma}{1 + \gamma}. \quad (3.47)$$

Знаючи необхідні об'єми цементного тіста, втягнутого повітря і дисперсних наповнювачів, можна легко визначити абсолютний об'єм суміші заповнювачів ( $V_3$ ), а потім необхідні об'єми піску і щебеню:

$$V_{\Pi} = V_3 \cdot \gamma; \quad (3.48)$$

$$V_{\Щ} = V_3 - V_{\Pi}; \quad (3.49)$$

або

$$V_{\Щ} = \frac{V_3}{1 + \gamma'}; \quad (3.50)$$

$$V_{\Pi} = V_3 - V_{\Щ}. \quad (3.51)$$

У розрахунково-експериментальних методах проектування складів бетону [1,3], які широко застосовуються у країнах СНД, передбачається для визначення витрат піску і щебеню використання коефіцієнта заповнення пустот і розсуву зерен щебеню (гравію) цементно-



піщаним розчином -  $\alpha$ . Цей коефіцієнт справедливий при допущенні, що бетонну суміш можна представити як двофазну систему, яка складається з крупного заповнювача в стандартному насипному стані і цементно-піщаного розчину. У цьому випадку формулюється умова:

$$\frac{В}{\rho_v} + \frac{П}{\rho_n} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} = \alpha P_{щ} \frac{Щ}{\rho_{н.щ}}, \quad (3.52)$$

де  $P_{щ}$  - пустотність крупного заповнювача,  $\rho_{н.щ}$  - його насипна густина;  $\rho_v$ ,  $\rho_n$ ,  $\rho_{щ}$  - густини відповідно води, цементу і піску.

Наведене вище допущення є умовним. Бетонну суміш виготовляють звичайно в одну стадію і насправді цементне тісто, а не розчин проникає в порожнечі суміші заповнювачів і змащує їх тонким шаром. Як показано Ю.Я.Штаерманом і Д.Н.Тевзадзе [10], реальна порожнечість заповнювачів у бетонній суміші відрізняється від порожнечості в пухконасипному стані. Більш повний критичний аналіз даного підходу наведений у роботі [45]. Однак, як показав багаторічний досвід, використання емпіричних значень  $\alpha$  у рівнянні (3.52) разом з рівнянням суми абсолютних об'ємів дає прийнятні для практики результати.

Використання фізично більш обґрунтованого коефіцієнта розсуву зерен заповнювача цементним тістом  $\beta$  пов'язане з певними труднощами. Дійсно, у цьому випадку рівняння (3.52) необхідно замінити рівнянням:

$$\frac{В}{\rho_v} + \frac{Ц}{\rho_c} = \beta P_3 \frac{П + Щ}{\rho_{н.з}}, \quad (3.53)$$

де  $P_3$  - порожнечість суміші заповнювачів,  $\rho_{н.з}$  - насипна густина суміші заповнювачів.

У рівняннях (3.52 і 3.53) для простоти виключений об'єм повітря, наявний у бетонній суміші.

На стадії проектування складу бетонної суміші, однак,  $P_3$  і  $\rho_{н.з}$ , як правило, невідомі.

Неприйнятним є і використання коефіцієнта розсуву зерен і заповнення порожнечі не розчином, а піском (К) [3]. Він не враховує витрату цементного тіста і легкоукладальність бетонних сумішей.

Замість коефіцієнта  $\alpha$  у роботі [46] запропоновано використовувати оптимальну товщину розчинної плівки, з огляду на те, що остання пов'язана з  $\alpha$  залежністю:

$$\alpha = 1 + \frac{\delta_p U_{\text{щ}}}{P_{\text{щ}}}, \quad (3.54)$$

де  $\delta_p$  - товщина розчинної плівки;  $U_{\text{щ}}$  і  $P_{\text{щ}}$  - питома поверхня і пористість щебеню в ущільненому стані.

Оптимальна товщина розчинної плівки знаходиться за емпіричними залежностями. Так, при застосуванні гранітного щебеню фракції 5...40 мм рекомендується [46] формула:

$$\delta_p = -0,0006(2,3 + 0,06OK) \sqrt{d_{\text{п}}}, \quad (3.55)$$

де  $d_{\text{п}}$  - середня крупність піску.

Заміна  $\alpha$  на  $\delta_p$  істотно ускладнює розрахункові залежності, вводячи в них ряд нових параметрів, при цьому не уточнюючи оптимальне співвідношення дрібного і крупного заповнювачів.

Параметри  $r$  і  $\alpha$  взаємозалежні:

$$\alpha = \frac{(V_{\text{п.т}} + rV_3)}{(1-r)P_3 V_3}, \quad (3.56)$$

де  $V_{\text{п.т}}$  - об'єм цементного тіста. Співвідношення дрібного і крупного заповнювачів за масою  $r' = \Pi / \text{Щ}$  при відомому значенні  $\alpha$  можна знайти з виразу:

$$r' = \frac{\alpha \rho_{\text{щ}} (1 - V_{\text{ц.т}}) - (1 - P_{\text{щ}}) V_{\text{ц.т}}}{1 - P_{\text{щ}}} \cdot \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{щ}}}, \quad (3.57)$$

де  $\rho_{\text{п}}$  і  $\rho_{\text{щ}}$  - густина піску і щебеню (гравію).

Задача вибору оптимального співвідношення заповнювачів у бетонній суміші пройшла певну еволюцію. Спочатку вона зводилася до експериментального визначення найбільш щільної суміші піску і щебеню [115]. Однак потім багатьма дослідниками було доведено, що зі зміною  $r$  при постійному об'ємі цементного тіста можна досягати найбільшої рухливості або при постійній рухливості найбільшої міцності бетону і при цьому  $\Gamma_{\text{опт}}$ , як правило, не збігається з  $\Gamma_{\text{м}}$ , яке забезпечує мінімальну пористість заповнювачів. Макміллан запропонував [110] визначати  $\Gamma_{\text{опт}}$  експериментальним шляхом, зазначаючи склади з  $g$  більшими і меншими, ніж  $\Gamma_{\text{м}}$ , домагаючись бажаної консистенції і мінімальної витрати цементу.

В.М.Шмигальським [4] було встановлено "правило сталості консистенції", відповідно до якого при заданих В/Ц і якості компонентів

консистенція, тобто рухливість або жорсткість суміші, зі зміною величини  $\gamma$  практично не змінюється, якщо умовна товщина оболонки цементного тіста на зернах заповнювача  $\delta$  зберігається постійною. Базуючись на даному правилі він отримав розрахункову залежність

$$\gamma_{\text{опт}} = (1 - \delta U_m) \gamma_m, \quad (3.58)$$

де  $U_m$  - поверхня суміші заповнювачів при їх мінімальній пустотності.

Очевидно при  $\delta \rightarrow 0$   $\gamma_{\text{опт}} \rightarrow \gamma_m$ , у всіх інших випадках  $\gamma_{\text{опт}} \neq \gamma_m$ .

Застосування формули (3.59), однак, вимагає попереднього експериментального визначення  $\gamma_m$  і  $U_m$ .

З правилом "сталості консистенції" погоджується встановлене В.П.Сизовим [3] "правило сталості коефіцієнта  $\alpha$ ", необхідного для надання бетонній суміші певної рухливості на заповнювачах певного зернового складу. Однак "правило сталості коефіцієнта  $\alpha$ ", так само як і "правило сталості водопотреби", зберігається лише до деякого критичного Ц/В (за В.П.Сизовим критичної витрати цементу рівної  $350 \text{ кг/м}^3$ ). При Ц/В > Ц/В<sub>кр</sub> і, відповідно, Ц > Ц<sub>кр</sub>  $\alpha$  зростає.

Ю.М.Баженовим зроблена спроба [1] теоретичного визначення оптимального співвідношення дрібного і крупного заповнювачів ( $\gamma = \Pi / \Psi$ ) на основі критерію рухливості бетонної суміші  $N$ . Як вказувалось раніше,  $N = \delta / U_3$  або

$$N = \frac{V_{\text{цт}} - V_3}{U_3^2}. \quad (3.59)$$

Визначалися такі значення  $\gamma$ , які відповідали максимальному значенню  $N$  або найбільшій рухливості бетонної суміші. Результати теоретичного і дослідного визначення  $\gamma_{\text{опт}}$  у залежності від об'єму цементного тіста виявилися досить близькі (рис.3.5). Водночас відзначається, що при високих значеннях  $V_{\text{цт}}$  фактичні оптимальні значення  $\gamma$  вищі розрахункових.

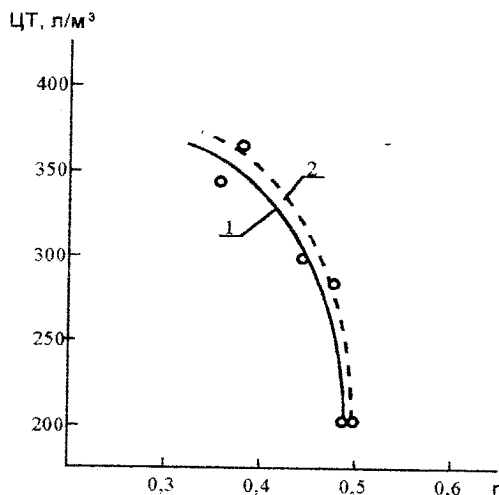


Рис. 3.5 Залежність оптимального співвідношення між піском і щебенем від витрати цементного тіста [1]:

1 - дослідна крива; 2 - розрахункова крива.

Розрахункові значення оптимальної доли піску в суміші заповнювачів  $\Gamma_{\text{опт}}$  нами отримані з умови  $dL_{\text{ж}}/d\Gamma = 0$  [2], де  $L_{\text{ж}}$  - критерій легкоукладальності бетонної суміші (див. 3.13, 3.15, 3.16).

Критерій  $L_{\text{ж}}$  дорівнює собою відношенню товщини шару цементного тіста  $\delta$  на зернах заповнювача до критерію його структурної в'язкості  $\eta_m$  [122], який залежить від показника консистенції цементного тіста  $S$  - функції  $V/\Omega$  і нормальної густоти (рис.3.6). Вираз для оптимального  $\Gamma$  ( $\Gamma_{\text{опт}} = dL_{\text{ж}}/d\Gamma$ ) добре відбиває правило сталості консистенції [4]. Дійсно, при постійних значеннях  $\delta$ ,  $V/\Omega$  і якості компонентів бетонної суміші значення  $\Gamma_{\text{опт}}$  повинне залишатись незмінним.

При розрахунку критерію  $L_{\text{ж}}$  питому поверхню  $U_3$  і пустотність  $P_a$  суміші заповнювачів знаходили за формулами:

$$U_3 = U_{\text{п}} + (U_{\text{п}} - U_{\text{щ}})\Gamma; \quad (3.60)$$

$$P_a = \mu (P_{a,\text{щ}} - P_{a,\text{п}}\Gamma - \Gamma), \quad (3.61)$$

де  $U_{\text{п}}$  і  $U_{\text{щ}}$  - питома поверхня піску і щебеню;  $P_{a,\text{п}}$  і  $P_a$  - пустотність щебеню і суміші заповнювачів за абсолютним об'ємом;  $\mu$  - коефіцієнт зменшення пустотності заповнювачів у бетонній суміші [10] ( $\mu=0,7\dots0,9$ ).

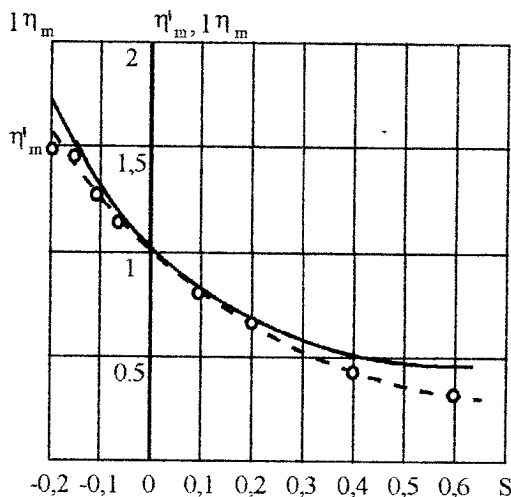


Рис. 3.6 Зміна структурної в'язкості цементного тіста  $\eta_r$  і критерію  $\eta_r$  від показника консистенції [2].

зменшення пустотності заповнювачів у бетонній суміші [10] ( $\mu=0,7\dots0,9$ ).

Пустотність заповнювачів за абсолютним об'ємом  $P_a$  пов'язана з їх пустотністю  $P$  залежністю [1]:

$$P_a = \frac{P}{1-P} = \frac{\rho_3}{\rho_{н.з}} - 1, \quad (3.62)$$

де  $\rho_3$  і  $\rho_{н.з}$  - відповідно дійсна і середня густина.

Розкривши у формулі 3.13 значення  $U_3$  і  $P_a$ , після диференціювання можна знайти вираз для  $\Gamma_{\text{опт}}$ :

$$\gamma_{\text{опт}} = \frac{1}{\eta_m} \left[ \frac{U_{\text{ш}}}{U_n - U_{\text{щ}}} + \frac{P_{\text{а.ш}}}{P_{\text{а.щ}} + 1} - \frac{V_{\text{ц.г}}}{\mu(P_{\text{а.ш}} + 1)} \right]. \quad (3.63)$$

Крім об'єму цементного тіста, який включає втягнуте повітря, питомої поверхні піску і щебеню, пустотності щебеню формула (3.63) через параметр  $\eta_m$  дозволяє врахувати вплив водоцементного відношення.

У табл.3.5 наведені розрахункові оптимальні значення  $\gamma$ , що у цілому погоджуються з експериментальними [3]. Застосування їх при проектуванні базових складів бетонних сумішей можливе при відомих значеннях питомої поверхні і пустотності заповнювачів.

Таблиця 3.5

Розрахункові оптимальні значення  $\gamma$

| Витрата цементного тіста, л/м <sup>3</sup> | Водоцементне відношення |      |      |      |      |
|--|-------------------------|------|------|------|------|
|  | 0,35                    | 0,4  | 0,45 | 0,6  | 0,7  |
| 250  | -                       | 0,32 | 0,35 | 0,40 | 0,44 |
| 300  | 0,28                    | 0,29 | 0,33 | 0,37 | 0,40 |
| 350  | 0,26                    | 0,27 | 0,30 | 0,32 | 0,36 |
| 400  | 0,25                    | 0,26 | 0,28 | -    | -    |

Примітки. 1. Із збільшенням (зменшенням)  $U_n$  на  $10^3 \text{ м}^{-1}$  значення  $\gamma_{\text{опт}}$  знижується (зростає) на 0,004. Із збільшенням (зменшенням)  $P_{\text{щ}}$  на 1%  $\gamma_{\text{опт}}$  знижується на 0,02. Зменшення  $\gamma_{\text{опт}}$  на кожний відсоток втягнутого повітря складає 0,025.

2. Значення  $\gamma_{\text{опт}}$  наведені для заповнювачів із відносною пустотністю в пухконасипному стані  $P_{\text{ц}}=0,42$ ;  $P_{\text{щ}}=0,48$ ; із питомою поверхнею  $U_n=10 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ ;  $U_{\text{щ}}=0,43 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ . Коефіцієнт  $\mu=0,8$ ;  $K_{\text{н.г}}=0,27$ .

Для визначення розрахункової питомої поверхні дрібного і крупного заповнювачів можна використовувати спеціальні таблиці [123] або емпіричні формули [1]. Наприклад, для кварцевого піску і гранітного щебеню питому поверхню можна розрахувати за формулами [1]:

$$U_n = \frac{0,025}{\rho_n} (a_1 + 2a_2 + 4a_3 + 7,4a_4 + 15a_5 + 110a_6); \quad (3.64)$$

$$U_{\text{щ}} = \frac{0,0036}{\rho_{\text{щ}}} (0,55V_1 + V_2 + 2V_3 + 3,9V_4), \quad (3.65)$$

де  $a_1 \dots a_6$ - відсотковий вміст кожної фракції піску при стандартному розсіві, починаючи з більшої (5-2,5 мм);  $V_1 \dots V_4$ - відсотковий вміст

фракцій 60-40, 40-20, 20-10 і 10-5 мм.

В.П.Сизовим за експериментальними даними побудовані [3] номограми для визначення долі піску в суміші заповнювачів у % в залежності від витрати цементу ( $\Pi$ , кг/м<sup>3</sup>) або цементного тіста ( $V_{ц.т}$ , л/м<sup>3</sup>), крупності щебеню ( $D_{щ}$ ) і модуля крупності піску ( $M_k$ ). Статистична обробка даних, розрахованих за цими номограмами дозволяє одержати залежності:

$$\gamma = 41,176 + 0,98M_k - 0,029\Pi - 0,025D_{щ} ; \quad (3.66)$$

$$\gamma_1 = 54,771 + 0,494M_k - 0,076V_{ц.т} - 0,045D_{щ}. \quad (3.67)$$

При рухливості бетонних сумішей більшій 2 см або жорсткості при вимірюванні стандартним приладом більшій 5 с (при вимірюванні жорсткості спрощеним способом її значення збільшується в 3 рази, технічним віскозиметром у 4,5 рази) до розрахункових значень  $\gamma$  і  $\gamma_1$ , додається  $\Delta\gamma_{ок}$  ( $\Delta\gamma_{1ок}$ ) або віднімається  $\Delta\gamma_{ж}$  ( $\Delta\gamma_{1ж}$ ):

$$\Delta\gamma_{ок} = 1,863\ln(OK-2) - 0,327; \quad (3.68)$$

$$\Delta\gamma_{1ок} = 3,914\ln(OK-2) - 0,388; \quad (3.69)$$

$$\Delta\gamma_{ж} = 1,910\ln(Ж-5) - 0,0846; \quad (3.70)$$

$$\Delta\gamma_{1ж} = 3,972\ln(Ж-5) - 0,341. \quad (3.71)$$

При використанні розрахунково-експериментального методу проектування складів поширене використання емпіричних рекомендацій про оптимальні значення коефіцієнта  $\alpha$ , наведені у таблицях і на графіках [1,3].

В.И.Шейним формалізовані ці рекомендації [9] у вигляді аналітичних залежностей:

$$\alpha = 0,659 + 0,0014\Pi + 0,437V / \Pi + (7 - V_n) \cdot 0,03 - 0,1; \quad (3.72)$$

$$\alpha = 2,516 - 0,932P_n - 1,947P_{щ} - 0,045, \quad (3.73)$$

де  $V_n$  - водопотреба піску, %;  $P_n$  і  $P_{щ}$  - пустотність піску і щебеню; 0,045- поправка на використання гравію.

При використанні залежності (3.73), отриманої за даними В.П.Сизова для бетонних сумішей з  $OK=2$  см, вводяться поправки:

- при  $OK > 2$  см

$$\Delta\alpha_1 = (OK - 2) / 1,378OK + 22,952 ; \quad (3.74)$$

- для жорстких сумішей ( $Ж > 5$  с)

$$\Delta\alpha_2 = - \frac{4.4Ж - 15}{7.63Ж + 120,81}. \quad (3.75)$$

Для розрахунку поправки  $\Delta\alpha_2$  значення жорсткості наводиться при вимірюванні стандартним способом.

При витраті цементу  $\rho > 350 \text{ кг/м}^3$  враховують поправку  $\Delta\alpha_3$ :

$$\Delta\alpha_3 = -0,168 + 0,00048\rho. \quad (3.76)$$

Наведені вище залежності для  $\gamma$  і  $\alpha$  отримані з умови досягнення найкращої легкоукладальності бетонної суміші при заданому об'ємі цементного тіста і В/Ц.

У ряді випадків задача вибору оптимального співвідношення заповнювачів формулюється більш складно. Наприклад, для литих бетонів, бетонів із підвищеною водонепроникністю, для підводного бетонування, бетонування густоармованих, тонкостінних конструкцій при виборі  $\gamma$  і  $\alpha$  слід враховувати обмеження на водовідділення і розшарування.

Рядом авторів робились спроби розрахувати граничну водоутримуючу здатність бетонних сумішей у залежності від нормальної густоти цементного тіста водопотреби заповнювачів і інших структурних параметрів. Однак отримані теоретичні залежності дають значні похибки або вимагають знання багатьох коефіцієнтів і для цілей практичного проектування складів доводиться використовувати емпіричні рекомендації.

У роботі [3] запропоновані номограми для вибору  $\gamma$  і  $\alpha$  для бетонів, які застосовуються при бетонуванні тонкостінних конструкцій. Вони забезпечують більш високе (на 2-4%) значення долі піску в суміші заповнювачів чим для звичайних бетонів.

Дані, наведені на номограмах [3], можна представити рівняннями:

$$\gamma = 40,89 + 1,427M_k - 0,027\rho - 0,03D_{ш}; \quad (3.77)$$

$$\gamma_1 = 57,122 - 0,616M_k - 0,074V_{ц, \gamma} - 0,08D_{ш}. \quad (3.78)$$

Коефіцієнт розсуву  $\alpha$  бетонних сумішей для тонкостінних конструкцій може бути розрахований за рівнянням регресії, отриманим при обробці експериментальних даних В.П.Сизова [3].

$$\alpha = 2,639 - 1,017P_n - 1,88P_{ш} - 0,0017D_{ш} - 0,045, \quad (3.79)$$

де 0,045 - поправка, яка враховує застосування гравію.

У табл.3.6 наводяться рівняння для розрахунку  $\gamma_{онт}$ , отримані нами при розв'язанні ряду задач [7].

Вибір розрахункової залежності для визначення долі піску визначається з врахуванням наявної інформації про вихідні матеріали, вид добавок, які вводяться у бетонну суміш та інших факторів.

Рівняння регресії для розрахунку  $\Gamma_{\text{опт}}$  [7]

| Вид бетону   | Вихідний параметр                      | Рівняння регресії   | Фактори  |
|--|--|---|--|
| Важкий бетон із використанням портланд-цементу, кварцевого піску і гранітного щебеню | Доля піску в суміші піску і щебеню (г) | $Y_1 = 0,305 + 0,012X_{10} - 0,044X_2 + 0,009X_3 - 0,039X_4 + 0,003X_{10}^2 + 0,017X_2^2 + 0,010X_3^2 + 0,005X_4^2 + 0,004X_5^2 + 0,007X_2X_4 - 0,008X_2X_5$ <p style="text-align: right;">(3.80)</p>                             | $X_2 = \frac{\text{Ц/В} - 21}{0,8}$ $X_3 = \frac{B_{\text{щ}} - 4}{3}$ $X_4 = \frac{B_{\text{п}} - 9}{5}$ $X_5 = \frac{\text{НГ} - 27,2}{2,6}$ $X_{10} = \frac{B - 180}{30}$   |
| Бетон важкий із використанням золи-виносу  | Доля піску в суміші піску і щебеню (г) | $Y_2 = 0,310 + 0,012X_{10} - 0,019X_2 - 0,002X_3 - 0,017X_4 - 0,036X_6 + 0,001X_{10}^2 + 0,001X_2^2 + 0,001X_3^2 - 0,001X_4^2 + 0,001X_6^2 + 0,004X_{10}X_6 + 0,005X_2X_3 + 0,005X_3X_6$ <p style="text-align: right;">(3.81)</p> | $X_{10} = \frac{B - 190}{30}$ $X_2 = \frac{\text{Ц/В} - 21}{0,8}$ $X_3 = \frac{B_{\text{щ}} - 4}{3}$ $X_5 = \frac{\text{НГ} - 27,2}{2,6}$ $X_6 = \frac{3 - 190}{20}$           |
| Бетон важкий із повітрянотягальною добавкою СНП                                      | Доля піску в суміші піску і щебеню (г) | $Y_3 = 0,284 + 0,03X_1 - 0,039X_2 - 0,02X_3 + 0,009X_9 + 0,007X_1^2 + 0,016X_2^2 + 0,008X_3^2 + 0,006X_9^2 - 0,005X_1X_2 + 0,01X_1X_3 + 0,009X_2X_9 - 0,004X_3X_9 + 0,007X_9X_5$ <p style="text-align: right;">(3.82)</p>         | $X_1 = \frac{B - 180}{30}$ $X_2 = \frac{\text{Ц/В} - 21}{0,8}$ $X_3 = \frac{D_{\text{щ}} - 40}{30}$ $X_5 = \frac{\text{НГ} - 27,2}{2,6}$ $X_9 = \frac{\text{НГ} - 0,06}{0,06}$ |

Примітка: В - водовміст бетонної суміші, кг/м<sup>3</sup>; Ц/В - цементно-водне відношення; B<sub>п</sub> і B<sub>щ</sub> - водопотреба піску і щебеню в %; НГ - нормальна густина цементу в %; З - витрата піску, кг/м<sup>3</sup>; СНП - витрата добавки СНП, кг/м<sup>3</sup>.



## РОЗДІЛ 4. ПРИКЛАДИ ЗАДАЧ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БЕТОНУ

### 4.1. Загальна схема розв'язання

Бетонна суміш у загальному випадку представляє систему, для якої виконується умова:

$$V_1 + V_2 + V_3 \dots V_n = 1, \quad (4.1)$$

де  $V_i$  - абсолютний об'єм компонента бетонної суміші.

При використанні цієї умови задача проектування складу бетонної суміші зводиться до визначення витрат  $n-1$  компонентів, наприклад, для звичайного важкого бетону - витрат цементу, води, піску і щебеню (гравію). Визначення складу бетонної суміші виконують з використанням залежностей, які зв'язують витрати окремих компонентів або їх співвідношень із нормованими параметрами.

У найбільш загальному вигляді розв'язання задачі проектування складу бетонної суміші полягає у розв'язанні системи рівнянь:

$$\begin{aligned} P_x &= f(P_1 P_2 \dots P_m, X_1, X_2 \dots X_k) \rightarrow \text{opt}; \\ P_1 &= f_1(X_1 X_2 \dots X_k) > P_1^0 \text{ (або } < P_1^0); \\ P_2 &= f_2(X_1 X_2 \dots X_k) > P_2^0 \text{ (або } < P_2^0); \\ P_m &= f_m(X_1, X_2 \dots X_k) > P_m^0 \text{ (або } < P_m^0), \end{aligned} \quad (4.2)$$

де  $P_x$  - критерій оптимізації (витрата цементу, вартість і ін.);  $P_1, P_2 \dots P_m$  - параметри показників властивостей бетонної суміші і бетону;  $P_1^0, P_2^0 \dots P_m^0$  - їх нормовані значення;  $X_1, X_2 \dots X_k$  - параметри складу суміші.

Така постановка задачі дуже складна, вимагає наявності відповідного комплексу емпіричних залежностей і може бути реалізована лише в окремих випадках.

Розробка досить загального і доступного розрахунково-експериментального методу проектування складів бетонних сумішей із заданою легкоукладальністю і міцністю бетону стала можливою завдяки використанню ряду допущень, зроблених на основі фізичних закономірностей, обумовлених впливом структури бетону на його властивості. До таких закономірностей можна віднести, насамперед, залежності міцності бетону від цементно-водного (водоцементного) відношення, водопотреби бетонної суміші від показників легкоукладальності і Ц/В, легкоукладальності і міцності від доли піску в суміші заповнювачів. Дані закономірності можуть бути використані і при багатопараметричному проектуванні складів бетону. При цьому загальна схема методу наступна:

1. У тих випадках, коли нормуються властивості бетону, однозначно зв'язані з міцністю бетону на стиск  $R_{ст}$  (міцність при розтягу, згині, модуль пружності, умовна розтягуваність і ін.), визначається таке значення  $R_{ст}$ , яке забезпечує задані властивості.
2. З урахуванням активності цементу, якісних особливостей заповнювачів, умов твердіння й інших факторів визначається Ц/В, яке забезпечує задані властивості.
3. Для досягнення необхідного показника легкоукладальності і, при необхідності, інших властивостей (усадки й ін.) бетонної суміші і бетону при використанні даних вихідних матеріалів і добавок визначається витрата води (В). При цьому у випадку виходу за межі правила сталості водопотреби витрата води коригується з врахуванням Ц/В.
4. При нормуванні морозостійкості бетону розраховується необхідний об'єм емульгованого повітря й уточнюється необхідне Ц/В.
5. При знайдених значеннях В і Ц/В перевіряється можливість досягнення нормованих властивостей, які визначаються цими двома технологічними параметрами. Якщо нормовані параметри не досягаються, робиться додаткове коригування В і Ц/В з використанням, при необхідності, спеціальних технологічних прийомів (введення добавок і ін.).
6. З урахуванням остаточно знайдених Ц/В и В визначається витрата цементу і перевіряється виконання обмежень, пов'язаних із витратою цементу (тепловиділення, стійкість до корозії й ін.).
7. Розраховується склад дрібного і крупного заповнювача при введенні кількох фракцій, а потім їх витрати. При виборі співвідношення заповнювачів поряд із досягненням найкращої легкоукладальності і міцності приймаються до уваги й інші умови (підвищена водонепроникність, товщина конструкції, ступінь армування й ін.).
8. Розглядається можливість використання різних технологічних рішень, спрямованих на економію цементу, зниження енергозатрат, зменшення вартості бетонної суміші.

При розрахунках складів бетонних сумішей із заданим класом за міцністю варто враховувати, що відповідна середня міцність бетону, прийнята для визначення Ц/В, залежить від коефіцієнта варіації. У нормативних документах вона розраховується при коефіцієнті варіації  $C_v=13,5\%$  і забезпеченості 95% для усіх видів бетону. У реальних умовах виробництва при  $C_v$ , що відрізняється від нормативного, сере-

дня міцність (умовна марка) бетону може бути визначена за формулою:

$$R = \frac{B}{(1 - 1,64C_v)}, \quad (4.3)$$

де  $B$  - чисельне значення класу бетону в МПа.

Склад бетону розраховують, виходячи із середнього рівня міцності  $R_{ст}$ , МПа, який визначається за формулою:

$$R_{ст} = R \cdot K_{м.п}, \quad (4.4)$$

де  $K_{м.п}$  - коефіцієнт, який залежить від середнього для аналізованого періоду коефіцієнта варіації  $C_v$ . При  $C_v \leq 6\%$  приймають  $K_{м.п} = 1,03$ ; від 6 до 7 - 1,04; від 7 до 8 - 1,05; від 8 до 10 - 1,07; від 10 до 12 - 1,09; від 12 до 14 - 1,12 і від 14 і більше - 1,15.

При виборі кількісних залежностей повинні розглядатися як цільова постановка конкретної задачі, так і наявна вихідна інформація. Наприклад, для найпростіших задач, які включають визначення міцності важкого бетону в умовах нормального твердіння без мінеральних наповнювачів, повітрянотягувальних і інших добавок можуть бути використані формули (2.11). При наявності розгорнутої інформації про якість вихідних матеріалів коефіцієнт  $A$  уточнюється відповідно до рекомендацій [3], у протилежному випадку береться згідно укрупнених рекомендацій [1] або взагалі не враховується [42] (формула 2.14).

Якщо поставлена задача запроектувати склад бетону з заданою міцністю через 4 години після пропарювання по нормалізованому режиму з відомою активністю цементу після пропарювання, може бути використана формула (2.24) [42].

Для більш складних задач при введенні до складу бетонних сумішей мінеральних наповнювачів і добавок ПАР при відомих значеннях  $K_{це}$  і  $\rho A_i$  доцільно використання узагальненої формули міцності (2.33).

Різні кількісні залежності можна використовувати і для визначення витрати заповнювачів. При відомих значеннях питомої поверхні і пористості заповнювачів можна скористатися для визначення  $\Gamma_{опт}$  формулою (3.63) і даними табл.3.5. Коли якість заповнювачів характеризується модулем крупності піску і максимальною крупністю щебеню або гравію, придатні формули (3.66), (3.67). У тих випадках, коли

відомі поряд із витратою цементу й В/Ц лише водопотреба піску, витрату щебеню можна визначити, розраховувачи  $\alpha$  за формулою (3.72). Якщо задана пористість піску і щебеню (їх можна легко обчислити, знаючи дійсну і насипну густину заповнювачів) розрахунок  $\alpha$  слід виконувати за формулою (3.73) із відповідними поправками [3]. Таким чином, наявна в сучасному бетонознавстві емпірична база дозволяє створити банк кількісних залежностей, які надають можливість реалізувати альтернативний підхід при розрахунках складів бетону. Цей банк кількісних залежностей стрімко збільшується в останні роки особливо за рахунок поліноміальних рівнянь регресії - математичних моделей, адекватних у певному "факторному просторі". Найбільшу кількість цих моделей одержують за допомогою методів планування експерименту [124].

Вже перші роботи із застосуванням факторного планування експерименту в технології бетону були спрямовані на розв'язання задач прогнозування властивостей і проектування складів бетону. До нинішнього часу з використанням різноманітних алгоритмів і математичних методів вирішене велике число задач проектування складів бетону [2,7,124]. Зміст основних задач, вирішених Л.Й.Дворкіним із співавторами, проаналізований в монографіях [2,7]. Великий внесок у розвиток методології рішення рецептурно-технологічних задач із застосуванням математичного моделювання зроблений у роботах В.А.Вознесенського [124].

У задачах багатопараметричного проектування складів бетону поліноміальні рівняння регресії можна використовувати також як і звичайні кількісні залежності, справедливі при певних граничних умовах. Якщо для нормованих властивостей бетону  $\sum_{i=1}^m u_i$  отримані поліноміальні моделі з  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots, X_k$  заданими факторами, то визначення величини певного фактора  $X_n$ , наприклад цементно-водного відношення, можливе при представленні моделей у виді квадратних рівнянь:

$$B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i=1}^k B_{ii} X_i^2 + \sum_{i=j} B_{ij} X_i X_j - u_i = 0. \quad (4.5)$$

Задавшись нормованим значенням параметра  $u_i$  і стабілізувавши інші фактори на певному рівні, можна знайти значення  $X_n$  як корінь квадратного рівняння:

$$X_n = \frac{-C_n \pm \sqrt{C_n^2 - 4B_{nn}I}}{2B_{nn}}, \quad (4.6)$$

де  $C_n = B_n + \sum_{i=1}^k B_{ni} X_i$ ;

$$I = \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i=1}^k B_i X_i^2 + \sum_{i=1}^k B_{ij} X_i X_j - y.$$

Перехід до значення фактора в натуральних одиницях виконується за допомогою формули перетворення

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \tilde{X}_{i_0}}{\Delta \tilde{X}_i}, \quad (4.7)$$

де  $X_i$  - кодоване значення фактора;  $\tilde{X}_i$  - значення фактора в натуральних одиницях;  $\tilde{X}_{i_0}$  - значення фактора в натуральних одиницях на основному рівні;  $\Delta \tilde{X}_i$  - інтервал варіювання фактора в натуральних одиницях.

Отримавши необхідні значення Ц/В за допомогою розв'язання математичних моделей для кожного з нормованих параметрів, остаточно, як рекомендується в наведеному вище загальному алгоритмі, вибирається Ц/В, яке забезпечує весь комплекс нормованих властивостей.

Багатофакторні поліноміальні моделі дозволяють за допомогою методу часткових похідних або інших методів аналізу [124] знаходити оптимальні значення таких факторів, як співвідношення заповнювачів, вміст добавок і ін., і, таким чином, оптимізувати розрахункові склади бетону, які враховують задану сукупність факторів і область їх варіювання. При цьому можливі два підходи:

1. Фактори, які оптимізуються, визначаються з рівнянь, де вони виконують роль залежних змінних, наприклад, доля піску в суміші заповнювачів  $\Gamma$  знаходиться з рівняння осадки конуса або жорсткості бетонної суміші;
2. Одержують окремі рівняння для факторів, які оптимізуються (рівняння  $\Gamma_{opt}$ , добавки суперпластифікатора й ін.), що разом із рівняннями нормованих параметрів використовують у розрахунках складів бетонних сумішей.

При використанні багатофракційного заповнювача і введенні мінеральних наповнювачів у якості взаємонезалежних факторів поліноміальних моделей зручно використання об'ємних відношень:

$$X_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2}; \quad X_2 = \frac{V_1 + V_2}{V_1 + V_2 + V_3} \quad \text{і т.д.} \quad (4.8)$$

Визначивши вказані відношення, можна легко розрахувати об'ємні доли кожного з компонентів:

$$V_1 = X_1 X_2; \quad V_2 = (1 - X_1) X_2; \quad V_3 = 1 - X_2. \quad (4.9)$$

## 4.2. Бетон для збірних залізобетонних конструкцій

Незважаючи на те, що найбільша частина важкого бетону йде на виготовлення збірних конструкцій із застосуванням пропарювання, загальноприйнятий розрахунково-експериментальний метод проектування складів на нього не поширюється. Це пояснюється тим, що для такого бетону склад суміші повинен забезпечувати не тільки проектний клас бетону, але і відпускну або передаточну міцність.

У посібнику з підбору складів важкого бетону [125] рекомендується бетон для збірних конструкцій, які виготовляються з пропарюванням, підбирати пробними замісами на конкретно застосовуваних матеріалах при 3-4 значеннях Ц/В і теплової обробці бетонних зразків за прийнятим на заводі ЗБВ режимом пропарювання. На основі отриманих міцносних показників будується залежність  $R_6 = f(\text{Ц/В})$  і графічно визначається необхідне значення Ц/В.

Задача проектування складу пропареного бетону складніша ніж бетону нормального твердіння, оскільки в умовах теплової обробки ріст міцності залежить не тільки від Ц/В, але і від прийнятого режиму пропарювання і наступного за ним твердіння, і ця залежність тісно зв'язана з впливом Ц/В, активності цементу і його мінералогічного складу. Є велика кількість емпіричних рекомендацій, які, однак, прив'язані до конкретних умов [7]. Локальний характер мають і численні математичні моделі, що можуть з успіхом застосовуватися в умовах конкретного підприємства при їх періодичній адаптації і коригуванні коефіцієнтів.

До більш загальних аналітичних залежностей відноситься залежність Л.А.Кайсера (2.24), справедлива однак лише для нормалізованого режиму пропарювання (2+3+6+2 год. при  $t=80^\circ\text{C}$ ) при визначенні міцності через 4 год. після теплової обробки.

В.І.Шейним оброблені типові норми витрати цементу (СН 386-68) і отриманий комплекс рівнянь регресії [9], які дозволяють розраховувати витрату цементу для досягнення 70; 85 і 100% проектноі міцності через 4 год. після закінчення теплової обробки. Ці рівняння досить зручні, вони дозволяють знайти витрату цементу в залежності від заданої міцності бетону, активності цементу і показника легковкладальності, однак також справедливі лише для одного нормалізованого режиму твердіння. Крім того при використанні цих рівнянь необхідно вводити поправки на витрату цементу, які враховують вплив ряду факторів, що, зокрема, виявляється на водопотребі бетонних сумішей.

При необхідному комп'ютерному забезпеченні проектування складів пропареного бетону можливе із застосуванням методу ітерацій. Він оснований на використанні для визначення Ц/В наступного виразу міцності бетону пропареного бетону:

$$R_{ст}^{пр} = K_{ц}^{пр} R_{ст}^{н.т} K_{т}^{пр} K_{т}^{вит}, \quad (4.10)$$

де  $K_{ц}^{пр}$  - коефіцієнт міцності пропареного бетону у віці 28 діб, який залежить від групи цементу щодо пропарювання і Ц/В;  $R_{ст}^{н.т}$  - міцність бетону на стиск при нормальному твердінні;  $K_{т}^{пр}$  - коефіцієнт, який враховує вихід міцності бетону при пропарюванні через 4 години витримування після закінчення теплової обробки;  $K_{т}^{вит}$  - коефіцієнт, який враховує зміну міцності за час витримування після пропарювання  $\tau_{вит}$  ( $\tau_{вит} = 0 \dots 24$  год. при температурі  $15 \dots 20^{\circ}\text{C}$ ).

При  $K_{т}^{пр} = 1$  і  $K_{т}^{вит} = 1$  одержимо міцність пропареного бетону у віці 28 діб (марочну).

Апроксимацією численних експериментальних даних отримані формули для коефіцієнтів у виразі (4.10).

для портландцементу I групи:

$$K_{ц}^{пр} = \frac{1}{100} \left[ \frac{78,7 + 1,5Ц/V + 0,383R_{ц} + 2(Ц/V)^2}{0,1R_{ц}(Ц/V)} - \right]; \quad (4.11)$$

для портландцементу II групи:

$$K_{ц}^{пр} = \frac{1}{100} \left[ \frac{47,9 + 6,15Ц/V + 1,34R_{ц} - 0,763(Ц/V)^2}{0,013R_{ц}^2 + 0,05R_{ц}(Ц/V)} - \right]; \quad (4.12)$$

для шлакопортландцементу:

$$K_{\tau}^{\text{пр}} = \frac{1}{100} \left[ 98,2 + 3,88 \frac{\text{Ц}}{\text{В}} - 1,152 R_{\text{ц}} - 1,276 \left( \frac{\text{Ц}}{\text{В}} \right)^2 + \right]; \quad (4.13)$$

для усіх видів цементу

$$K_{\tau}^{\text{пр}} = -\frac{\tau_{\text{пр}}^2}{600} + 0,06 \tau_{\text{пр}} + 0,106 \frac{\text{Ц}}{\text{В}} - 0,054; \quad (4.14)$$

$$K_{\tau}^{\text{внт}} = 1 + \frac{\tau_{\text{внт}}}{100} - 4 \left[ \frac{16,74 - 0,716 \tau_{\text{пр}} - 5,873 \frac{\text{Ц}}{\text{В}} + 0,007 \tau_{\text{пр}}^2}{0,473 \left( \frac{\text{Ц}}{\text{В}}^2 + 0,145 \tau_{\text{пр}} \cdot \frac{\text{Ц}}{\text{В}} \right)} \right]. \quad (4.15)$$

У формулах (4.14...4.15) під тривалістю пропарювання  $\tau_{\text{пр}}$  слід розуміти загальну тривалість теплової обробки за режимом: витримка на протязі 1...2 год. + підйом температури зі швидкістю 20...25<sup>0</sup>С/год. + ізотермічний прогрів при температурі 80<sup>0</sup>С + охолодження у камері до температури 40...50<sup>0</sup>С зі швидкістю 20...25<sup>0</sup>С/год.

Суть розрахунку методом ітерацій полягає у знаходженні такого Ц/В, при якому забезпечується як відпускна міцність бетону  $R_{\text{ст}}^0$ , обчислена за рівнянням (4.10), так і його марочна міцність  $R_{\text{ст}}^{28}$ . При цьому також знаходять оптимальну тривалість пропарювання. Порядок розрахунку із застосуванням методу ітерацій наступний:

1. Задаємося параметрами режиму пропарювання (наприклад, приймаємо нормалізований режим). Вважаємо, що критичною умовою проектування складу є досягнення бетоном відпускнуої міцності після пропарювання  $R_{\text{ст}}^0$ . Для розрахунку цементно-водного відношення, яке її забезпечує, спочатку приймаємо  $K_{\tau}^{\text{пр}}=1$  і  $K_{\tau}^{\text{внт}}=1$  і знаходимо у першому наближенні  $\left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}}\right)_1$ , використавши для  $R_{\text{ст}}^{\text{внт}}$  і  $K_{\tau}^{\text{пр}}$  відповідно залежності (2.11) та (4.14). При цьому формула (4.10) зведеться до квадратного рівняння. Для його розв'язання позначимо

$$T = 0,06 \tau - \frac{\tau^2}{600} - 0,054;$$

$$A^* = 0,106 A R_{\text{ц}};$$

$$B^* = A R_{\text{ц}} (0,053 - T);$$



$$C^* = 0,5AR_{ц}T + R_{сж}^0;$$

$$D^* = (B^*)^2 + 4A * C^*.$$

$$\text{Тоді } (\text{Ц/В})_1^0 = \frac{B^* + \sqrt{D^*}}{2A^*}. \quad (4.16)$$

2. При отриманому значенні  $(\text{Ц/В})_1^0$  обчислюємо  $K_{ц}^{np}$  і, у випадку витримування конструкції після пропарювання,  $K_{т}^{внт}$ .

$$3. \text{ Приймаємо } (\text{Ц/В})^0 = \frac{(\text{Ц/В})_1^0}{K_{ц}^{np} \cdot K_{т}^{внт}}. \quad (4.17)$$

Якщо отримане значення  $(\text{Ц/В})^0$  досягти в умовах конкретного виробництва неможливо, то слід збільшити тривалість теплової обробки і повернутись до п. 1.

4. Обчислюємо  $K_{ц}^{np}$ ,  $K_{т}^{внт}$  і  $K_{т}^{np}$  при прийнятому  $(\text{Ц/В})^0$  і знаходимо  $R_{ст}^0$  за формулою (4.10), а також  $R_{ст}^{28}$  за тією ж формулою при  $K_{т}^{np} = 1$  і  $K_{т}^{внт} = 1$ .

5. Якщо отримані значення відпускної міцності ( $R_{ст}^0$ ) і міцності пропареного бетону у віці 28 діб ( $R_{ст}^{28}$ ) перевищують необхідні, причому не більше, ніж на 5% (для  $R_{ст}^0$ ), тобто

$$\Delta R = (R_{ст}^{0,розр} - R_{ст}^{0,необх}) / R_{ст}^{0,необх} \leq 0,05, \quad (4.18)$$

то розрахунок Ц/В вважають закінченим.

6. Якщо розраховане значення  $R_{ст}^{28}$  менше необхідного, то критичною умовою проектування складу буде досягнення марочної міцності пропареного бетону. При цьому в умові (4.10) слід прийняти  $K_{т}^{np} = K_{т}^{внт} = 1$ . На першому кроці обчислюємо цементно-водне відношення  $(\text{Ц/В})_1^{28}$  при  $K_{ц}^{np} = 1$  (для нормального твердіння), наприклад, із формул (2.11), далі знаходимо  $K_{ц}^{np}$  при обчисленому  $(\text{Ц/В})_1^{28}$  і остаточно уточнюємо

$$(\text{Ц/В})^{28} = \frac{R_{ст}^{28}}{K_{ц}^{np} \cdot AR_{ц}} \pm 0,5.$$

7. Розраховуємо  $R_{ct}^0$  і, якщо воно істотно перевищує необхідне, зменшуємо тривалість пропарювання і повертаємось до п.1.
8. Знаходимо водопотребу бетонної суміші, витрату цементу і заповнювачів за однією з описаних вище методик.

**Приклад 4.1.** Розрахувати склади бетонів класів В15 і В30, які пропарюються за нормалізованим режимом (2+3+6+2 год.  $t=80^{\circ}\text{C}$ ), із відпускнуою міцністю 70 і 85% марочною через 4 год. для виробництв із коефіцієнтами варіації  $C_v$  рівними: 8,5; 13,5 і 16% із визначенням економії цементу при укрупненні дрібного піску з  $M_k = 1.4$ ;  $\rho_{п1} = 2.6$  кг/л крупним піском із  $M_k = 3.1$ ,  $\rho_{п2} = 2,7$  кг/л до  $M_k=2.2$ . Вміст пилюватих і глинистих домішок у піску з  $M_k=1.4$  становить 2,2%,  $M_k=3.1$  - 3,2%. Рухливість бетонної суміші 4...6 см. Використовується портландцемент М500 із НГ=25,5%, який має після пропарювання за нормалізованим режимом міцність 37,5 МПа. Щебінь гранітний крупністю 5-40 мм, вміст домішок - 1,5%.

1. Для розрахунку необхідних значень Ц/В використовуємо формули (2.13) і (2.24). Значення марочної  $R_{ct}^{28}$  і відпускнуої міцності бетону  $R_{ct}^0$  при заданих значеннях коефіцієнта варіації знайдемо за формулами (4.34). Коефіцієнт А у формулі (2.13) уточнюємо з урахуванням поправок за формулами (2.17...2.20).
2. Вибираємо значення Ц/В, які забезпечують задані значення марочної і відпускнуої міцності.
3. Визначаємо за формулою (3.44) частковий вміст дрібного і крупного пісків у дрібному заповнювачі з заданим значенням  $M_k$ .
4. Витрату води знаходимо за формулою (3.25) із врахуванням поправок по табл.3.1 і формулі (3.29).
5. Розраховуємо витрату цементу з умови:  $C=V \cdot (Ц/В)$  і економію цементу при укрупненні піску.
6. Знаходимо за формулами (3.66) і (3.68) долю піску в суміші заповнювачів для кожного складу бетону, а потім послідовно витрати щебеню і піску.

Розрахункові склади бетонів наведені в табл 4.1.

**Приклад 4.2.** Розрахувати склади бетонів класів В15 і В25, які пропарюються за нормалізованим режимом, із відпускнуою міцністю 70% марочною на основі бетонних сумішей з ОК=5...9 см, із визначенням

Розрахункові склади бетону (приклад 4.1)

| № п/п | Нормовані параметри |                     |                  | $C_v$ | Пісок (М <sub>к</sub> ) | Витрата компонентів, кг/м <sup>3</sup> |     |                    |      | ΔЦ, % | $(Ц/В)_{28}$<br>$(Ц/В)_0$ |
|-------|---------------------|---------------------|------------------|-------|-------------------------|--|-----|--------------------|------|-------|---------------------------|
|       | В, МПа              | $R_{ст}^{28}$ , МПа | $R_{ст}^0$ , МПа |       |                         | Ц                                      | В   | $\Pi_1$<br>$\Pi_2$ | Щ    |       |                           |
| 1     | 15                  | 18,6                | 13               | 8,5   | 1,4                     | 298                                    | 191 | 608                | 1291 | 3,2   | <u>1,18</u>               |
|       |                     |                     | 15,8             |       | 2,2                     | 289                                    | 185 | 337                | 1291 |       | <u>1,56</u>               |
| 2     | 15                  | 21,6                | 15,1             | 13,5  | 1,4                     | 312                                    | 185 | 596                | 1292 | 3,1   | <u>1,31</u>               |
|       |                     |                     | 18,4             |       | 2,2                     | 302                                    |     | 335                | 1283 |       | <u>1,63</u>               |
| 3     | 15                  | 23,4                | 16,4             | 16    | 1,4                     | 325                                    | 191 | 584                | 1293 | 3,14  | <u>1,38</u>               |
|       |                     |                     | 19,9             |       | 2,2                     | 315                                    | 185 | 325                | 1292 |       | <u>1,7</u>                |
| 4     | 30                  | 37,3                | 26,1             | 8,5   | 1,4                     | 440                                    | 191 | 503                | 1277 | 3,14  | <u>1,9</u>                |
|       |                     |                     | 31,7             |       | 2,2                     | 426                                    | 185 | 282                | 1280 |       | <u>2,3</u>                |
| 5     | 30                  | 43,15               | 30,2             | 13,5  | 1,4                     | 502                                    | 197 | 459                | 1263 | 2,9   | <u>2,13</u>               |
|       |                     |                     | 36,6             |       | 2,2                     | 487                                    | 191 | 254                | 1266 |       | <u>2,55</u>               |
| 6     | 30                  | 46,8                | 32,8             | 16    | 1,4                     | 545                                    | 201 | 428                | 1246 | 3,0   | <u>2,26</u>               |
|       |                     |                     | 39,8             |       | 2,2                     | 529                                    | 195 | 237                | 1250 |       | <u>2,71</u>               |
|       |                     |                     |                  |       |                         |  |     | 217                |      |       |                           |

Примітка:  $\Pi_1$  - пісок с  $M_k=1,4$ ,  $\Pi_2$  - пісок с  $M_k=3,1$ ;  $(Ц/В)_{28}$  - з умови для  $R_{ст}^{28}$ ,

$(Ц/В)_0$  - з умови для  $R_{ст}^0$ .

економії цементу при введенні золи виносу і суперпластифікатора С-3 (0,7% від маси цементу), а також необхідної тривалості витримування виробів після пренаркування.

Вихідні матеріали: портландцемент М500, НГ=27%; пісок із  $M_{кр}=2,0$ ;  $\rho_p=2,65$  кг/л,  $R_p=41\%$ ; вміст домішок -3%; щебінь із  $D_{щ}=40$  мм;  $\rho_{в.щ}=1,45$  кг/л,  $\rho_{щ}=2,7$  кг/л;  $R_{щ}=46\%$ ; вміст домішок 1%.

Коефіцієнт варіації  $C_v=13,5\%$ . Уточнюємо за формулою (4.4) величини середнього рівня міцності при стиску ( $R_{ст}$ ). Вони відповідно рівні:  $R_{ст1}=22$  МПа і  $R_{ст2}=37$  МПа.

1. Прийmemo за табл. 2.9 витрату золи (З)  $150 \text{ кг/м}^3$ , а за табл. 2.10 коефіцієнт її цементуючої ефективності ( $K_{ц.е}$ ) для бетону з  $R_{ст}=22 \text{ МПа}$  - 0,40;  $R_{ст}=37 \text{ МПа}$  - 0,25.
2. Уточнюємо за формулами (2.17...2.20) коефіцієнт А і за формулою (2.33) при  $K_{ст}=1,12$ ;  $V_{п}=0\%$  знайдемо без і з введенням золи значення Ц/В, що забезпечують  $R_{ст}$ .
3. Знайдемо по табл. 2.6 значення тривалості витримування виробів після пропарювання, при якій досягається необхідна відпускна міцність бетону без збільшення Ц/В.
4. При середньому значенні необхідної осадки конуса ( $OK=7 \text{ см}$ ) і заданій крупності щебеню за формулою (3.25) із врахуванням поправок за табл. 3.1 і формулою 3.29 (в останній слід враховувати "приведене" Ц/В) знайдемо значення водопотреби бетонних сумішей. Базуючись на відомих експериментальних даних, можна допустити, що введення золи виносу не викликає істотної зміни водопотреби бетонних сумішей у порівнянні з аналогічною кількістю цементу. Однак введення золи в бетонну суміш, збільшуючи приведені Ц/В, сприяє швидшому виводу бетонної суміші за область сталості водопотреби. Витрату води при введенні суперпластифікатора С-3 скоригуємо з використанням понижуючого коефіцієнта за табл. 3.2.
5. Розраховуємо витрату цементу (Ц) у бетонних сумішах, у тому числі з добавками золи і суперпластифікатора, і відповідну економію цементу ( $\Delta Ц$ ).
6. Для визначення витрати заповнювачів, з огляду на задані вихідні дані, розрахуємо за формулами (3.73), (3.74) і (3.76) коефіцієнт розсуву  $\alpha$ . Поправку  $\Delta\alpha_3$  за формулою (3.76) розрахуємо з врахуванням загальної витрати цементно-зольного в'язучого.
7. Визначимо витрату щебеню (Щ) і піску (П) за формулами:

$$\text{Щ} = \frac{1000\rho_{пщ}}{1 + P_{щ}(\alpha - 1)};$$

$$\text{П} = \left[ 1000 - \left( \frac{\text{Щ}}{\rho_{п}} + \frac{3}{\rho_3} + \text{В} + \frac{\text{Щ}}{\rho_{щ}} \right) \right] \rho_{п}.$$

Розрахункові склади бетонів наведені в табл. 4.2.

Розрахункові склади бетону (приклад 4.2)

| №  | Нормовані параметри |                                     |                                    | Витрата компонентів, кг/м <sup>3</sup> |     |     |     |      | Наявність суперпластифікатора С-3 | Тривалість витримки після пропарювання |  |
|----|---------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|-----|-----|-----|------|-----------------------------------|--|--|
|    | В, МПа              | R <sub>ст</sub> <sup>28</sup> , МПа | R <sub>ст</sub> <sup>0</sup> , МПа | Ц<br>ΔЦ                                | З   | В   | П   | Щ    |                                   |  |  |
| 1  | 15                  | 22                                  | 15                                 | 263                                    | -   | 202 | 685 | 1251 | -                                 | 24                                     |  |
|    |                     |                                     |                                    | <u>217</u>                             | -   | 167 | 783 | 1262 | +                                 |  |  |
|    |                     |                                     |                                    | 17,5                                   |     |     |     |      |                                   |  |  |
|    |                     |                                     |                                    | <u>203</u>                             | 150 | 202 | 576 | 1229 | -                                 |  |  |
|    |                     |                                     |                                    | 22,8                                   |     |     |     |      |                                   |  |  |
| 2  | 25                  | 37                                  | 26                                 | <u>157</u>                             | 150 | 167 | 697 | 1241 | +                                 | 4                                      |  |
|    |                     |                                     |                                    | 40,3                                   |     |     |     |      |                                   |  |  |
|    |                     |                                     |                                    | 380                                    | -   | 203 | 586 | 1224 | -                                 |  |  |
|    |                     |                                     |                                    | <u>303</u>                             | -   | 162 | 743 | 1242 | +                                 |  |  |
|    |                     |                                     |                                    | 20,3                                   |     |     |     |      |                                   |  |  |
|    |                     |                                     |                                    | <u>342</u>                             | 150 | 203 | 484 | 1199 | -                                 |  |  |
| 10 |                     |                                     |                                    |  |     |     |     |      |                                   |  |  |
|    |                     |                                     |                                    | <u>265</u>                             | 150 | 162 | 642 | 1216 | +                                 |  |  |
|    |                     |                                     |                                    | 30,3                                   |     |     |     |      |                                   |  |  |

**Приклад 4.3.** Розрахувати із застосуванням математичних моделей (2.26, 2.27, 3.30 і 3.80) склади пропарених бетонів із міцністю на стиск в 28 діб  $R_{ст}^{28}=24$  МПа і відпускнуою міцністю ( $R_{ст}^0$ ) 70 і 85% від  $R_{ст}^{28}$ .

Рухливість бетонних сумішей: а) ОК=3 см; б) ОК=8 см

Характеристика вихідних матеріалів: активність цементу  $R_{ц}=43$  МПа, нормальна густина НГ=26,8%, пісок із  $V_{п}=9,5\%$ ,  $\rho_{п}=2,65$  кг/л; щебінь із  $\rho_{щ}=2,7$  кг/л;  $V_{щ}=2\%$ . Тривалість теплової обробки  $\tau_{т,о}=12$  год. при температурі ізотермічного прогріву  $T_{із}=70^{\circ}\text{C}$ .

Оцінити можливу економію цементу при збільшенні  $R_{ц}$  до 51 МПа, зменшенні НГ до 24,6% і  $V_{п}$  до 6,5%, збільшенні  $\tau_{т,о}$  до 18 год. і  $T_{із}$  до  $80^{\circ}\text{C}$ .

- Знаходимо шляхом розв'язання рівнянь (2.26 і 2.27) необхідне Ц/В для досягнення заданих значень  $R_{ст}^{28}$  і  $R_{ст}^0$  при вихідних умовах і умовах, заданих для економії цементу.

2. За допомогою рівняння (3.30) розрахуємо витрати води (В).
3. З умови  $\rho = \frac{C}{V}$  знайдемо витрати цементу і значення  $\Delta C$ .
4. Ділю піску в суміші заповнювачів ( $\rho$ ) розрахуємо за рівнянням (3.80).
5. Витрати піску і щебеню розрахуємо з рівнянь:

$$П = \left[ \left( 1000 - \frac{C}{3,1} - В \right) \rho_p \right];$$

$$Щ = \left( 1000 - \frac{C}{3,1} - В - \frac{П}{2,65} \right) \rho_{щ}.$$

Для орієнтованих розрахунків по моделях можуть бути використані номограми (рис. 4.1...4.4). Розрахункові склади бетонів наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Розрахункові склади бетону (приклад 4.3)

| № | Нормовані параметри |          | Вихідні умови |             |                      | Витрата компонентів, кг/м <sup>3</sup> |     |     |      |
|---|---------------------|----------|---------------|-------------|----------------------|--|-----|-----|------|
|   | $R_{ст}^{28}$       | ОК<br>см | $R_{ц}$ , МПа | $V_n$ , %   | $\tau_{т.о.}$ , год. | Ц                                      | В   | П   | Щ    |
|   | $R_{ст}^0$<br>МПа   |          | НГ, %         | $V_{щ}$ , % | $T_{із}$ , °С        |  |     |     |      |
| 1 | 24                  | 3        | 43            | 9,5         | 12                   | 304                                    | 170 | 621 | 1330 |
|   | 17                  |          | 26,8          | 2           | 70                   |  |     |     |      |
| 2 | 24                  | 8        | 43            | 9,5         | 12                   | 355                                    | 192 | 597 | 1251 |
|   | 17                  |          | 26,8          | 2           | 70                   |  |     |     |      |
| 3 | 24                  | 3        | 51            | 6,5         | 18                   | 224                                    | 150 | 751 | 1323 |
|   | 17                  |          | 24,6          | 2           | 80                   |  |     |     |      |
| 4 | 24                  | 8        | 51            | 6,5         | 18                   | 276                                    | 167 | 707 | 1278 |
|   | 17                  |          | 24,6          | 2           | 80                   |  |     |     |      |
| 5 | 24                  | 3        | 43            | 9,5         | 12                   | 365                                    | 178 | 572 | 1305 |
|   | 21                  |          | 26,8          | 2           | 70                   |  |     |     |      |
| 6 | 24                  | 8        | 43            | 9,5         | 12                   | 417                                    | 194 | 559 | 1233 |
|   | 21                  |          | 26,8          | 2           | 70                   |  |     |     |      |
| 7 | 24                  | 3        | 51            | 6,5         | 18                   | 249                                    | 148 | 750 | 1309 |
|   | 21                  |          | 24,6          | 2           | 80                   |  |     |     |      |
| 8 | 24                  | 8        | 51            | 6,5         | 18                   | 290                                    | 165 | 711 | 1267 |
|   | 21                  |          | 24,6          | 2           | 80                   |  |     |     |      |

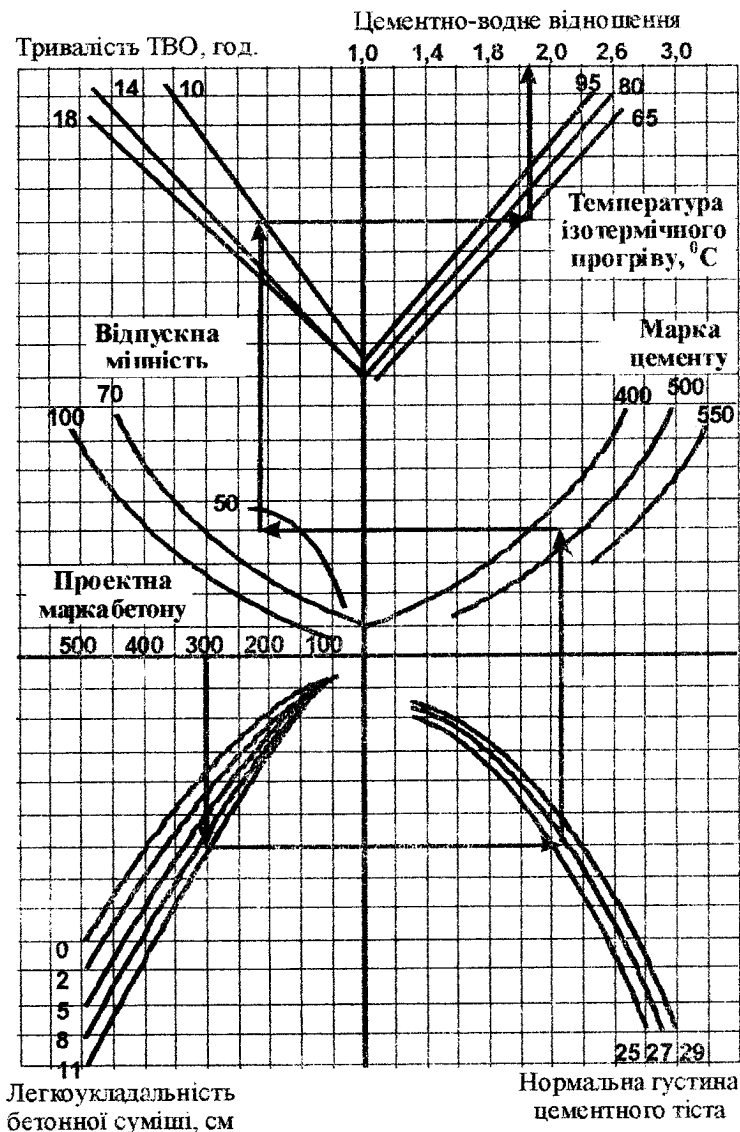


Рис. 4.1. Номограма для визначення Ц/В, яке забезпечує відпуску міцність пропареного бетону

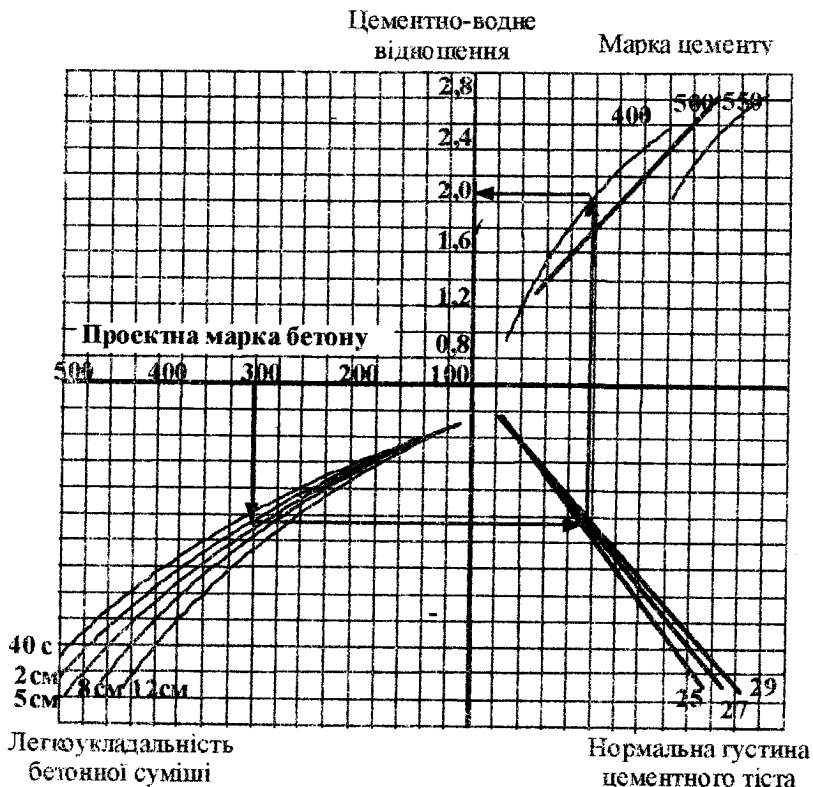


Рис. 4.2. Номограма для визначення Ц/В, яке забезпечує 28-добову міцність бетону

**Приклад 4.4.** Розрахувати з застосуванням математичних моделей (2.31, 2.32) склади литих золівміщуючих бетонів із міцністю на стиск  $R_{ст}^{28} = 22$  МПа і відпускнуою міцністю 70 і 85%  $R_{ст}^{28}$ . Бетони пропарюють за режимом 2+3+6+2 при 80°C.

Вихідні матеріали: портландцемент М400;  $\rho_{ц} = 3,1$  кг/л; зола виносу, домелена в кульовому млині до  $S_{шт} = 390$  м<sup>2</sup>/кг;  $\rho_3 = 2,5$  кг/л; кварцевий пісок із  $M_k = 1,4$ ;  $\rho_{п} = 2,65$  кг/л; гранітний щебінь крупністю 5...20 мм,  $\rho_{щ} = 2,7$  кг/л. У бетонні суміші вводиться добавка суперпластифікатора для досягнення ОК=20...22 см при заданій водопотребі бетонної суміші (В=190 л).



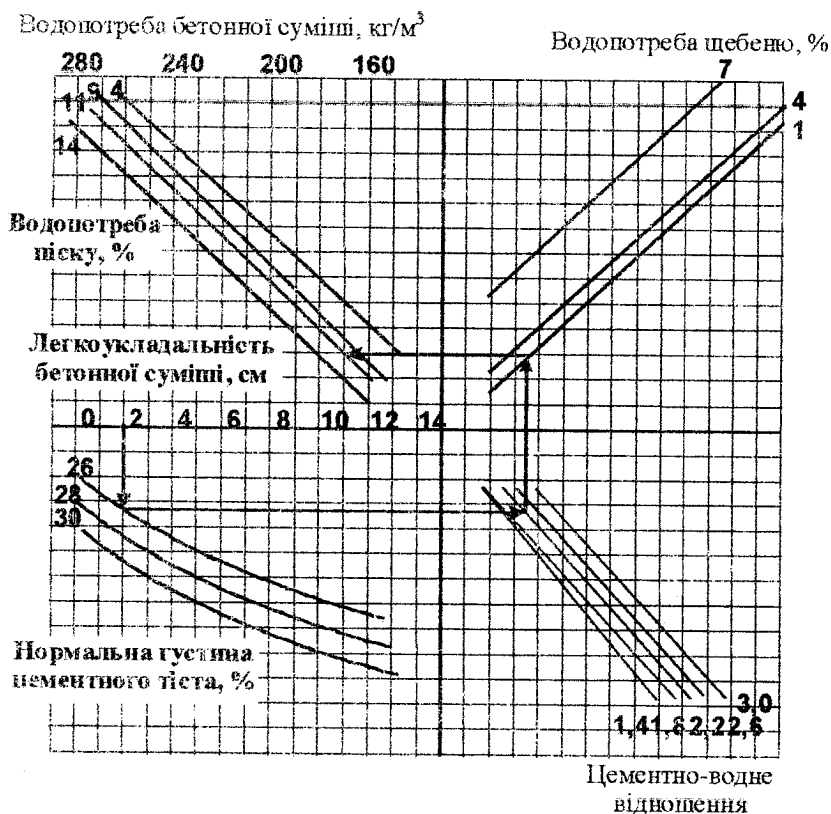


Рис. 4.3. Номограма для визначення водопотреби бетонної суміші

- На основі аналізу моделей (2.31) і (2.32) із врахуванням області варіювання факторів (табл.2.7) для досягнення максимальної відпускної і марочної міцності при постійних значеннях факторів  $X_2$ ,  $X_3$  і  $X_8$  впливає, що фактори  $X_6$  і  $X_7$  повинні знаходитись на верхньому рівні (+1). Тоді моделі (2.31 і 2.32) можна привести до виду:

$$\begin{aligned}
 Y_7^1 &= 28,16 - 3,3X_2 + 1,06X_3 + 1,6X_2^2 - 0,99X_3^2 - 3,8X_8^2; \\
 Y_8^1 &= 32,55 - 5,84X_2 + 0,6X_3 + 3,3X_2^2 - 1,09X_3^2 - 4,5X_8^2.
 \end{aligned}
 \quad (2.38)$$

- З огляду на те, що прийнята витрата води  $V=190$  кг/м<sup>3</sup> тобто  $X_3=0$ , визначимо необхідні значення В/Ц при заданих значеннях  $R_{ст}^{28}$  і  $R_{ст}^0$ , а також при  $M_k=1,4$  ( $X_8=-1$ ).

Витрата цементу, кг/м<sup>3</sup>      Водовміст бетонної суміші, кг/м<sup>3</sup>

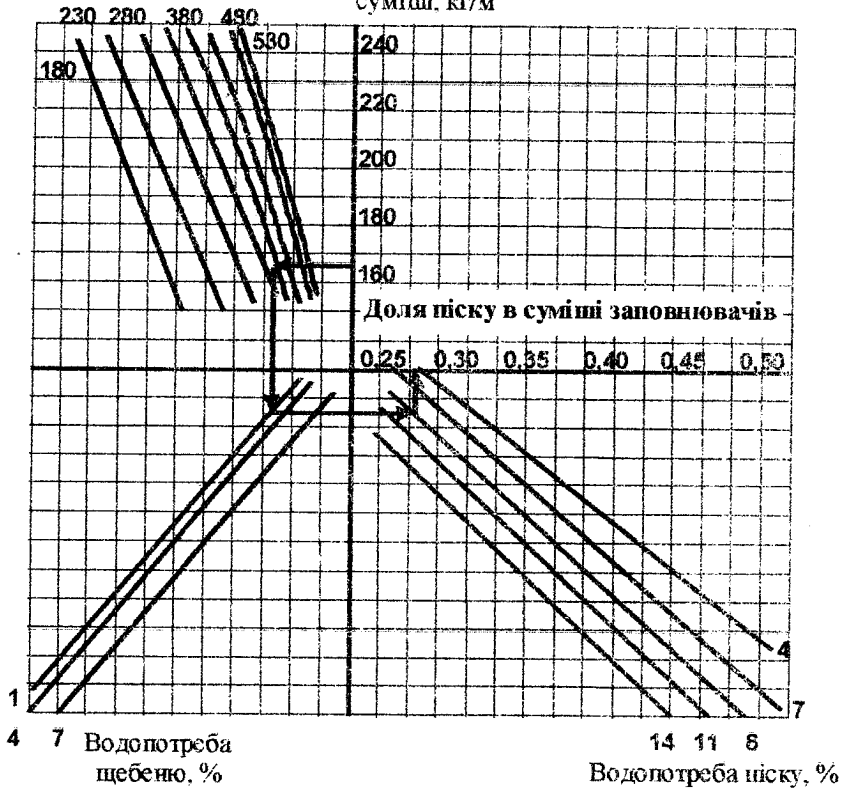


Рис. 4.4. Номограма для визначення оптимальної доли піску в суміші заповнювачів

- З умови:  $\Pi = B \cdot (B/\Pi)$  знайдемо необхідні значення витрати цементу.
- Визначимо витрати щебеню, піску і золи. Сумарний об'єм зазначених матеріалів ( $V_{\text{зап}}$ ) знаходиться з умови:

$$V_{\text{зап}} = 1000 \cdot \frac{\Pi}{3,1} - B.$$

Витрата щебеню:

$$\Pi = (V_{\text{зап}} \cdot \gamma_{\text{щ}}) \rho_{\text{щ}}, \text{ де } \gamma_{\text{щ}} = 0,61.$$

Витрата золи:

$$Z = (V_{\text{зап}} - V_{\text{щ}}) \gamma_3 \rho_3, \text{ де } \gamma_3 = 0,3.$$

Витрата піску:

$$\Pi = (V_{\text{зап}} - V_{\text{щ}} - V_{\text{з}}) \rho_{\text{п}}$$

У наведених формулах  $V_{\text{щ}}$  і  $V_{\text{з}}$  - абсолютні об'єми щебеню і золи;  $\Gamma_{\text{щ}}$  і  $\Gamma_{\text{з}}$  - відповідно доля щебеню в суміші щебеню, піску і золи і доля золи в суміші золи і піску.

Розрахункові склади бетонів наведені нижче:

$$R_{\text{ст}}^{28} = 22 \text{ МПа}; R_{\text{ст}}^0 = 15 \text{ МПа}; Ц = 209 \text{ кг/м}^3; З = 218 \text{ кг/м}^3;$$

$$В = 190 \text{ кг/м}^3; \Pi = 538 \text{ кг/м}^3; \text{Щ} = 1223 \text{ кг/м}^3;$$

$$R_{\text{ст}}^{28} = 22 \text{ МПа}; R_{\text{ст}}^0 = 19 \text{ МПа}; Ц = 214 \text{ кг/м}^3; З = 217 \text{ кг/м}^3;$$

$$В = 190 \text{ кг/м}^3; \Pi = 529 \text{ кг/м}^3; \text{Щ} = 1212 \text{ кг/м}^3.$$

У бетонні суміші обох складів вводиться добавка суперпластифікатора до досягнення ОК=20...22 см.

**Приклад 4.5.** Розрахувати склади пропареного бетону класу В25 ( $R_{\text{ст}}^{28} = 37 \text{ МПа}$ ) із відпускнуою міцністю 50, 70 і 85% від  $R_{\text{ст}}^{28}$  із бетонних сумішей з ОК=5...9 см при тривалості пропарювання не більш 11 годин. Відпускна міцність повинна бути забезпечена через 4 або через 24 години витримування після теплової обробки як без введення, так і з введенням прискорювача твердіння - сульфату натрію.

Вихідні матеріали: портландцемент середньоалюмінатний М500, НГ=25,5%, пісок із  $M_{\text{кр}}=2,0$ ;  $\rho_{\text{п}}=2,65 \text{ кг/л}$ ;  $P_{\text{п}}=41\%$ ; щебінь із  $D_{\text{щ}}=40 \text{ мм}$ ;  $\rho_{\text{н.щ}}=1,45 \text{ кг/л}$ ;  $\rho_{\text{н.з}}=2,7 \text{ кг/л}$ ;  $P_{\text{щ}}=46\%$ .

1. Для вихідних матеріалів приймаємо коефіцієнт якості  $A=0,55$ . При заданій міцності в 28-добовому віці  $R_{\text{ст}}^{28} = 37 \text{ МПа}$  мінімальне значення відпускнуої міцності при її рівні 50, 70 і 85% складе відповідно 18,5; 25,9 і 31,5 МПа. При введенні добавки прискорювача вводять коефіцієнти підвищення міцності через 4 години. Після пропарювання  $K_{\text{пр}}=1,3$  і у віці 28 діб  $K_{\text{пр}}=1,1$ . Отже в цьому випадку необхідні розрахункові значення  $R_{\text{ст}}^{28} = \frac{3,7}{1,1} = 33,6 \text{ МПа}$  і

$$R_{\text{ст}}^0 = 14,2; 19,9 \text{ і } 24,2 \text{ МПа відповідно.}$$

2. Виконаємо, наприклад, розрахунки для таких умов:  $R_{\text{ст}}^{28} = 37 \text{ МПа}$ ,  $R_{\text{ст}}^0 = 31,5 \text{ МПа}$ , тривалість витримки після пропарювання  $\tau_{\text{вит}} = 4$

години, добавка - прискорювач не вводиться. Приймаємо спочатку

$\tau=11$  год.,  $K_{\text{ц}}^{\text{пр}}=1$  і  $K_{\tau}^{\text{виг}}=1$  і з рівняння (4.16) знаходимо  $\left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}}\right)_1^0$ :

$$T = 0,06\tau - \frac{\tau^2}{600} - 0,054 = 0,06 \cdot 11 - 11^2/600 - 0,054 = 0,404;$$

$$A^* = 0,106AR_{\text{ц}} = 0,106 \cdot 0,55 \cdot 50 = 2,915;$$

$$B^* = AR_{\text{ц}}(0,053 - T) = 0,55 \cdot 50(0,053 - 0,404) = -9,653;$$

$$C^* = 0,5AR_{\text{ц}}T + R_{\text{вж}}^0 = 0,5 \cdot 0,55 \cdot 50 \cdot 0,404 + 31,5 = 37,055;$$

$$D^* = (B^*)^2 + 4A^*C^* = (-9,653)^2 + 4 \cdot 2,915 \cdot 37,055 = 525,2.$$

$$\text{Тоді } \left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}}\right)_1^0 = \frac{B^* + \sqrt{D^*}}{2A^*} = \frac{-9,653 + \sqrt{525,2}}{2 \cdot 2,915} = 2,26.$$

3. Визначаємо  $K_{\text{ц}}^{\text{пр}}$  і  $K_{\tau}^{\text{виг}}$  за формулами (4.12) і (4.15):

$$K_{\text{ц}}^{\text{пр}} = \frac{1}{100} \left[ 47,9 + 6,15\frac{\text{Ц}}{\text{В}} + 1,34R_{\text{ц}} - 0,763\left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}}\right)^2 \dots \right] = (47,9 +$$

$$+ 6,15 \cdot 2,26 + 1,34 \cdot 50 - 0,763 \cdot 2,26^2 - 0,014 \cdot 50^2 + 0,05 \cdot 50 \cdot 2,26) / 100 = 0,972;$$

$$K_{\tau}^{\text{виг}} = 1 + \frac{\tau_{\text{виг}} - 4}{100} \left[ 16,74 - 0,716\tau_{\text{пр}} - 5,873\frac{\text{Ц}}{\text{В}} + 0,007\tau_{\text{пр}}^2 \dots \right] = 1,0.$$

4. Знаходимо  $\left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}}\right)^0$  за формулою (4.17):

$$\left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}}\right)^0 = \frac{\left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}}\right)_1^0}{K_{\text{ц}}^{\text{пр}} \cdot K_{\tau}^{\text{виг}}} = 2,26 / (0,972 \cdot 1,0) = 2,32.$$

5. Уточнюємо  $K_{\text{ц}}^{\text{пр}}$ ,  $K_{\tau}^{\text{пр}}$  і  $K_{\tau}^{\text{виг}}$  при  $\text{Ц}/\text{В}=2,32$  за формулами (4.12), (4.14) і (4.15):

$$K_{\text{ц}}^{\text{пр}} = \frac{1}{100} \left[ 47,9 + 6,15\frac{\text{Ц}}{\text{В}} + 1,34R_{\text{ц}} - 0,763\left(\frac{\text{Ц}}{\text{В}}\right)^2 \dots \right] = (47,9 +$$

$$+ 6,15 \cdot 2,32 + 1,34 \cdot 50 - 0,763 \cdot 2,32^2 - 0,014 \cdot 50^2 + 0,05 \cdot 50 \cdot 2,32) / 100 = 0,981;$$

$$K_{\tau}^{\text{пр}} = -\frac{\tau_{\text{пр}}^2}{600} + 0,06\tau_{\text{пр}} + 0,106Ц / В - 0,054 = -11^2/600 + 0,06 \cdot 11 + 0,106 \cdot 2,32 - 0,054 = 0,650;$$

$$K_{\tau}^{\text{вир}} = 1,0.$$

6. Знаходимо  $R_{\text{ст}}^0$  і  $R_{\text{ст}}^{28}$  за формулою (4.10):

$$R_{\text{ст}}^0 = K_{\text{ц}}^{\text{пр}} R_{\text{ст}}^{\text{н.т}} K_{\tau}^{\text{пр}} K_{\tau}^{\text{вир}} = 0,981 \cdot 50,05 \cdot 0,650 \cdot 1 = 31,9 \text{ МПа} > R_{\text{ст,необх}}^0 = 31,5 \text{ МПа};$$

$$R_{\text{ст}}^{28} = K_{\text{ц}}^{\text{пр}} R_{\text{ст}}^{\text{н.т}} = 0,981 \cdot 50,05 = 49,1 \text{ МПа} > R_{\text{ст,необх}}^{28} = 37 \text{ МПа},$$

$$R_{\text{ст}}^{\text{н.т}} = 0,55 \cdot 50(2,32 - 0,5) = 50,05 \text{ МПа за формулою (2.11).}$$

Оскільки

$$\Delta R = (R_{\text{ст}}^{0,\text{розр}} - R_{\text{ст}}^{0,\text{необх}}) / R_{\text{ст}}^{0,\text{необх}} = (31,9 - 31,5) / 31,5 = 0,012 < 0,05$$

то розрахунок Ц/В можна вважати завершеним.

7. Визначаємо за формулою (3.25) з урахуванням необхідних поправок водопотребу бетонної суміші  $В = 187 \text{ кг/м}^3$ .

8. Обчислюємо необхідну витрату цементу з умови  $Ц = В \cdot Ц/В = 1872,32 = 434 \text{ кг/м}^3$ .

9. Для визначення витрати щебеню розрахуємо за формулою (3.72) значення коефіцієнта  $\alpha$  із необхідними поправками.

10. Визначимо витрату щебеню (Щ) і піску (П) за формулами:

$$\text{Щ} = \frac{1000\rho_{\text{н.щ}}}{1 + P_{\text{щ}}(\alpha - 1)};$$

$$\text{П} = \left[ 1000 - \left( \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + В + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} \right) \right] \rho_{\text{п}}.$$

Аналогічно проектуємо склад бетону за інших вихідних даних згідно алгоритму, наведеному на рис. 4.5. Результати розрахунків зводимо в табл.4.4.

### 4.3. Дорожній і гідротехнічний бетон

З огляду на умови роботи дорожнього бетону в конструкції дорожнього одягу він характеризується, як правило, двома показниками міцності - на розтяг при згині ( $R_{\text{р,зг}}$ ) і на стиск ( $R_{\text{ст}}$ ). Перший показник є основною міцнісною характеристикою неармованого дорожнього

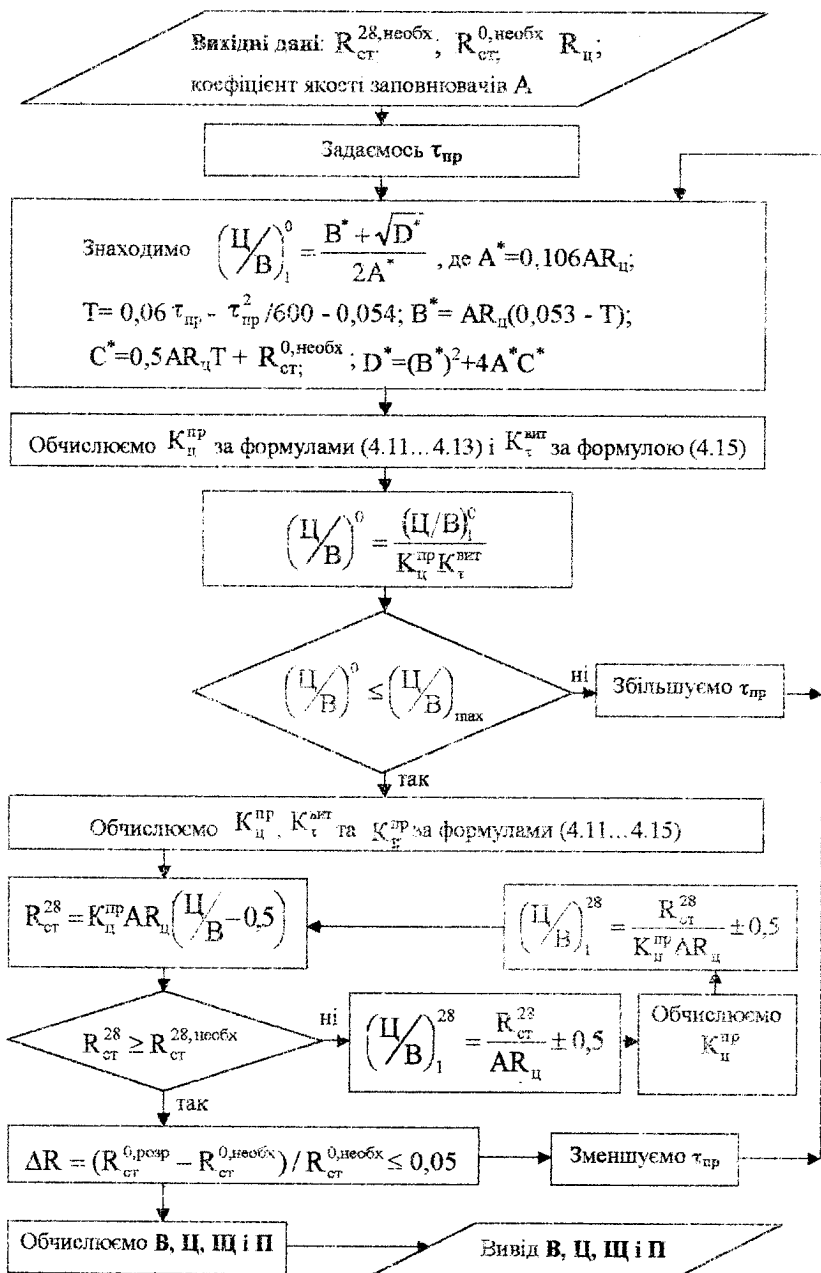


Рис. 4.5. Алгоритм розрахунку пропареного бетону методом ітерацій

Розрахункові склади бетонів (приклад 4.5)

| № п/п | Від-пущна міцність, МПа | Тривалість пропарювання, годин | Тривалість витримки після пропарювання, годин | Наявність добавки прискорювача твердіння* | Витрата компонентів, кг/м <sup>3</sup> |     |     |      |
|-------|-------------------------|--------------------------------|---|---|--|-----|-----|------|
|       |                         |                                |   |   | Ц/ΔЦ**                                 | В   | П   | Щ    |
| 1     | 31,5                    | 11                             | 4   | -   | 434                                    | 187 | 644 | 1166 |
| 2     | 31,5                    | 11                             | 4   | +   | 361 / 16,8                             | 181 | 675 | 1215 |
| 3     | 31,5                    | 11                             | 24  | -   | 428 / 1,4                              | 186 | 647 | 1170 |
| 4     | 31,5                    | 11                             | 24  | +   | 354 / 18,4                             | 180 | 677 | 1219 |
| 5     | 25,9                    | 11                             | 4   | -   | 381                                    | 183 | 666 | 1202 |
| 6     | 25,9                    | 11                             | 4   | +   | 321 / 15,7                             | 180 | 694 | 1232 |
| 7     | 25,9                    | 11                             | 24  | -   | 367 / 3,7                              | 181 | 672 | 1211 |
| 8     | 25,9                    | 11                             | 24  | +   | 321 / 15,7                             | 180 | 694 | 1232 |
| 9     | 18,5                    | 7                              | 4   | -   | 348                                    | 180 | 680 | 1223 |
| 10    | 18,5                    | 7                              | 4   | +   | 321 / 7,8                              | 180 | 694 | 1232 |
| 11    | 18,5                    | 7                              | 24  | -   | 343 / 1,4                              | 180 | 683 | 1225 |
| 12    | 18,5                    | 7                              | 24  | +   | 321 / 7,8                              | 180 | 694 | 1232 |
| 13    | 18,5                    | 11                             | 4   | -   | 343 / 1,4                              | 180 | 683 | 1225 |
| 14    | 18,5                    | 11                             | 4   | +   | 324 / 7,8                              | 180 | 694 | 1232 |

\* "+"- добавка вводиться, "-"- не вводиться;

\*\* економія цементу у %.

бетону. Для середньозернистих дорожніх цементних бетонів співвідношення міцностей  $R_{p,зг} / R_{ст}$  складає звичайно 1/6...1/8, для полімерцементних бетонів 1/3...1/4.

Розрахунок складу бетону з нормованою міцністю на розтяг при згині можна виконувати як приводячи її до еквівалентної міцності на стиск, так і використовуючи спеціальні залежності, які зв'язують  $R_{p,зг}$  з Ц/В.

Для приведення міцності звичайного важкого бетону на розтяг при згині до міцності на стиск найчастіше використовують формулу

$$R_{p,зг} = 0,8R_{ст}^{2/3} \quad (4.19)$$

Виготовлення зразків-балочок і випробування їх на згин характеризується високою трудомісткістю. Тому для оцінки міцності на розтяг часто застосовують розколювання зразків кубів або циліндрів.

Кореляційна залежність для міцності на розколювання:

$$R_{p,r} = 0,55R_{ст}^{2/3} \quad (4.20)$$

Залежності, які безпосередньо зв'язують  $R_{p,зг}$  з Ц/В, враховують міцність цементу на згин, визначену експериментально або прийняту відповідно до вимог стандарту для даної марки.

Відома формула СоюздорНДІ:

$$R_{p,зг} = AR_{ц,зг} (Ц/В - 0,1) \quad (4.21)$$

де  $R_{ц,зг}$  - межа міцності цементу на згин.

Значення коефіцієнта А в формулі (4.21) при визначенні Ц/В для дорожнього бетону наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Значення коефіцієнта А в формулі (4.21)

| Призначення бетону                                    | Найменування добавок | Коефіцієнт А |
|---|----------------------|--------------|
| Для одношарових і верхнього шару двошарових покриттів | Повітрянотягувальна  | 0,34         |
|   | Газоутворююча        | 0,36         |
| Для нижнього шару двошарових покриттів                | Повітрянотягувальна  | 0,34         |
|   | Газоутворююча        | 0,36         |
| Для основ під асфальтобетонні покриття                | Пластифікуюча        | 0,38         |
|   | Без добавок          | 0,39         |

Формула для розрахунку  $R_{p,зг}$ , запропонована Ю.М.Баженовим, відрізняється від формули СоюздорНДІ значеннями коефіцієнтів:

$$R_{p,зг} = AR_{ц,зг} (Ц/В - 0,2). \quad (4.22)$$

Для високоякісних матеріалів  $A=0,42$ , рядових - 0,4 і матеріалів пониженої якості - 0,37.

З міцністю дорожніх бетонів на стиск зв'язана також їх стиральність. Встановлено, що дорожнє покриття з достатньою міцністю при стиранні повинно мати міцність бетону на стиск не менше 30 МПа.

При розрахунках бетонних покриттів і основ крім міцносних характеристик враховують модуль пружності, коефіцієнт лінійного температурного розширення, коефіцієнт Пуассона.

Значення модуля пружності, як показали дослідження, приблизно однакові як в умовах стиску, так і розтягу при згині. Вони визна-



чаються не тільки Ц/В і кількістю в'яжучого, але і пружними властивостями заповнювача (табл.4.6).

Значення коефіцієнта Пуассона  $\mu$  дорожніх бетонів також залежать від властивостей заповнювачів і складають для бетонів на гранітному щебені - 0,18, на вапняковому щебені і для піщаного бетону - 0,20, карбонатного бетону - 0,22.

Марки дорожнього бетону або його класи за міцністю встановлюють у залежності від категорії доріг і його призначення в конструкції дорожнього одягу. Для одношарових і верхнього шару автомобільних доріг I й II технічних категорій застосовують бетон з марками на розтяг при згині ( $R_{тз}$ ) і стиску (M) не нижчими відповідно 50 і 400, менш відповідальних доріг - 40 і 300. Для нижнього шару двошарових бетонних покриттів застосовують бетон марок за міцністю на розтяг при згині 35, 40 і 45, стиску 250, 300 і 350. Для основ під удосковалені (асфальтобетонні) покриття застосовують бетон марок  $R_{тз}15... R_{тз}35$  і  $M75... M250$ .

Таблиця 4.6

Модуль пружності (E) дорожніх бетонів

| Вид бетону        | Значення $E \cdot 10^4$ , МПа, для бетонів різних марок за міцністю на розтяг при згині |      |      |      |      |     |      |      |
|-------------------|---|------|------|------|------|-----|------|------|
|                   | 20  | 25   | 30   | 35   | 40   | 45  | 50   | 55   |
| Звичайний бетон   | 1,9   | 2,3  | 2,65 | 2,9  | 3,15 | 3,3 | 3,5  | 3,8  |
| Піщаний бетон     | -   | -    | 1,5  | 2,0  | 2,25 | 2,5 | 2,75 | 3,0  |
| Карбонатний бетон | 1,6   | 1,95 | 2,25 | 2,45 | 2,65 | 2,8 | 2,95 | 3,20 |

Таблиця 4.7

Значення коефіцієнта лінійного температурного розширення дорожніх бетонів ( $\alpha_t$ )

| Вид бетону                                    | Значення $\alpha_t \cdot 10^6 (1/^\circ\text{C})$ при температурах |  |
|---|--|--|
|   | від $-20$ до $0^\circ\text{C}$                                     | від $0^\circ\text{C}$ до $+40^\circ\text{C}$ |
| Бетон на кварцевому піску и гранітному щебені | 6,8  | 8,1  |
| Те ж на вапняковому щебені                    | 4,1  | 5,6  |

| Вид бетону                    | Значення $\alpha_t \cdot 10^6 (1/^\circ\text{C})$<br>при температурах |  |
|-------------------------------|---|--|
|                               | від $-20$ до $0^\circ\text{C}$  | від $0^\circ\text{C}$ до $+40^\circ\text{C}$ |
| Дрібнозернистий піщаний бетон | 9,0   | 10,0   |
| Карбонатний бетон             | 4,4   | 5,0  |

Перехід від класів бетону на розтяг при згині  $V_{\text{тв}}$  до середнього рівня міцності  $R_{p,zg}$  робиться за тими ж формулами (4.3, 4.4), що і для міцності на стиск.

Обов'язковою вимогою для дорожнього бетону покриттів, які працюють в умовах поперемінного заморожування і відтаювання, є нормування марки за морозостійкістю.

Для одношарових покриттів і верхнього шару двошарових покриттів нормують марки F100, F150 і F200 відповідно для районів із середньомісячною температурою найбільш холодного місяця від 0 до  $-5^\circ\text{C}$ , від  $-5$  до  $-15^\circ\text{C}$ , від  $-15^\circ\text{C}$  і нижче. Для нижнього шару двошарових покриттів у районах із середньомісячною температурою найбільш холодного місяця від 0 до  $-15^\circ\text{C}$  призначається морозостійкість бетону F50, від  $-15^\circ\text{C}$  і нижче F100.

У практиці проектування складів дорожніх бетонів забезпечення необхідної морозостійкості досягається обмеженням В/Ц и введенням втягнутого повітря.

Для одношарових і верхнього шару двошарових покриттів В/Ц повинно бути не більшим 0,50, об'єм втягнутого в суміш повітря, визначений через 30 хв після її приготування, від 5 до 6%. Для нижнього шару двошарових покриттів В/Ц повинно бути не більшим 0,60, а об'єм втягнутого повітря - від 3,5 до 4,5%.

Вимоги до гідротехнічного бетону призначаються в залежності від його масивності, розташування в споруді, зональності щодо рівня води. Межа міцності бетону встановлюється у віці 28, 60 або 180 діб у залежності від термінів будівництва.

Поряд із міцністю на стиск для гідротехнічного бетону конструкцій, експлуатаційні якості яких визначаються роботою розтягнутої зони, при підвищених вимогах за тріщиностійкістю нормуються також марка (клас) за міцністю на осьовий розтяг.

Для гідротехнічного бетону збірних конструкцій відпускна міцність повинна бути не меншою 70% від проектної. Для монолітних

бетонних одягів каналів марка бетону призначається в залежності від глибини води в каналі, товщини облицювання і технології виробництва.

Необхідна тріщиностійкість гідротехнічного бетону досягається нормуванням не тільки міцності на розтяг, але також показників граничної розтягуваності і усадки. Гранична розтягуваність на зразках 180-добового віку звичайно обмежується  $5 \cdot 10^{-3}$ , зовнішніх зон споруд  $7 \cdot 10^{-5}$ . Лінійна усадка при відносній вологості 60% у віці 28 діб не повинна перевищувати 0,3 мм/м, 180 діб - 0,7 мм/м.

Тріщиностійкість гідротехнічного бетону масивних конструкцій прямо зв'язана з температурними напругами, обумовленими тепловиділенням при твердінні. Максимально допустиме значення тепловиділення бетону призначається в залежності від нормованої температури при його розігріві в блоках.

Водонепроникність гідротехнічного бетону в залежності від виду споруди може задаватись як марками, так і коефіцієнтом фільтрації, між якими, як вказувалось у розділі 2 існує кореляційний зв'язок. При впливі агресивного середовища вказується вид бетону за щільністю. Показниками щільності бетону є його водонепроникність і водопоглинання. Для зони змінного рівня води водопоглинання бетону не повинне перевищувати 5% (від маси висушених зразків), інших зон не більш 7%.

Для важкого гідротехнічного бетону проєктні марки за морозостійкістю (F) призначаються в діапазоні: F50...F500. У існуючій практиці проєктування складів гідротехнічного бетону встановлюють максимально допустимі В/Ц, які забезпечують морозостійкість (табл.4.8).

Таблиця 4.8

Максимально допустимі значення В/Ц, які забезпечують морозостійкість гідротехнічного бетону

| Умови роботи бетону  | Залізобетонні конструкції у воді |      | Бетонні і малоармовані масивні конструкції у воді |      |
|--|----------------------------------|------|---|------|
|  |                                  |      |   |      |
| У частинах споруд, розташованих в зоні змінного рівня води; у суворих кліматичних умовах | 0,5                              | 0,55 | 0,55  | 0,6  |
|  | 0,55                             | 0,6  | 0,6   | 0,65 |
| у помірних і м'яких кліматичних умовах   |                                  |      |   |      |

| Умови роботи бетону  | Залізобетонні конструкції у воді |      | Бетонні і малоармовані масивні конструкції у воді |      |
|--|----------------------------------|------|---|------|
|  |                                  |      |   |      |
| У частинах споруд, які постійно знаходяться під водою:       |                                  |      |   |      |
| напірних   | 0,55                             | 0,6  | 0,6   | 0,65 |
| безнапірних  | 0,6                              | 0,65 | 0,65  | 0,65 |
| У надводних частинах споруд, які епізодично омиваються водою | 0,65                             | 0,65 | 0,7   | 0,7  |

Проектування складів гідротехнічного бетону з великою кількістю нормованих параметрів відноситься до найбільш складних задач багатопараметричного проектування складів бетону.

**Приклад 4.6.** Розрахувати склади цементних бетонів для двошарового покриття автомобільної дороги з класами за міцністю  $B_{tb}3,2$  і  $B25$  для верхнього шару і  $B_{tb}2,8$  і  $B20$  для нижнього шару. Бетонне покриття повинне мати у верхньому шарі модуль пружності ( $E$ ) не менший  $3,15 \cdot 10^6$  МПа, у нижньому  $2,9 \cdot 10^5$  МПа. Марки бетону за морозостійкістю: верхнього шару  $F200$ , нижнього  $F100$ , бетонна суміш укладається в покриття бетоноукладальною машиною ( $OK=2$  см).

Вихідні матеріали: портландцемент  $M500$ ,  $НГ=25,5\%$ ; кварцевий пісок із модулем крупності  $M_k=2,2$ , вмістом відмулюваних домішок  $2,5\%$ , щільністю  $\rho_{п}=2,67$  кг/л,  $\rho_{о.п}=1,55$  кг/л; гранітний щебінь двох фракцій:  $5 \dots 20$  і  $20 \dots 40$  (прийняти їх співвідношення з умови найбільшої щільності  $40 : 60$ ),  $\rho_{щ}=2,7$  кг/л,  $\rho_{о.щ}=1,4$  кг/л; вміст відмулюваних домішок  $0,8\%$ . Вводиться повітряновтягувальна добавка.

1. Визначимо за формулами (4.3) і (4.4) середній рівень міцності бетону на стиск ( $R_{ст}$ ) і на розтяг при згині ( $R_{p,зг}$ ). Приймемо  $C_v=0,135$ .

$$R_{ст} = \frac{B}{0,778} \cdot 1,12; \quad R_{p,зг} = \frac{B_{tb}}{0,778} \cdot 1,12$$

Для верхнього шару дорожнього покриття.

$$R_{ст}^B = 36 \text{ МПа}; R_{p.zr}^B = 4,6 \text{ МПа.}$$

Для нижнього шару дорожнього покриття:

$$R_{ст}^B = 29 \text{ МПа}; R_{p.zr}^B = 4 \text{ МПа.}$$

2. За усередненою кореляційною формулою (табл. 1.1) визначимо необхідну міцність на стиск ( $R_{ст}$ ), яка забезпечує міцність при згині:

$$R_{ст.1} = \left( \frac{R_{p.zr}}{0,08} \right)^{1,5} / 10.$$

Для верхнього шару дорожнього покриття:

$$R_{ст.1}^B = \left( \frac{4,6}{0,08} \right)^{1,5} / 10 = 43,6 \text{ МПа.}$$

Для нижнього шару дорожнього покриття:

$$R_{ст.1}^H = \left( \frac{4}{0,08} \right)^{1,5} / 10 = 35,3 \text{ МПа.}$$

3. Позначимо співвідношення  $\frac{B + V_{п}}{\Pi}$  як  $q$  ( $V_{п}$  - об'єм втягнутого повітря). Використаємо для розрахунку  $q$  формулу (2.33). При  $D=0$  і врахуванні в мультиплікативному коефіцієнті  $RA_1$  лише коефіцієнта  $A$ , який залежить від якості вихідних матеріалів, формула істотно спроститься і прийме вигляд

$$R_{ст} = AR_{п} \left( \frac{\Pi}{B + V_{п}} - 0,5 \right).$$

4. Уточнимо значення  $A$  за формулами 2.17...2.20:

$A_0 = 0,596$ ;  $\Delta A_1 = 0$  (поправка на ОК);  $\Delta A_2 = -0,01$  (поправка на найбільшу крупність щебеню);  $\Delta A_3 = 0,015$  (поправка на НГ цементного тіста);  $\Delta A_4 = -0,0112$  (поправка на  $M_{кр}$  піску);

$$A = A_0 + \sum \Delta A_i = 0,59;$$

$$q = \frac{AR_{п}}{R_{ст} + 0,5AR_{п}}.$$

Для верхнього шару дорожнього покриття:

$$q^B = \frac{0,59 \cdot 50}{43,6 + 0,5 \cdot 0,59 \cdot 50} = 0,50.$$

Для нижнього шару дорожнього покриття:

$$q^n = \frac{0,59 \cdot 50}{35,3 + 0,5 \cdot 0,59 \cdot 50} = 0,59.$$

5. Визначимо повітряно-цементне відношення  $\left(\frac{V_e}{\Pi}\right)$ , необхідне для

досягнення заданої морозостійкості бетону.

З формули (2.73), прийнявши коефіцієнт ущільнення  $K_y=1$ , знайдемо:

$$\frac{V_e}{\Pi} = \frac{F_k(q - 0,5\alpha) - 0,06\alpha}{1 + F_k},$$

де  $V_e$  - об'єм емульгованого повітря, втягнутого в бетонну суміш повітряновтягувальною добавкою.

При  $\frac{V_e}{\Pi} \leq 0$  необхідна морозостійкість забезпечується без повіт-

рянновтягувальної добавки.

Значення  $F_k$  у наведеній вище формулі залежить від нормованої морозостійкості ( $F$ ). З рівняння (2.83):

$$F_k = 1g\left(\frac{F}{K} + 1\right).$$

Прийmemo  $K$  рівним 170. Значення ступеня гідратації визначимо з формули (2.80):

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{XR_{\sigma}}{238}}, \text{ де } X = \left(\frac{q}{\text{НГ} / 100}\right)^{0,68}.$$

Для верхнього шару дорожнього покриття:

$$X^B = \left(\frac{0,5}{0,255}\right)^{0,68} = 1,58; \quad \alpha^B = \sqrt[3]{\frac{1,58 \cdot 43,6}{238}} = 0,66.$$

$F_k=0,33$  (при  $F=200$ ).

$$\left(\frac{V_e}{\Pi}\right)^B = \frac{0,33 \cdot (0,5 - 0,5 \cdot 0,66) - 0,06 \cdot 0,66}{1 + 0,33} = 0,012.$$

Для нижнього шару дорожнього покриття:

$$X^n = \left(\frac{0,59}{0,255}\right)^{0,68}; \quad \alpha^n = \sqrt[3]{\frac{1,76 \cdot 35,3}{238}} = 0,64.$$

$F_k=0,2$  (при  $F=100$ ).

$$\left(\frac{V_c}{\text{Ц}}\right)^n = \frac{0,2 \cdot (0,59 - 0,5 \cdot 0,64) - 0,06 \cdot 0,64}{1 + 0,2} = 0,013.$$

Знайдемо за рівнянням (2.67) об'єм зацементованого повітря  $V_3$ , яке втягується в бетонну суміш при вібруванні.

Для верхнього і нижнього шарів дорожнього покриття:

$$V_3 = 12,8 \text{ л/м}^3.$$

6. Визначимо водо-цементне відношення:  $(B/\text{Ц})^* = q - \frac{V_c}{\text{Ц}}$

Для верхнього шару дорожнього покриття:

$$(B/\text{Ц})_в^* = 0,50 - 0,012 \approx 0,49.$$

Для нижнього шару дорожнього покриття:

$$(B/\text{Ц})_н^* = 0,59 - 0,013 \approx 0,58.$$

7. Визначимо витрату води ( $B^*$ ) для ОК=2 см із врахуванням об'єму зацементованого повітря:  $B^* = B + V_3$ .

Витрату води ( $B$ ) уточнимо за формулами (3.25, 3.29) і табл.3.1.

$$B_0 = 164 \text{ л/м}^3; \Delta B_7 = 6,4 \text{ л/м}^3; \text{ (поправка на } M_{кр} \text{ піску);}$$

$$\Delta B_{11} = -10 \text{ л/м}^3 \text{ (поправка на НГ цементного тіста).}$$

$$B = B_0 + \sum B_i = 160,4 \text{ л/м}^3;$$

$$B^* = B + V_3 = 173 \text{ л/м}^3.$$

8. Визначимо витрату цементу за формулою:

$$\text{Ц} = \frac{B^*}{(B/\text{Ц})^*}.$$

Для верхнього шару дорожнього покриття:

$$\text{Ц}^в = \frac{173}{0,49} = 353 \text{ кг/м}^3.$$

Для нижнього шару дорожнього покриття:

$$\text{Ц}^н = \frac{173}{0,58} = 298 \text{ кг/м}^3.$$

9. Знаючи масову долю цементного тіста в бетоні для верхнього шару  $P_{\tau}^в = 0,526$  і нижнього шару  $P_{\tau}^н = 0,471$ , за формулою (2.128)

перевіримо відповідність розрахункових значень модуля пружності заданим. Для верхнього шару розрахункове значення  $E_6^B = 4,9 \cdot 10^6$  МПа, нижнього шару  $E_6^H = 4,78 \cdot 10^6$  МПа. Для обох шарів дорожнього покриття розрахунковий модуль пружності більший заданого.

10. Для визначення витрати щебеню розрахуємо (3.74...3.79) коефіцієнт розсуву  $\alpha_p$ . Пустотність піску і щебеню:

$$P_n = 0,42 \text{ і } P_{щ} = 0,48;$$

$$\alpha_p = \alpha_{p.o} + \sum \Delta\alpha_{p,i} = 1,244.$$

Витрату щебеню знаходимо за формулою:

$$\Pi = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{щ}} + \alpha_p P_{щ} \frac{1}{\rho_{o.щ}}}.$$

Загальна витрата щебеню -  $\Pi = 1256$  кг/м<sup>3</sup>, в т.ч. фракції 5-20 мм - 502 кг/м<sup>3</sup>, фракції 20-40 мм - 754 кг/м<sup>3</sup>.

11. Визначимо об'єм емульгованого повітря за формулою:

$$V_e = \frac{V_e}{\Pi} \cdot \Pi.$$

Для верхнього шару  $V_e^B = 4,5$  л/м<sup>3</sup>, нижнього шару  $V_e^H = 4$  л/м<sup>3</sup>.

1. Витрату піску знайдемо з урахуванням втягнутого повітря:

$$\Pi = \left( 1000 - \frac{\Pi}{3,1} - \frac{\Pi}{2,7} - B - V_e \right) \rho_n.$$

Для верхнього шару дорожнього покриття:

$$V_n^B = V_e^B + V_3 = 17,3 \text{ л/м}^3; \Pi = 650 \text{ кг/м}^3.$$

Для нижнього шару дорожнього покриття:

$$V_n^H = V_e^H + V_3 = 16,8 \text{ л/м}^3; \Pi = 698 \text{ кг/м}^3.$$

Приведемо остаточні склади бетону:

Верхній шар -  $\Pi = 353$  кг/м<sup>3</sup>;  $B = 160$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Pi = 1256$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Pi = 650$  кг/м<sup>3</sup>;  $V_n = 17,3$  л/м<sup>3</sup>;

Нижній шар -  $\Pi = 298$  кг/м<sup>3</sup>;  $B = 160$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Pi = 1256$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Pi = 698$  кг/м<sup>3</sup>;  $V_n = 16,8$  л/м<sup>3</sup>.

У даному прикладі необхідний розрахунковий об'єм емульгованого повітря виявився дуже низьким. На практиці для забезпечення гарантованої морозостійкості об'єм втягнутого повітря часто прийма-



ють значно вищим - 40-50 л/м<sup>3</sup>. При цьому необхідно відповідно зменшувати В/Ц и витрата піску.

**Приклад 4.7.** Розрахувати склади бетону для облицювання каналу класів по міцності на стиск В15, осьовий розтяг В<sub>тв</sub>1,2, розтяг при вигині В<sub>тв</sub>2,4; із маркою за морозостійкістю F300 і коефіцієнтом фільтрації в 28-добовому віці K<sub>ф</sub>=1,5 · 10<sup>-10</sup> см/с. Осадка конуса бетонної суміші 2 см. Характеристика вихідних матеріалів така ж як і в прикладі 4.6.

1. Визначимо за формулами 4.3 і 4.4 середній рівень міцності бетону на стиск (R<sub>ст</sub>), на розтяг при згині (R<sub>п.зг</sub>) і на осьовий розтяг (R<sub>п</sub>):

$$R_{ст} = \frac{B}{0,778} \cdot 1,12 = 21,6 \text{ МПа}; \quad R_{п.зг} = \frac{B_{тв}}{0,778} \cdot 1,12 = 3,7 \text{ МПа};$$

$$R_{п} = \frac{B_1}{0,778} \cdot 1,12 = 1,7 \text{ МПа}.$$

2. За кореляційними формулами (табл.1.1) визначимо значення міцності на стиск, які забезпечують міцність на розтяг при згині (R<sub>ст1</sub>) і осьовому розтягу (R<sub>ст2</sub>):

$$R_{ст1} = \left( \frac{R_{п.зг}}{0,08} \right)^{1,5} / 10 = 31,5 \text{ МПа};$$

$$R_{ст2} = \left( \frac{R_{п}}{0,046} \right)^{1,5} / 10 = 30 \text{ МПа}.$$

3. Визначимо за формулою (2.102) необхідну міцність бетону на стиск (R<sub>ст3</sub>), яка забезпечує нормований коефіцієнт фільтрації:

$$R_{ст3} = \left( \frac{K_{ф}}{100} \right)^{-0,13} = 34,5 \text{ МПа}.$$

Нadalі для розрахунку приймаємо міцність на стиск 34,5 МПа і визначаємо так само, як і в прикладі 4.6 параметри складу, які забезпечують необхідну морозостійкість бетону.

4. Використовуючи формулу (2.33), визначимо співвідношення q:

$$q = \frac{AR_{ст}}{R_{ст} + 0,5AR_{ст}} = \frac{0,59 \cdot 50}{34,5 + 0,5 \cdot 0,59 \cdot 50} = 0,6.$$

Знайдемо повітряно-цементне відношення  $\frac{V_{е}}{\text{Ц}}$ :

Ступінь гідратації цементу:

$$X = \left( \frac{q}{\text{НГ} / 10} \right)^{0,68} = 1,8;$$

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{X R_{\text{г}}}{238}} = \sqrt[3]{\frac{1,8 \cdot 34,5}{238}} = 0,638.$$

З формули (2.73) знайдемо:

$$\frac{V_e}{\text{Ц}} = 0,06.$$

6. Визначимо за рівнянням (2.67) об'єм защемленого повітря  $V_3$ , яке втягується в бетонну суміш при вібруванні:

$$V_3 = 12,8 \text{ л/м}^3.$$

7. Визначимо витрату води ( $B^*$ ) із врахуванням об'єму защемленого повітря:

$$B^* = B + V_3 = 160,4 + 12,8 \approx 173 \text{ л/м}^3.$$

8. Витрата цементу ( $\text{Ц}$ ):

$$\text{Ц} = \frac{B^*}{(B/\text{Ц})^*};$$

$$\left( \frac{B}{\text{Ц}} \right)^* = q - \frac{V_e}{\text{Ц}} = 0,54; \quad \text{Ц} = \frac{173}{0,54} = 320 \text{ кг/м}^3.$$

9. Об'єм емульгованого повітря:

$$V_e = \text{Ц} \cdot \frac{V_e}{\text{Ц}} = 320 \cdot 0,06 = 19,2 \text{ л/м}^3.$$

10. Для визначення витрати щебеню розрахуємо з використанням рівнянь (3.73-3.76) коефіцієнт розсуву  $\alpha_p$ . Пустотність піску і щебеню:

$$P_{\text{п}} = 0,42; \quad P_{\text{ш}} = 0,48;$$

$$\alpha_p = \alpha_{p,0} + \sum \Delta \alpha_{p,i} = 1,19;$$

$$\text{Щ} = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{\text{щ}}} + \alpha_p P_{\text{ш}} \frac{1}{\rho_{0,\text{щ}}}} = 1283 \text{ кг/м}^3.$$

11. Витрату піску знайдемо з врахуванням емульгованого повітря:

$$\text{П} = \left( 1000 - \frac{\text{Ц}}{3,1} - \frac{\text{Щ}}{2,7} - B - V_e \right) \rho_{\text{п}} = 612 \text{ кг/м}^3.$$

Остаточний склад бетону:

$$\text{Ц}=320 \text{ кг/м}^3; \text{ В}=160 \text{ кг/м}^3; \text{ Щ}=1286 \text{ кг/м}^3; \text{ П}=612 \text{ кг/м}^3; \\ V_{\text{в}}=32 \text{ л/м}^3.$$

**Приклад 4.8.** Розрахувати склад бетону для греблі ГЕС класу В15 у віці 180 діб. з температурою розігріву в 28 діб не більше 28°C. Визначити необхідну температуру укладки бетонної суміші при використанні:

а) портландцементу М400, НГ=25,5%;

б) шлакопортландцементу М300, НГ=26,2%; ОК=2 см.

Характеристика заповнювачів така ж як у прикладі 4.6.

1. За формулами (4.3) і (4.4) визначимо рівень міцності бетону в 180 діб, а потім за логарифмічною залежністю знайдемо середній рівень міцності бетону в 28 діб при  $C_v=0,135$ :

$$R_{\text{ст}}^{180} = \frac{15}{0,778} \cdot 1,12 = 22 \text{ МПа}; \quad R_{\text{ст}} = 14 \text{ МПа}.$$

2. Визначимо за формулою (2.13) необхідні В/Ц. При використанні портландцементу:

$$\text{В/Ц} = \frac{0,59 \cdot 40}{14 + 0,5 \cdot 0,59 \cdot 40} = 0,9.$$

При використанні шлакопортландцементу:

$$\text{В/Ц} = \frac{0,59 \cdot 30}{14 + 0,5 \cdot 0,59 \cdot 30} = 0,77.$$

3. Витрату води (В) уточнимо за формулами (3.25, 3.29) і табл.3.1. При використанні портландцементу:

$$\text{В} = \text{В}_0 + \sum \text{В}_i = 160 \text{ л/м}^3.$$

При використанні шлакопортландцементу:

$$\text{В} = \text{В}_0 + \sum \text{В}_i = 163 \text{ л/м}^3.$$

4. Витрати цементу (Ц) визначимо за формулою:

$$\text{Ц} = \frac{\text{В}}{(\text{В/Ц})}.$$

При використанні портландцементу:  $\text{Ц}=178 \text{ кг/м}^3$ , шлакопортландцементу:  $\text{Ц}=212 \text{ кг/м}^3$ .

5. Знайдемо тепловиділення бетону за формулою (2.111). Прийемо за табл.2.26 або за рівняннями (2.121) і (2.22)  $q_{28}$  для портландцементу при 15°C 315 кДж/кг, шлакопортландцементу 250 кДж/кг.

Для портландцементу:

$$Q_{28}^{\text{пц}} = 315 \cdot 178 = 56070 \text{ кДж.}$$

Для шлакопортландцементу:

$$Q_{28}^{\text{шпц}} = 250 \cdot 212 = 53000 \text{ кДж.}$$

6. Температуру укладки бетонної суміші ( $t_0$ ) визначимо з умови

$$(2.105): \quad t_0 \leq t_{\text{крпл.}} - K \frac{Q}{C\rho}.$$

Прийmemo  $K=0,8$ ;  $C=0,966 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;  $\rho=2400 \text{ кг/м}^3$ . Тоді: при застосуванні портландцементу:

$$t_0 \leq 28 - 0,8 \frac{56070}{0,966 \cdot 2400} \leq 8^\circ \text{C};$$

при застосуванні шлакопортландцементу:

$$t_0 \leq 28 - 0,8 \frac{53000}{0,966 \cdot 2400} \leq 10^\circ \text{C}.$$

7. Витрати заповнювачів можна знайти, розрахувавши за рівнянням (3.79) коефіцієнт розсуву  $\alpha_p$ , а потім витрати щебеню (Щ) і піску (П).

При застосуванні портландцементу:

$$\text{Щ}=1283 \text{ кг/м}^3; \text{ П}=820 \text{ кг/м}^3.$$

При застосуванні шлакопортландцементу:

$$\text{Щ}=1283 \text{ кг/м}^3; \text{ П}=783 \text{ кг/м}^3.$$

Наведемо склади бетону.

При застосуванні портландцементу:

$$\text{Ц}=178 \text{ кг/м}^3; \text{ Щ}=1283 \text{ кг/м}^3; \text{ П}=820 \text{ кг/м}^3; \text{ В}=160 \text{ кг/м}^3.$$

При застосуванні шлакопортландцементу:

$$\text{Ц}=212 \text{ кг/м}^3; \text{ Щ}=1283 \text{ кг/м}^3; \text{ П}=783 \text{ кг/м}^3; \text{ В}=160 \text{ кг/м}^3.$$

**Приклад 4.9.** Розрахувати склад бетону класу В15 у віці 28 діб гідротехнічної споруди товщиною  $L=0,50 \text{ м}$ , яка експлуатується у м'якій воді під напором  $H=5 \text{ м}$ . Розрахунковий термін служби споруди  $\tau=50$  років. Застосовується портландцемент М400, НГ=25,5% із вмістом оксиду кальцію  $q_{\text{Ca}}=0,65 \text{ р}$  на 1 гр. цементу. Допустимий ступінь вилугування  $\text{Ca}$ , що не приводить до істотного зниження міцності, від сумарного вмісту цементу прийняти  $\alpha_b=0,2$ ; середню концентрацію  $\text{Ca}$  за час вилугування  $C_p=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ . Експериментально встановлено, що кількість ваги, яка може бути винесена з бетону без втрати ним несучої здатності  $Q_{\text{ар}}=1,95 \text{ г/см}^3$ .

Бетонна суміш має ОК=2 см. Характеристика заповнювачів така ж як у прикладі 4.6.

1. Визначимо з формули (2.91) мінімально необхідну витрату цементу при допустимому ступені вилугування, який забезпечує несучу здатність бетону:

$$\text{Ц} = \frac{Q_{\text{агр}}}{\alpha_{\text{в}} \cdot q_{\text{СаО}} \cdot L} = \frac{1,95}{0,2 \cdot 0,65 \cdot 50} = 0,3 \text{ г/см}^3,$$

або 300 кг/м<sup>3</sup>.

2. Знайдемо необхідний коефіцієнт фільтрації бетону за формулою (2.89):

$$K_{\Phi} = \frac{1,95 \cdot 50}{(0,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (5 \cdot 100) \cdot (50 \cdot 368 \cdot 86400)} = 2,47 \cdot 10^{-10} \text{ см/с.}$$

3. Визначимо за залежністю (2.99) міцність бетону, необхідну для забезпечення розрахункового коефіцієнта фільтрації:

$$R_{\text{ст}} = \left( \frac{K_{\Phi}}{100} \right)^{-0,13} = 32,3 \text{ МПа.}$$

4. Знайдемо за формулою (2.13) необхідне В/Ц:

$$\text{В/Ц} = \frac{0,59 \cdot 50}{32,3 + 0,5 \cdot 0,59 \cdot 50} = 0,63.$$

5. Визначимо витрати води і цементу.

Витрату води (В) визначаємо за формулами (3.25,3.29) і табл.3.1:

$$\text{В} = \text{В}_0 + \sum \text{В}_i = 160 \text{ л/м}^3.$$

Витрату цементу, яка забезпечує необхідну міцність, розраховуємо за формулою:

$$\text{Ц} = \frac{\text{В}}{\text{В/Ц}} = 255 \text{ кг/м}^3.$$

Для подальшого розрахунку приймаємо Ц=300 кг/м<sup>3</sup>; В=160 л/м<sup>3</sup>.

6. Знайдемо витрату щебеню з використанням рівнянь (3.73-3.76) за формулою:

$$\text{Щ} = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{\text{щ}}} + \alpha_{\text{р}} P_{\text{щ}} \frac{1}{\rho_{\text{о.щ}}}} = 1283 \text{ кг/м}^3.$$

Тут пустотність піску і щебеню:

$$P_n=0,42; P_{нr}=0,48.$$

Коефіцієнт розсуву  $\alpha_p=1,19$  (див. приклад 4.7).

7. Визначимо витрату піску:

$$П = \left( 1000 - \frac{300}{3,1} - \frac{1283}{2,7} - 160 \right) \cdot 2,67 = 716 \text{ кг/м}^3.$$

Склад бетону:

$$Ц=300 \text{ кг/м}^3; Щ=1283 \text{ кг/м}^3; П=716 \text{ кг/м}^3; В=160 \text{ кг/м}^3.$$

**Приклад 4.10.** Запроектувати склад бетону зовнішньої зони водозливної греблі з наступними показниками властивостей у віці 180 діб: клас бетону за міцністю В15; водонепроникність W8; гранична розтягуваність не менша  $7 \cdot 10^{-5}$ ; лінійна усадка не більша  $0,7 \cdot 10^{-3}$ . Морозостійкість бетону у віці 28 діб F300.

Передбачено охолодження бетонної суміші в літні місяці до  $6^\circ\text{C}$ . Середньорічна температура  $10^\circ\text{C}$ . Допускається перевищення критичної температури бетону над середньорічною не більше ніж на  $30^\circ\text{C}$ .

Рухливість бетонної суміші відповідає осадці конуса 2 см. Застосовується портландцемент марки М500. Характеристика заповнювачів така ж як у прикладі 4.6.

1. Визначимо за формулами (4.3) і (4.4) міцність бетону на стиск, яка забезпечує клас В15 при  $C_v=0,135$  у віці 180 діб:

$$R_{ст}^{180} = 22 \text{ МПа.}$$

Перевіримо за формулою (2.132), чи забезпечується при даній міцності нормована гранична розтягуваність бетону. Отримаємо  $\epsilon_y = 5,8 \cdot 10^{-5}$ , що менше нормованого значення.

Перейдемо на клас по міцності В25.

$$R_{ст}^{180} = 36 \text{ МПа.}$$

При цьому  $\epsilon_y = 7 \cdot 10^{-5}$ , що відповідає нормованому значенню.

2. Визначимо міцність бетону у віці 28 діб. Прийнемо перехідний коефіцієнт  $A_{cr}=1,35$  (табл.2.13).

$$R_{ст} = \frac{R_{ст}^{180}}{A_{cr}} = 26,7 \text{ МПа.}$$

3. Визначимо за формулою (2.33) водо-повітряно-цементне відношення  $q$ :

$A=0,59$  (див. приклад 4.6)

$$q = \frac{0,59 \cdot 50}{26,7 + 0,5 \cdot 0,59 \cdot 50} = 0,7.$$

4. Знайдемо із застосуванням формули (2.73) повітряно-цементне відношення, необхідне для досягнення заданої морозостійкості бетону, попередньо визначивши за формулою (2.83) значення параметра  $F_k$  і за формулою (2.80) значення ступеня гідратації:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{X \cdot R_{ст}}{238}} = \sqrt[3]{\frac{2,0 \cdot 26,7}{238}} = 0,6;$$

$$F_k = \lg\left(\frac{F}{170} + 1\right) = 0,44;$$

$$\frac{V_c}{\Pi} = \frac{0,44 \cdot (0,7 - 0,5 \cdot 0,6) - 0,06 \cdot 0,6}{1 + 0,44} = 0,097.$$

5. Визначимо водо-цементне відношення, яке забезпечує необхідну морозостійкість:

$$(B/\Pi)^* = q - \frac{V_c}{\Pi} = 0,6.$$

6. Визначимо за рівнянням (2.67) об'єм защемленого повітря  $V_3$ , яке втягується в бетонну суміш при вібруванні:

$$V_3 = 12,8 \text{ л/м}^3.$$

7. Визначимо витрату води ( $B^*$ ) із врахуванням об'єму защемленого повітря (див. приклад 4.6):

$$B^* = B + V_3 = 160,4 + 12,8 = 173,2 \text{ л/м}^3.$$

Перевіримо за формулою (2.148) чи забезпечується при даній витраті води нормована лінійна усадка:

$$\epsilon_{yc} = 0,125 \cdot B \sqrt{B} \cdot 10^{-6} = 0,25 \cdot 10^{-3}.$$

Розрахункове значення лінійної усадки менше гранично допустимого.

8. Розрахуємо витрату цементу:

$$\Pi = \frac{B^*}{(B/\Pi)^*} = 289 \text{ кг/м}^3 \quad (B/\Pi = 160:289 = 0,55).$$

9. Знаходимо максимально допустиме значення тепловиділення бетону за формулою (2.105), прийнявши питому теплоємність бетону  $C=0,966$  кДж/кг; щільність  $\rho_0=2400$  кг/м<sup>3</sup>;  $K=0,7$ . Прийємо середню температуру твердіння бетону:

$$t_{\text{сер.}} = \frac{t_0 + t_{\text{крит}}}{2} \approx 20^\circ \text{C};$$

$$Q = \frac{0,966 \cdot 2400}{0,7} ((30+10) - 6) = 112608 \text{ кДж/м}^3.$$

10. Прийнявши питоме тепловиділення портландцементу при  $t_{\text{сер.}}=20^\circ\text{C}$  за табл.2.26 або рівнянням (2.121)  $378$  кДж/кг, знайдемо за формулою (2.111) витрату цементу, гранично допустиму з умови тепловиділення:

$$\Pi_Q = \frac{112608}{378} = 298 \text{ кг/м}^3.$$

Оскільки розрахована витрата цементу  $289$  кг/м<sup>3</sup> менша гранично допустимої з умови тепловиділення, остаточно для розрахунку приймаємо  $\Pi=289$  кг/м<sup>3</sup>.

11. Об'єм емульгованого повітря:

$$V_e = \Pi \cdot \frac{V_e}{\Pi} = 289 \cdot 0,097 = 28 \text{ л/м}^3.$$

Загальний об'єм повітря:

$$V = V_e + V_3 = 12,8 + 28 = 40,8 \approx 41 \text{ л/м}^3.$$

12. Визначимо за допомогою формули (2.103) необхідне  $(B/\Pi)_w$  для забезпечення необхідної марки за водонепроникністю, прийнявши до уваги, що в 180 діб вона збільшується в порівнянні з 28-добовою не менше ніж у 3 рази [47]:

$$(B/\Pi)_w = \frac{A(R_{\text{ст}}/100)}{W + 0,5 \cdot A \cdot (R_{\text{ц}}/100)} \quad \text{де } A = 1 + \sum \Delta A_i = 1;$$

$$(B/\Pi)_w = \frac{500/100}{(8/3) + (0,5 \cdot 500/100)} = 0,97.$$

Оскільки  $(B/\Pi) < (B/\Pi)_w$ , остаточно приймаємо  $B/\Pi=0,55$ .

13. Витрати заповнювачів визначимо, розраховавши за рівнянням (3.79) коефіцієнт розсуву  $\alpha_p$ , а потім витрати щебеню і піску з врахуванням об'єму втягнутого повітря:



$$\text{Щ}=1283 \text{ кг/м}^3; \text{П}=616 \text{ кг/м}^3.$$

Розрахунковий склад бетону:

$$\text{Ц}=289 \text{ кг/м}^3; \text{В}=160 \text{ л/м}^3; \text{Vв}=41 \text{ л/м}^3; \text{П}=616 \text{ кг/м}^3;$$

$$\text{Щ}=1283 \text{ кг/м}^3.$$

**Приклад 4.11.** Запроектувати за допомогою математичних моделей (2.28а, 2.84, 2.98, 3.31, 3.82) склади гідротехнічних бетонів наступних класів і марок: В15, F150, W6, B25, F200, W8 і B25, F300, W8. Проектний вік бетону 28 діб. Рухливість бетонної суміші 3-5 см.

Склади бетонів розрахувати без добавок, із повітряновтягувальною (СНП) і пластифікуючою (ЛСТ) добавками.

Вихідні матеріали: портландцемент із мінеральними добавками М400, НГ=27%; кварцевий пісок із  $M_k=2,1$ ;  $\rho_p=2,65$  кг/л; гранітний щебінь крупністю 5-40 мм,  $\rho_{щ}=2,67$  кг/л.

1. Визначимо за (4.3) і (4.4) при  $C_V=0,135$  необхідні значення  $R_{ст}$ , які забезпечують задані класи бетону за міцністю, потім при заданих значеннях міцності, морозостійкості і водонепроникності знайдемо необхідні значення Ц/В (табл. 4.10).

При використанні пластифікуючої добавки ЛСТ витрата води розраховується з врахуванням коефіцієнтів за табл.3.2, повітряновтягувальною (СНП) - із врахуванням очікуваної кількості втягнутого повітря (табл. 4.9).

2. Розрахуємо оптимальні витрати повітряновтягувальної добавки, які забезпечують задані властивості бетону при Ц/В<sub>(min)</sub>.
3. Використовуючи модель водопотреби бетонної суміші, знайдемо необхідну витрату води (табл. 4.10).
4. Розрахуємо необхідні значення витрати цементу (табл. 4.10).
5. Уточнимо об'єм емульгованого повітря при розрахунковому вмісті добавки, витраті води і цементу за допомогою наведеного нижче рівняння регресії, справедливого при заданих матеріалах:

$$Y_V = 2,27 - 0,72X_1 - 0,63X_2^1 - 0,47X_3 + 2,14X_9 - 0,18X_5 - 0,20X_1^2 + 0,24(X_1^2)^2 + 0,17X_3^2 - 0,22X_9^2 - 0,09X_5^2 - 0,13X_1X_2 + 0,21X_1X_9 - 0,64X_2X_9 - 0,46X_3X_9 - 0,13X_3X_5 - 0,19X_9X_5$$

Значення  $X_1, X_3, X_5, X_9$  наведені в табл.2.7 і 3.4,  $X_2^1 = (\text{Ц}-378)/144$ .

6. За рівнянням (3.82) знайдемо оптимальне значення доли піску в суміші заповнювачів, а потім витрати піску і щебеню (табл. 4.10).

Таблиця 4.9

Орієнтовний вміст емульгованого повітря (до прикладу 4.11)

| Проектні марки бетону |                 |                   | Об'єм емульгованого повітря |
|-----------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|
| Міцність на стиск     | Морозостійкість | Водонепроникність |                             |
| 200                   | 200             | 4-6               | 2,5-3,5                     |
|                       | 300             | 4-6               | 4-4,5                       |
| 300                   | 200             | 6                 | 1,5-2                       |
|                       | 300             | 6-8               | 2,5-3                       |
|                       | 400             | 6-8               | 3,5-4                       |
| 400                   | 300             | 8-10              | 2,5-3                       |
|                       | 400             | 10                | 3,5-4                       |
|                       | 500             | 10-12             | 4-4,5                       |

Таблиця 4.10

Розрахункові склади бетону (до прикладу 4.11)

| Проектні марки бетону |                 |                   | Склад бетону, кг/м <sup>3</sup> |      |                      |                      |                      |                      |
|-----------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Міцність на стиск     | Морозостійкість | Водонепроникність | Ц/В                             | г    | Ц, кг/м <sup>3</sup> | В, кг/м <sup>3</sup> | П, кг/м <sup>3</sup> | Щ, кг/м <sup>3</sup> |
|                       |                 |                   |                                 |      |                      |                      |                      |                      |
| 300                   | 200             | 8                 | 2,0                             | 0,33 | 362                  | 181                  | 590                  | 1223                 |
| 300                   | 300             | 8                 | 2,5                             | 0,31 | 475                  | 190                  | 519                  | 1178                 |
| Добавка СНП (0,02%)   |                 |                   |                                 |      |                      |                      |                      |                      |
| 300                   | 200             | 8                 | 1,8                             | 0,34 | 311                  | 173                  | 630                  | 1246                 |
| 300                   | 300             | 8                 | 2,1                             | 0,31 | 380                  | 181                  | 550                  | 1249                 |
| Добавка ЛСТ (0,25%)   |                 |                   |                                 |      |                      |                      |                      |                      |
| 200                   | 150             | 6                 | 1,95                            | 0,35 | 312                  | 160                  | 660                  | 1250                 |
| 300                   | 200             | 8                 | 2,0                             | 0,34 | 320                  | 163                  | 635                  | 1256                 |
| 300                   | 300             | 8                 | 2,5                             | 0,34 | 428                  | 171                  | 599                  | 1186                 |

#### 4.4. Бетон, який застосовують взимку

При бетонуванні взимку ставиться задача забезпечення заданих властивостей, у першу чергу деякої мінімальної міцності, до визначеного моменту часу - коли можливе замерзання бетону. Ця вимога повинна враховуватись як при проектуванні складу бетону, так і при призначенні умов його укладки і твердіння. До числа таких особливих умов можна віднести підвищену волого- і теплоізоляцію опалубки, попередній розігрів бетонної суміші або електропрогрів укладеного бетону, використання добавок - прискорювачів твердіння, протиморозних або пластифікуючих.

У залежності від характеру обмежень, які враховуються, можна виділити кілька основних типів задач проектування складу:

- із заданими характеристиками вихідних матеріалів, параметрами нагрівання і твердіння (термосного витримування) бетону;
- із заданими параметрами нагрівання і термосного витримування бетону та можливістю вибору виду і марки цементу;
- з можливістю вибору виду і марки цементу, параметрів нагрівання і термосного витримування бетону.

Таким чином, розрахунок складу бетону зводиться до розв'язання оптимізаційної задачі з використанням:

- рівняння марочної міцності бетону;
- умови теплового балансу, при яких забезпечується необхідний тепловологісний режим твердіння бетону;
- рівняння наростання міцності бетону в часі для прийнятих температурно-вологісних параметрів режиму твердіння
- умов методу абсолютних об'ємів.

Критеріями оптимальності в такій задачі можуть бути мінімальна витрата цементу, енерговитрати або вартість бетону з врахуванням нагрівання суміші, електропрогріву бетону і виготовлення відповідної опалубки. Можлива постановка задач оптимізації з метою досягнення заданого критерію оптимальності, наприклад, мінімальної вартості при наявних обмеженнях за енергоресурсами і витраті цементу.

Як рівняння марочної міцності бетону може бути прийнята узагальнена формула його міцності (2.33).

$$Q_{п.см.} + Q_{екз.ц.} = Q_{оп.} + Q_{арм.} + Q_{втр.} \quad (4.23)$$

де  $Q_{п.см.}$  - початковий тепловміст бетонної суміші,  $Q_{екз.ц.}$  - кількість тепла, яке виділяється за рахунок екзотермічних реакцій при твердінні

цементу;  $Q_{оп.}$  - теплові втрати на нагрівання опалубки;  $Q_{арм.}$  - теплові втрати на нагрівання арматури;  $Q_{втр.}$  - теплові втрати в навколишнє середовище.

Початковий тепловміст бетонної суміші знаходять за формулою:

$$Q_{п.см.} = c_b \rho_b (t_{б.п.} - t_{б.к.}) V_b, \quad (4.24)$$

де  $c_b$  - питома теплоємність бетону,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\rho_b$  - щільність бетону,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t_{б.п.}$  - початкова температура бетону перед охолодженням,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{б.к.}$  - кінцева температура бетону, до якої розраховують тривалість охолодження,  $^\circ\text{C}$ ;  $V_b$  - об'єм бетону в конструкції,  $\text{м}^3$ .

Екзотермію цементу за весь період твердіння знаходять за формулою:

$$Q_{екз.п.} = q_t \Pi, \quad (4.25)$$

де  $q_t$  - питома тепловиділення цементу,  $\text{кДж}/\text{кг}$  за формулами (2.121) і (2.122);  $\Pi$  - витрата цементу на  $1\text{ м}^3$  бетонної суміші.

Втрати тепла на нагрів опалубки знаходять по формулі

$$Q_{оп.} = c_{оп} M_{п} V_b \delta_{оп} \rho_{оп} (t_{п.оп.} - t_{б.к.}), \quad (4.26)$$

де  $c_{оп}$  - питома теплоємність матеріалу опалубки,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $M_{п}$  - модуль поверхні конструкції,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\delta_{оп}$  - товщина опалубки,  $\text{м}$ ;  $\rho_{оп}$  - густина матеріалу опалубки,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t_{п.оп.}$  - початкова температура опалубки перед охолодженням,  $^\circ\text{C}$ .

Втрати тепла на нагрів арматури знаходять за формулою

$$Q_{арм.} = c_{арм} \rho_{арм} V_b (t_{п.арм.} - t_{б.к.}), \quad (4.27)$$

де  $c_{арм}$  - питома теплоємність арматури,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\rho_{арм}$  - витрата арматури на  $1\text{ м}^3$  бетону,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t_{п.арм.}$  - початкова температура арматури перед охолодженням,  $^\circ\text{C}$ .

Втрати тепла в навколишнє середовище визначають за формулою [93]:

$$Q_{втр.} = 24 K M_{п} (t_{б.ср.} - t_{п.ср.}) \tau \quad (4.28)$$

де  $K$  - коефіцієнт теплопередачі опалубки,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_{б.ср.}$  - середня температура бетону за період охолодження конструкції,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{п.ср.}$  - середня температура повітря за період охолодження бетону,  $^\circ\text{C}$ ;  $\tau$  - тривалість охолодження бетону.

Модуль поверхні конструкції знаходять за формулою  $M_{п}=F/V$ , де  $F$  і  $V$  - відповідно площа поверхні і об'єм конструкції, а коефіцієнт теплопередачі опалубки визначають згідно рекомендації [93].

При заданій міцності бетону до моменту замерзання необхідну тривалість твердіння знаходять за відомими рекомендаціями щодо кінетики набору міцності бетоном при різних температурах твердіння. Апроксимація графічних і табличних залежностей, які широко використовуються для цієї мети [93], дозволяє одержати розрахункові формули типу

$$\eta = R_{\tau, t} / R_{28,20} = k_{\Pi} t \tau^{K_t}, \quad (4.29)$$

де  $\eta$  - рівень міцності бетону  $R_{\tau, t}$ , який твердіє при температурі  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) у віці  $\tau$  (днів) відносно марочної міцності при нормальному твердінні  $R_{28,20}$ ;  $k_{\Pi}$  - коефіцієнт, який залежить від виду цементу;  $K_t = f(t)$  - коефіцієнт, який залежить від температури твердіння.

Для портландцементу можна прийняти  $k_{\Pi} = 0,012$ ;  $K_t = 0,001(0,37t^2 - 25,7t + 814)$ . При розрахунку бетону без добавок приймають  $t = t_{6, \text{ср.}}$ , для бетону з протиморозними добавками і прискорювачами твердіння приймають  $t = t_{6, \text{ср.}} + \Delta t_{\text{д}}$ , де  $\Delta t_{\text{д}}$  - умовне підвищення температури твердіння за рахунок уведення добавки.

Із залежності (4.29) необхідний термін витримування бетону до досягнення заданого рівня міцності при замерзанні дорівнює

$$\tau = \left[ \frac{\eta}{k_{\Pi} t} \right]^{1/K_t} \quad (4.30)$$

Якщо не застосовують електропрогрів бетону, то у формулах (4.29) і (4.30) приймають  $t = t_{6, \text{ср.}}$ . При електропрогріві динаміка росту міцності бетону буде різною в різні періоди твердіння - при розігріві, ізотермічному прогріві й охолодженні бетону - тому що середні температури твердіння в кожний період будуть істотно відрізнятися одна від одної. Тому міцність на момент охолодження дорівнює:

$$R_{\tau} = \Delta R_{\tau'} + \Delta R_{\tau''} + \Delta R_{\tau'''} \quad (4.31)$$

де  $\Delta R_{\tau'}$ ,  $\Delta R_{\tau''}$  і  $\Delta R_{\tau'''}$  - приріст міцності за період розігріву, ізотермічного прогріву й охолодження відповідно.

Складові рівняння (4.31) можна визначити з (4.29):

$$\Delta R_{\tau'} = k_{\Pi} t' (\tau')^{K_{t'}} \cdot R_{28,20}; \quad (4.32)$$

$$\Delta R_{\tau''} = k_{\Pi} t'' \left[ (\tau' + \tau'')^{K_{t''}} - (\tau'')^{K_{t''}} \right] \cdot R_{28,20}; \quad (4.33)$$

$$\Delta R_{\tau'''} = k_{\Pi} t''' \left[ (\tau' + \tau'' + \tau''')^{K_{t'''}} - (\tau' + \tau'')^{K_{t'''}} \right] \cdot R_{28,20}, \quad (4.34)$$

де  $\tau'$  і  $t'$  - тривалість і середня температура розігріву бетону;  $\tau''$  і  $t''$  - тривалість і середня температура ізотермічного прогріву бетону;  $\tau'''$  і  $t'''$  - тривалість і середня температура охолодження бетону.

Критерієм ефективності обраного складу бетону з позицій витрати цементу може бути показник  $\Delta$  :

$$\Delta = (\text{Ц} - \text{Ц}_{\text{н.т.}}) / \text{Ц}_{\text{н.т.}}, \quad (4.35)$$

де  $\text{Ц}$  і  $\text{Ц}_{\text{н.т.}}$  - необхідна витрата цементу для досягнення заданої міцності відповідно при прийнятих і нормальних умовах твердіння бетону.

Для задач першого типу  $\Delta$  можна зменшити за рахунок добавок прискорювачів твердіння, переходу на більш жорсткі суміші, застосуванням ефективних пластифікаторів. Для задач другого типу додатковим ресурсом зменшення  $\Delta$  може бути перехід на цементі підвищеної екзотермії, а третього - збільшення термічного опору опалубки або збільшення різниці між початковою і кінцевою температурами витримування бетону.

У випадку, коли критерієм оптимальності термосного витримування бетону виступають енергетичні витрати на будівельному майданчику  $Q$ , цільовою функцією оптимізації буде

$$Q = K M_{\text{п}} (t_{\text{с.ср.}} - t_{\text{н.ср.}}) \tau + Q_{\text{ел.пр.}} - q_{\tau} \text{Ц}, \quad (4.36)$$

де  $Q_{\text{ел.пр.}}$  - енерговитрати на електропрогрів бетону.

За умови, що міцність бетону після термосного витримування повинна бути не нижчою заданої, за рівнянням (4.36) можна оцінити енергетичну ефективність різних можливих технологічних прийомів зменшення  $\Delta$  у межах кожного з зазначених типів задач, у тому числі і доцільності деякої перевитрати цементу.

Найбільш складними є задачі з використанням вартісного критерію оптимальності, особливо задача третього типу, коли оптимізація складу бетону розглядається нерозривно з оптимізацією параметрів термосного витримування бетону. У цьому випадку цільова функція:

$$Z = C_{\text{б.с.}} + C_{\text{оп.}} + C_{\text{нагр.}}, \quad (4.37)$$

де  $C_{\text{б.с.}}$  - вартість бетонної суміші на момент закінчення укладки;  $C_{\text{оп.}}$  - вартість опалубки;  $C_{\text{нагр.}}$  - вартість електропрогріву бетону.

Всі складові рівняння (4.37) взаємозалежні. До того ж розв'язання оптимізаційних задач пов'язане з деякими обмеженнями, викликаними наявністю матеріальних ресурсів і умовами виконання робіт.

На стадії проектування виконання бетонних робіт оптимізаційні розрахунки можуть застосовуватись для порівняння ефективності різних методів зниження витрати цементу і тривалості охолодження бетону до досягнення необхідної міцності, і таким чином, остаточного вибору методу виконання робіт.

У практиці проектування бетонних робіт можна виділити три характерних випадки:

1. Електропрогрів бетону не застосовується, а попередньо розігріту бетонну суміш укладають в опалубку і витримують методом термоса. Цей спосіб буде найбільш економним з позиції енергозатрат, однак він не оптимальний за витратою матеріальних ресурсів. Як правило, необхідна деяка перевитрата цементу, за рахунок екзотермії якого відбувається забезпечення необхідних умов твердіння, а також теплоізоляція опалубки чи застосування добавок. Алгоритм розрахунку оптимального складу бетону в цьому випадку наведений на рис. 4.6. Суть його полягає в тому, що визначається два значення витрати цементу. При першому з них гарантується досягнення марочної міцності. Друге знаходиться з умови теплового балансу і забезпечує таке тепловиділення, при якому необхідний на момент замерзання рівень міцності бетону досягається при заданій тривалості термосного витримування.

Якщо витрата цементу з умови тепловиділення виявиться значно більшою (тобто обчислене з формули (4.35)  $\Delta >> 5\%$ ), то застосовують один із вказаних вище методів зменшення витрати цементу (введення добавок, підвищення теплоізоляція бетону і т.п.). Коли прийняті міри все ж не забезпечують досягнення необхідного рівня міцності на момент замерзання, то підвищують марочну міцність бетону за рахунок деякої перевитрати цементу. При цьому можна знизити необхідний рівень міцності бетону на момент замерзання, що приведе до зменшення витрати цементу з умови тепловиділення.

Щоб знайти оптимальну величину перевитрати цементу, рівняння марочної міцності (2.33) і теплового балансу (4.33) слід розв'язати сумісно відносно  $\Pi$ . Для цього використовують один з методів послідовних наближень. У нашому випадку прийнятий метод половинного поділу. Розрахунок вважають завершеним, коли різниця між значеннями витрати цементу з умов міцності і тепло-

вого балансу не перевищує 5%. Більш детально методика розрахунку викладена у прикладі 4.12.

1. Бетонну суміш укладають в опалубку, розігрівають до більш високої температури електрострумом і далі застосовують термосне витримування. Цей спосіб досить економний як за енергозатратами, так і за витратою ресурсів. Порядок розрахунку наступний:
  - визначають В/Ц, витрату води і цементу з умови нормального твердіння;
  - з умови теплового балансу визначають мінімальну температуру  $t_{б.н.}$  розігріву бетону, при якій забезпечується досягнення необхідної міцності методом термоса без перевитрати цементу й утеплення опалубки;
  - визначають тривалість і режим розігріву бетону;
  - визначають енерговитрати і вартісні параметри.

Якщо отримане значення  $t_{б.н.}$  неприйнятне, призначають максимально можливе, і розраховують необхідні параметри термосного витримування за алгоритмом, наведеним на рис. 4.6. Методика розрахунків проілюстрована у прикладі 4.13.

2. Можливий ізотермічний прогрів бетону. При цьому за рахунок зміни тривалості прогріву можна досягти найбільш низької витрати цементу, однак при підвищених енергозатратах. Порядок розрахунку наступний:
  - визначають В/Ц, витрату води і цементу з умови нормального твердіння;
  - призначають температуру електропрогріву і визначають приріст міцності при розігріві до прийнятої температури і термосному витримування при охолодженні;
  - визначають необхідну тривалість ізотермічного електропрогріву для набору відсутньої міцності;
  - визначають енерговитрати і вартісні параметри.

Для оптимізації енергозатрат змінюють температуру ізотермічного електропрогріву на трьох рівнях і будують квадратичну залежність  $Q_{ел.пр.} = f(t_{ел.пр.})$ , за якою і визначають оптимальну температуру ізотермічного прогріву.



- Вихідні дані:** модуль поверхні конструкції, характеристики цементу, заповнювачів, можлива конструкція опалубки, міцність бетону марочна і на момент замерзання, легковкладальність суміші.
- Обчислюємо витрату цементу  $\Pi_{н.т.}$  за умови нормального твердіння бетону.
  - Приймаємо температури  $t_{б.п.}$  і  $t_{б.к.}$ , розраховуємо  $t_{б.ср.}$ .
  - Визначаємо необхідний термін твердіння бетону  $\tau$ .
  - Визначаємо коефіцієнт теплопередачі прийнятої конструкції опалубки  $K$ .
  - Визначаємо питоме тепловиділення цементу  $q_{т.}$ .
  - Визначаємо  $\Pi$  із рівняння теплового балансу.
  - Якщо  $\Delta = |\Pi - \Pi_{н.т.}| \leq 0,05\Pi_{н.т.}$  то  $\Pi = \max(\Pi, \Pi_{н.т.})$  і переходимо до п.16, інакше - до п.8.
  - Якщо  $\Pi < \Pi_{н.т.}$  - переходимо до п.14, інакше - до п.9.
  - Якщо є необхідність у зменшенні витрати цементу і терміну твердіння - переходимо до п.10, інакше - до п.11.
  - Застосовуємо один із способів зменшення  $\Pi$  і  $\tau$ :
    - збільшення  $t_{б.п.}$  і зменшення  $t_{б.к.}$  - переходимо до п.2.
    - введення прискорювачів твердіння - переходимо до п.3.
    - зниження необхідного рівня міцності бетону - переходимо до п.3.
    - заміна виду цементу без зміни його марки - переходимо до п.5
    - заміна марки цементу - переходимо до п.1.
    - зменшення водопотреби суміші - переходимо до п.1.
    - зменшення теплопровідності опалубки - переходимо до п.4.
  - Приймаємо  $\Pi = (\Pi + \Pi_{н.т.})/2$
  - Знаходимо очікувану марочну міцність бетону при новій витраті цементу.
  - Встановлюємо фактичний рівень міцності бетону до моменту замерзання і переходимо до п.3.
  - Якщо є можливість зниження вартості робіт - переходимо до п.15, інакше до п.16.
  - Знижуємо вартість робіт одним із способів:
    - спрощуємо конструкцію опалубки - переходимо до п.4.
    - знижуємо  $t_{б.п.}$  - переходимо до п.2.
  - Визначаємо витрату заповнювачів за методом абсолютних об'ємів.
  - Обчислюємо вартість виконання робіт  $C$ .
  - Визначаємо енерговитрати на будівельному майданчику  $Q$ .
  - Якщо розглянуті всі можливі способи зниження вартості виконання робіт - переходимо до п.20, інакше - до п.10.
  - Вибираємо оптимальний варіант складу бетону і виконання робіт відповідно до прийнятого критерію з врахуванням обмежень за ресурсами.
- Вивід:** склад і прийнятні параметри термосного втримування бетону.

Рис. 4.6. Алгоритм розрахунку складу бетону термосного втримування

**Приклад 4.12.** Методом термоса бетонується фундамент, для якого  $M_{II} = 6$ . Для виготовлення бетонної суміші ( $OK=5,7$  см) використовують портландцемент і рядові заповнювачі ( $D_{II}=40$  мм). До замерзання бетон повинен мати міцність не меншу 14 МПа (70% марочної). Для виготовлення опалубки використовують наявні дошки товщиною 25 мм. Розрахувати можливі варіанти складу бетону.

**Розв'язання:** Як базовий розрахуємо склад бетону нормального твердіння. Марочна міцність  $R_b = 14/0,7 = 20$  МПа. Застосуємо цемент марки 400. Необхідне водоцементне відношення:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{A R_{II}}{R_b + 0,5 A R_{II}} = \frac{0,6 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 40} = 0,75.$$

Водопотреба суміші  $B=185$  л/м<sup>3</sup>. Тоді витрата цементу  $Ц_{н.т.} = B \cdot (B/C) = 185/0,75 = 247$  кг/м<sup>3</sup>. Обчислимо витрату цементу з умови необхідного тепловиділення. Температуру нагріву бетонної суміші в змішувачі приймемо 35°C. Після транспортування й укладки початкова температура твердіння бетону буде  $t_{б.п.} = 27$ °C (визначається за рекомендаціями [93]). Кінцеву температуру твердіння приймаємо мінімально можливою  $t_{б.к.} = 5$ °C. Середня температура твердіння бетону [93]

$$t_{б.ср.} = t_{б.п.} + \frac{t_{б.п.} - t_{б.к.}}{1,03 + 0,181 M_{II} + 0,006 (t_{б.п.} - t_{б.к.})} =$$

$$= 5 + \frac{27 - 5}{1,03 + 0,181 \cdot 6 + 0,006 (27 - 5)} = 14,8^{\circ}C$$

Коефіцієнт теплопередачі опалубки (дошки товщиною 25 мм):

$$K = 1/(1/\alpha + \delta/\lambda) = 1/(1/23 + 0,025/0,18) = 5,48 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)},$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі опалубки, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт;  $\delta$  - її товщина, м;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності опалубки, Вт/(м·°C).

Необхідний строк твердіння бетону

$$\tau = \left( \frac{\eta}{k_{II} t} \right)^{1/K_T} = \left( \frac{0,7}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1000}{0,37 \cdot 14,8^2 - 25,7 \cdot 14,8 + 814}} =$$

$$= 14,4 \text{ діб} = 345,6 \text{ год.}$$

Питоме тепловиділення цементу (при  $t = 14,8$ °C):

$$q_{\tau} = -46,59 - 0,365R_{п} + 7,11t + 212,98 \lg \tau + 0,038 R_{п}^2 - 0,054 t^2 - 29,71 \lg^2 \tau - 1,508t \cdot \lg \tau = -46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,11 \cdot 14,8 + 212,98 \cdot \lg 14,4 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 14,8^2 - 29,71 \cdot \lg^2 14,4 - 1,508 \cdot 14,8 \cdot \lg 14,4 = 274,3 \text{ кДж/кг.}$$

Витрата цементу з умови тепловиділення:

$$Ц_{\tau} = [KM_{п}(t_{б.сп.} - t_{п})\tau - c\rho_{б}(t_{б.п} - t_{б.к.})] / q_{\tau} = [5,48 \cdot 6 \cdot (14,8 - 0) 345,6 - 1,05 \cdot 2400(27 - 5)] / 274,3 = 451 \text{ кг.}$$

Отримане значення витрати цементу неприйнятне, оскільки воно приведе до суттєвого завищення марочної міцності, і, таким чином, вартості бетону. Для проектування раціонального (за технологічними та економічними показниками) складу бетону розглянемо кілька прийомів:

1. Оптиміальне збільшення в порівнянні з базовим варіантом марочної міцності, при якому витрати цементу, обчислені з умов міцності та тепловиділення, однакові чи близькі.
2. Збільшення марочної міцності за рахунок зменшення водопотреби суміші при введенні суперпластифікатора.
3. Зниження теплопровідності опалубки за рахунок зміни її конструкції.
4. Застосування цементу з більшою екзотермією.
5. Застосування добавки - прискорювача твердіння.

**Прийом 1.** Прийmemo в першому наближенні

$$Ц_{н.т.(1)} = (Ц_{\tau} + Ц_{н.т.})/2 = (451 + 247)/2 = 349 \text{ кг.}$$

Очікувана марочна міцність бетону

$$R_{б} = 0,6 \cdot 40(349/185 - 0,5) = 33,3 \text{ МПа.}$$

Термін витримування бетону

$$\tau = \left( \frac{\eta}{k_{п} t} \right)^{1/K_{\tau}} = \left( \frac{14 : 33,3}{0,012 \cdot 14,8} \right)^{\frac{1000}{0,37 \cdot 14,8^2 - 25,7 \cdot 14,8 + 814}} = 5,3 \text{ діб.}$$

Розрахувавши далі  $q_{\tau}$ , одержимо, що  $Ц_{п(1)} < 200 \text{ кг/м}^3$ , тобто мінімально можливої кількості цементу. Таким чином, тепловиділення прийнятої кількості цементу буде надлишковим, і витрату цементу в другому наближенні приймаємо

$$Ц_{н.т.(2)} = (349 + 200)/2 = 275 \text{ кг.}$$

Виконуємо далі розрахунок  $Ц_{\tau(i)}$  за рівняннями (2.121), (4.30), (4.23) і формулою Болемея - Скрамгаєва методом ітерацій доти, доки на певному кроці при  $Ц_{н.т.(i)} = 315 \text{ кг}$  одержимо  $Ц_{\tau(i)} = 308 \text{ кг} \approx Ц_{н.т.(i)}$ .

При цьому  $R_b = 28,9$  МПа і  $\tau = 7$  діб, а перевитрата цементу в порівнянні з базовим варіантом складе

$$\Delta = (315 - 247) / 247 = 0,275 = 27,5\%.$$

**Прийом 2.** Вводимо суперпластифікатор С-3 у кількості 1% від маси цементу. Водопотреба суміші понизиться на 20...25% при тій же її рухливості і складе  $145 \text{ л/м}^3$ . Марочна міцність при базовій витраті цементу складе

$$R_b = 0,6 \cdot 40(247/145 - 0,5) = 28,9 \text{ МПа}.$$

Визначивши далі  $\tau = 7,0$  діб і  $q_c = 233,2$  кДж/кг, одержимо  $C_t = 308 \text{ кг} > C_{н.т.} = 247 \text{ кг}$ . Визначаємо оптимальну витрату цементу (як у прийомі 1) методом ітерацій, прийнявши у другому наближенні  $C_{н.т.(2)} = (308 + 247) / 2 = 278 \text{ кг}$ . За кілька ітерацій при  $R_b = 31,0$  МПа і  $\tau = 6,1$  діб отримаємо  $C_{т(i)} = 250 \text{ кг} \approx C_{н.т.(i)} = 260 \text{ кг}$ . Перевитрата цементу в порівнянні з базовим варіантом складе

$$\Delta = (260 - 247) / 247 = 0,052 = 5,2\%.$$

**Прийом 3.** Визначимо максимально можливе значення коефіцієнта теплопередачі опалубки для базового варіанту:

$$K_{\max} = [c\rho_b(t_{б.н.} - t_{б.к.}) + C_{н.т.} q_c] / [M_{н.т.}(t_{б.сп.} - t_{н.т.}) \tau] = [1,05 \cdot 2400 \times (27-5) + 247 \cdot 274,3] / [6(14,8-0)345,6] = 4,0 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Щоб досягти отримане значення  $K$ , утеплюємо опалубку мінераловатними плитами або пінопластом. Товщину шару утеплювача можна прийняти за табл. 29 [93].

**Прийом 4.** Застосуємо цемент марки 500. Розрахувавши склад бетону за наведеною вище методикою, отримаємо оптимальне значення витрати цементу  $C = 271 \text{ кг}$  при  $R_b = 28,9$  МПа і  $\tau = 7$  діб.

**Прийом 5.** Застосуємо добавку  $\text{CaCl}_2$  у кількості 1% від маси цементу як прискорювач твердіння. Тоді міцність  $R_b = 14$  МПа для бетону з добавкою буде досягнута в тому ж віці, що і міцність  $14/1,2 = 11,7$  МПа для бетону без добавки (тут  $k = 1,2$  - коефіцієнт росту міцності бетону з добавкою  $\text{CaCl}_2$  у віці 7...10 діб, [93]). Виконавши розрахунок як у прийомі 1 за кілька ітерацій отримаємо остаточно  $C = 285 \text{ кг/м}^3$  і  $\tau = 6,6$  діб.

Таким чином, отримали 5 можливих варіантів складу бетону, які забезпечують як марочну міцність, так і міцність не меншу 14 МПа до моменту замерзання (див. табл. 4.11). Остаточний вибір складу бетону виконують за економічними критеріями, враховуючи вартість опалубки, добавок до бетонної суміші і т.п.

Таблиця 4.11

Варіанти складу бетону при термосному бетонуванні

| №№<br>п/п       | Витрата компонентів, кг/м <sup>3</sup> |      |       |        |                           | Строк до<br>замерзання |
|-----------------|--|------|-------|--------|---------------------------|------------------------|
|                 | цемент                                 | вода | пісок | щебінь | добавка <sup>1)</sup>     |                        |
| 1               | 315                                    | 185  | 592   | 1287   | -                         | 6,1                    |
| 2               | 260                                    | 145  | 704   | 1326   | 2,6 (С-3)                 | 7                      |
| 3 <sup>2)</sup> | 247                                    | 185  | 635   | 1301   | -                         | 14,4                   |
| 4               | 271 <sup>3)</sup>                      | 185  | 615   | 1302   | -                         | 7                      |
| 5               | 285                                    | 185  | 598   | 1306   | 2,85 (CaCl <sub>2</sub> ) | 6,6                    |

1) - витрата добавки в перерахуванні на суху речовину;

2) - склад опалубки: дошки - 25 мм; шар толю; мінеральна вата - 40 мм; фанера - 10 мм;

3) - використаний портландцемент марки 500.

**Приклад 4.13.** При тих же вихідних даних, що і у прикладі 4.12 розрахувати оптимальний склад бетону при використанні попереднього електророзігріву бетону (без ізотермічного прогріву) і подальшому термосному витримуванні. Додатково вважати, що конструкція фундаменту залізобетонна, витрата арматури на 1 м<sup>3</sup> бетону становить  $q_{\text{арм}} = 50 \text{ кг/м}^3$ .

**Розв'язання:** З попереднього прикладу при нормальному твердінні  $C = 247 \text{ кг/м}^3$ ;  $B = 185 \text{ л/м}^3$ . Розрахуємо температуру електророзігріву з умови, що витрата цементу не повинна бути збільшена.

Розрахунок ведемо методом ітерацій у такий спосіб. Задамося  $t_{\text{б.п.}}$ , далі розрахуємо  $Q_{\text{оп}}$ ,  $Q_{\text{арм}}$ ,  $Q_{\text{втр}}$  і  $Q_{\text{екз.п.}}$ , а потім визначаємо нове наближення для  $t_{\text{б.п.}}$  з рівняння теплового балансу:

$$t_{\text{б.п.}}^1 = \frac{Q_{\text{оп}} + Q_{\text{арм}} + Q_{\text{втр}} - Q_{\text{екз.п.}}}{c\rho_{\text{б}}} + t_{\text{б.к.}}$$

Якщо отримане значення  $t_{\text{б.п.}}^1$  і прийняте раніше  $t_{\text{б.п.}}$  відрізняються не більш ніж на 2°C, розрахунок вважаємо завершеним. У протилежному випадку в якості нового наближення приймаємо  $\frac{t_{\text{б.п.}}^1 + t_{\text{б.п.}}}{2}$ .

У першому наближенні можна вважати, що  $Q_{\text{оп}} = Q_{\text{арм}} = 0$ .

Тоді

$$t_{б.п.}^I = \frac{24KM_{II}(t_{б.ср.} - t_{в.})\tau - q_{т.П}}{c\rho_b} + t_{б.к.}$$

Для визначення  $\tau$  і  $q_{т.П}$  варто задатися  $t_{б.ср.}$ . Можна прийняти орієнтовно  $t_{б.ср.} = 15 \dots 25^\circ\text{C}$ . З попереднього прикладу очевидно, що температура  $t_{б.ср.} \approx 15^\circ\text{C}$  недостатня, тому прийmemo  $t_{б.ср.} = 25^\circ\text{C}$ .

Тоді

$$\tau = \left[ \frac{0,7}{0,012 \cdot 25} \right] \frac{1000}{0,37 \cdot 25^2 - 25,7 \cdot 25 + 814} = 8,2 \text{ діб.}$$

Питоме тепловиділення при  $t = 25^\circ\text{C}$  і  $\tau = 8,2$  діб за формулою (2.121) дорівнює:

$$q_{т.П} = -46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,11 \cdot 25 + 212,98 \cdot \lg 8,2 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 25^2 - 29,71 \cdot \lg^2 8,2 - 1,508 \cdot 25 \cdot \lg 8,2 = 312,8 \text{ кДж/кг.}$$

У такому випадку в першому наближенні:

$$t_{б.п.}^I = \frac{24 \cdot 5,48 \cdot 6(25 - 0) \cdot 8,2 - 312,8 \cdot 247}{1,05 \cdot 2400} + 5 = 68,7^\circ\text{C.}$$

Для даної температури визначаємо:

початкову температуру арматури як усереднену температуру системи "бетон + арматура":

$$t_{п.арм.} = \frac{c_b \rho_b t_{п.б.} - c_{арм} \rho_{арм} t_{арм}}{c_b \rho_b + c_{арм} \rho_{арм}} = \frac{1,05 \cdot 2400 \cdot 68,7 - 0,48 \cdot 20 \cdot 50}{1,05 \cdot 2400 + 0,48 \cdot 50} = 67,9^\circ\text{C};$$

- втрати на нагрів арматури:

$$Q_{арм} = c_{арм} \rho_{арм} (t_{п.арм.} - t_{б.к.}) = 0,48 \cdot 50(67,9 - 5) = 1509,6 \text{ кДж};$$

- температурний перепад на зовнішній грані опалубки  $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ .

Тоді (при температурі повітря в момент замерзання бетону  $t_{в.} = 0^\circ\text{C}$ ):

$$t = \frac{t_{п.арм.} + t_{п.} + \Delta t}{2} = \frac{67,9 + 0 + 10}{2} = 39^\circ\text{C};$$

- втрати на нагрів опалубки:

$$Q_{оп} = c_{оп} M_{п.оп} \delta_{оп} \rho_{оп} (t_{п.оп.} - t_{б.к.}) = 2,52 \cdot 6 \cdot 0,025 \cdot 500(39 - 5) = 6426 \text{ кДж};$$

- фактична початкова температура твердіння бетону з урахуванням втрат:

$$t_{б.п.} = t_{б.к.} + \frac{Q_{п.см} - (Q_{арм} + Q_{оп})}{c_{б}\rho_{б}} = 5 + \frac{1,05 \cdot 2400(68,7 - 5) - (1509,6 + 6426)}{1,05 \cdot 2400} = 60,6^{\circ}\text{C};$$

- середня температура твердіння:

$$t_{б.ср.} = t_{б.к.} + \frac{t_{б.п.} - t_{б.к.}}{1,03 + 0,181M_{п} + 0,006(t_{б.п.} - t_{б.к.})} = 5 + \frac{60,6 - 5}{1,03 + 0,181 \cdot 6 + 0,006(60,6 - 5)} = 27,7^{\circ}\text{C}.$$

При швидкості розігріву  $15^{\circ}\text{C}$  на годину тривалість розігріву від температури  $27^{\circ}\text{C}$  до  $68,7^{\circ}\text{C}$  дорівнює:

$$\tau' = \frac{68,7 - 27}{15} \approx 3 \text{ години, середня температура розігріву}$$

$$t' = \frac{68,7 + 27}{2} = 47,9^{\circ}\text{C}.$$

Набір міцності за час розігріву визначимо за формулою (4.32):

$$\Delta R_{\tau'} = 0,012 \cdot 47,7 \cdot \left( \frac{4}{24} \right)^{\frac{0,3747,7^2 - 25,7 + 814}{1000}} \cdot 20 = 5,3 \text{ МПа.}$$

Недостаюча міцність, яку повинен набрати бетон за час термостного витримування:

$$\Delta R_{\tau'''} = 14 - 5,3 = 8,7 \text{ МПа.}$$

З рівняння (4.34):

$$\Delta R_{\tau'''} = k_{ц} t''' \left[ (\tau' + \tau''')^{k_{r'}} - (\tau')^{k_{r'}} \right] R_{28,20},$$

визначимо  $\tau'''$  (при  $t''' = t_{б.ср.}$ ):

$$\tau''' = \left[ \frac{\Delta R_{\tau'''}}{k_{ц} t_{б.ср.} R_{28,20}} + (\tau')^{k_{r'}} \right]^{\frac{1}{k_{r'}}} - \tau';$$

У нашому випадку:

$$k_{t'''} = \frac{0,37 \cdot 27,7^2 - 25,7 \cdot 27,7 + 814}{1000} = 0,386;$$

$$\tau''' = \left[ \frac{8,7}{0,012 \cdot 27,7 \cdot 20} + \left( \frac{4}{24} \right)^{0,386} \right]^{\frac{1}{0,386}} - \frac{4}{24} = 4,5 \text{ діб.}$$

Екзотермія цементу при  $t=27,7^{\circ}\text{C}$  і  $\tau=4,5$  сут:

$$q_{\tau} = -46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,11 \cdot 27,7 + 212,98 \cdot \lg 4,5 + 0,038 \cdot 40^2 - 0,054 \cdot 27,7^2 - 29,71 \lg 4,5 - 1,508 \cdot 27,7 \lg 4,5 = 254,6 \text{ кДж/кг.}$$

Тоді:

$$t_{\text{б.п.}}^1 = \frac{24 \cdot 5,48 \cdot 6(27,7 - 0) \cdot 4,5 + 1509,6 + 6426 \cdot 247}{1,05 \cdot 2400} + 5 = 38,6^{\circ}\text{C}.$$

Оскільки  $t_{\text{б.п.}} = 68,7^{\circ}\text{C} \neq t_{\text{б.п.}}^1 = 38,6^{\circ}\text{C}$ , тому в другому наближенні приймаємо

$$t_{\text{б.п.}} = \frac{68,7 + 38,6}{2} = 53,6^{\circ}\text{C}.$$

Розрахувавши знову  $t_{\text{п.арм.}}$ ,  $Q_{\text{арм.}}$ ,  $Q_{\text{оп}}$  і т.д., отримаємо  $t_{\text{б.п.}}^1 = 59,8^{\circ}\text{C}$ . Нарешті, у третьому наближенні отримуємо

$t_{\text{б.п.}} = 56,7^{\circ}\text{C} \approx t'_{\text{б.п.}} = 54,9^{\circ}\text{C}$ , і, таким чином, остаточно приймаємо температуру розігріву  $t_{\text{б.п.}} = \frac{56,7 + 54,9}{2} = 55,8^{\circ}\text{C} \approx 56^{\circ}\text{C}$ .

Тривалість розігріву (при швидкості розігріву  $V_p = 10^{\circ}\text{C}$  на годину) дорівнює:

$$\tau' = \frac{56 - 27}{10} \approx 3 \text{ години.}$$

Питому витрату електроенергії на  $1 \text{ м}^3$  бетону можна знайти за формулою

$$W = P_1 \tau' = 116 \cdot 10^{-5} \left[ c_{\text{б}} \rho_{\text{б}} + K M_{\text{ц}} \left( \frac{t_{\text{б.укл}} + t_{\text{б.п.}}}{2} - t_{\text{в}} \right) \right] \cdot \tau' \quad (4.37a)$$

У нашому випадку

$$W = 116 \cdot 10^{-5} \times \left[ 1,05 \cdot 2400 \cdot 10 + 8,48 \cdot 6 \cdot \left( \frac{27 + 56}{2} - 0 \right) \right] \cdot 3 = 95 \text{ кВт/м}^3.$$



#### 4.5. Розрахунок складу бетону для умов сухого жаркого клімату

Під сухим жарким кліматом розуміють [126] сукупність метеорологічних умов, які відзначаються тривалим пекучим літом (більше 100 днів на рік), високою температурою повітря (абсолютною максимальною не менше  $40^{\circ}\text{C}$  і середньою максимальною найбільш жаркого місяця - не менше  $29...30^{\circ}\text{C}$ ) при відносній вологості повітря меншій  $50...55\%$ .

При проектуванні складів бетону в умовах сухого жаркого клімату необхідне врахування температурно-вологісних умов не тільки при твердінні конструкцій, але і на стадії виготовлення бетонної суміші і її укладання в форму або опалубку.

Температура води затвердіння,  $^{\circ}\text{C}$

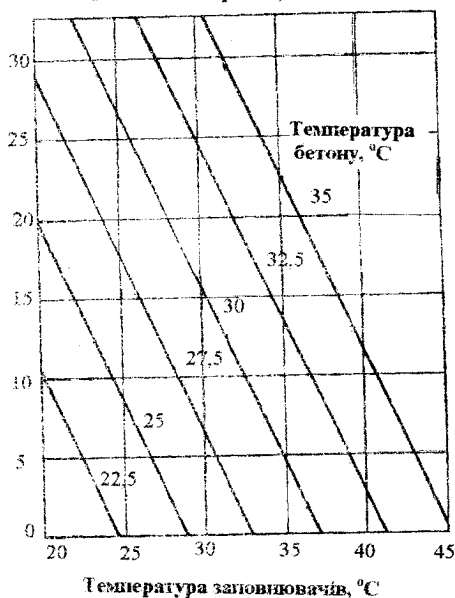


Рис. 4.7. Залежність між температурою бетонної суміші і температурами її компонентів

Орієнтовну зміну витрати води або рухливості суміші з підвищенням температури бетонної суміші можна визначити згідно з відомими рекомендаціями [48, 126, 129] (табл. 4.12, рис. 4.7).

Підвищена початкова температура бетонної суміші ( $T_{\text{и}}$ ), яку можна орієнтовно визначити в залежності від температури води і твердих компонентів суміші [58, 127, 128] (рис.4.7) впливає на водовміст суміші, необхідний для досягнення заданої рухливості і на зміну рухливості в часі. При неналежаючому догляді за бетоном вона приводить до підвищеної швидкості випаровування води з бетонної поверхні і пластичної тріщиностійкості. З підвищенням температури бетонної суміші зростає питоме тепловиділення бетону і небезпека розвитку неприпустимих термічних градієнтів у масивному бетоні.

Орієнтовну зміну витрати води або рухливості суміші з підвищенням температури бетонної суміші можна визначити згідно з відомими рекомендаціями [48, 126, 129] (табл. 4.12, рис. 4.7).

Зміна водовмісту бетонних сумішей із зміною температури

| Температура бетонної суміші | 20  | 25      | 30      | 35      |
|-----------------------------|-----|---------|---------|---------|
| Відносна витрата води, %    | 100 | 102-104 | 105-107 | 108-110 |

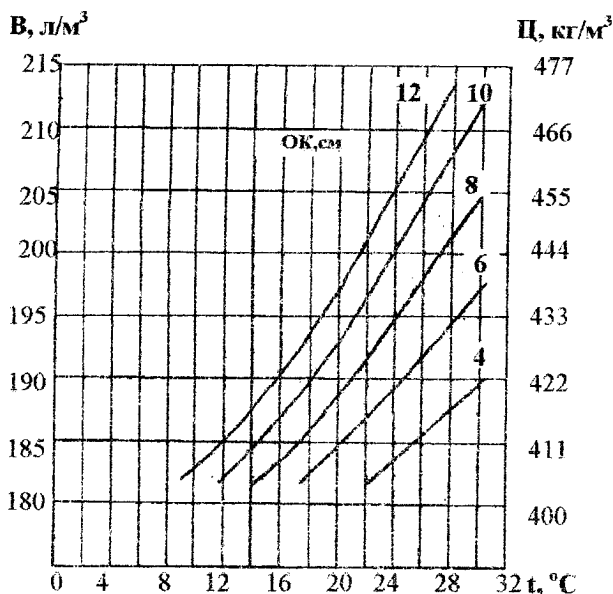


Рис. 4.8. Залежність витрати води і цементу від зміни температури бетонних сумішей різної рухливості

Зростання водовмісту бетонної суміші з підвищенням температури трохи збільшується з підвищенням рухливості. Так відповідно до рис. 4.8 [48, 129] для бетонної суміші при ОК=12 см збільшення температури суміші з 20 до 28<sup>0</sup>С привело до зростання водовмісту на 15 л (тобто на 8%), а при ОК=6 см на 10 л (тобто на 5%).

Зміну водопотреби бетонних сумішей із застосуванням температури при розрахунках складів можна врахувати і через зміну необхідного показника рухливості (рис. 4.9) [48]. При цьому у випадку витримування суміші до укладки або її транспортування показник рухливості збільшується з урахуванням емпіричних даних стосовно до заданих вихідних матеріалів.

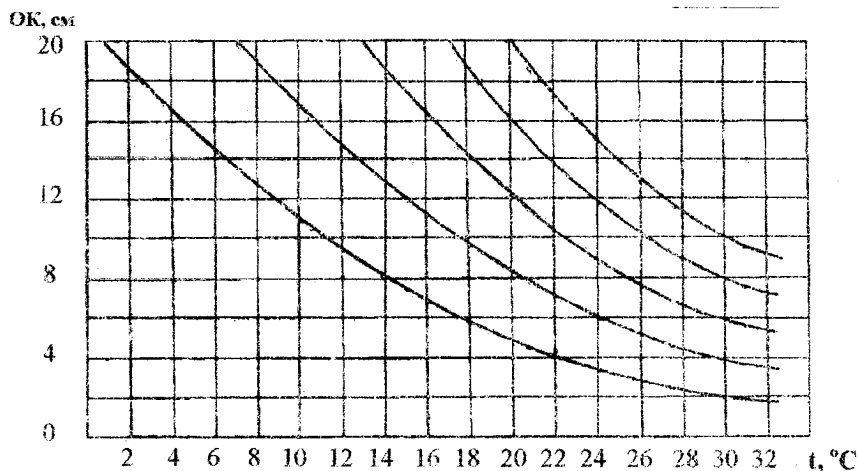
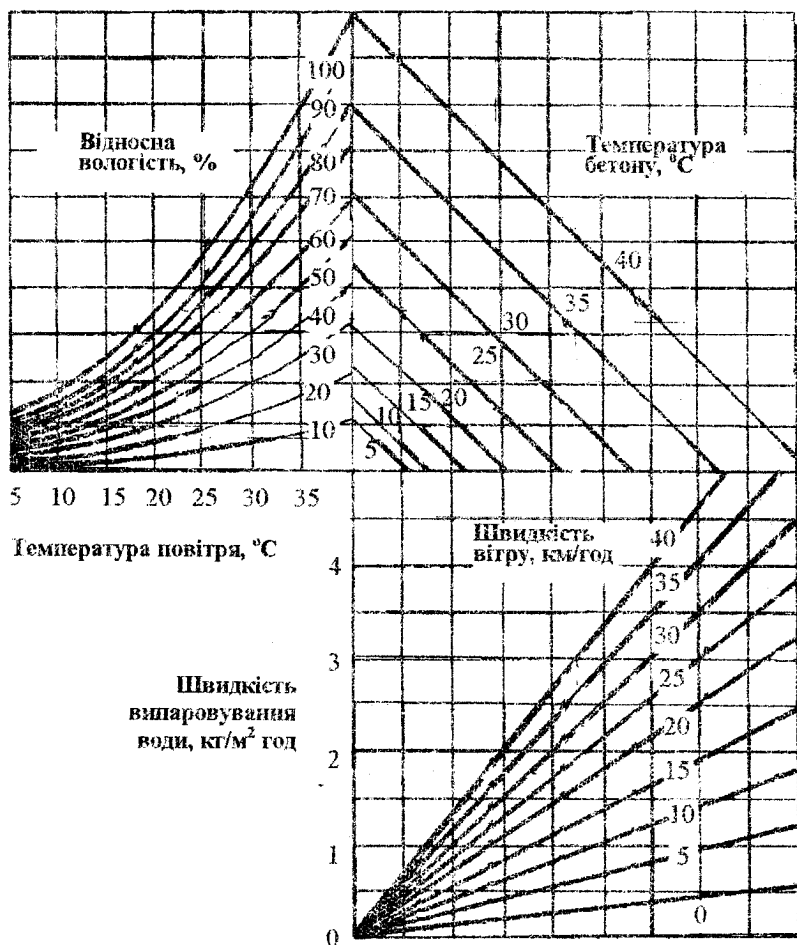


Рис. 4.9. Залежність рухливості бетонної суміші від її температури

При можливості регулювання температури суміші температура її укладки може призначатися. Відповідно рекомендацій Portland Cement Association [58,127,128] для запобігання пластичному тріщиноутворенню температура бетонної суміші при заданій відносній вологості і швидкості вітру повинна забезпечити швидкість випаровування води з поверхні бетону не більшу  $0,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$ . Взаємозв'язок зазначених вище параметрів встановлюється за допомогою номограми (рис.4.10).

Наступні технологічні прийоми дозволяють мінімізувати ймовірність раннього пластичного розтріскування:

- Зволоження опалубки і форм.
- Зволоження сухих заповнювачів.
- Влаштування тимчасових стінок, які зменшують швидкість вітру в безпосередній близькості від бетонної поверхні.
- Влаштування тимчасових навісів, які зменшують температуру поверхні бетону.
- Зниження температури бетонної суміші за рахунок охолодження заповнювачів і води.
- Захист бетонної суміші тимчасовими покриттями, наприклад поліетиленовими плівками, під час будь-яких перерв у бетонних роботах.
- Захист бетонної поверхні безпосередньо після укладки суміші і її ущільнення, а також відповідний температурно-вологісний догляд за твердіючим бетоном.



**Рис. 4.10.** Вплив температури повітря, відносної вологості повітря, температури бетону і швидкості вітру на швидкість випаровування води з поверхні бетону

Для масивних бетонних споруд температура суміші не повинна бути вищою 20° і може бути розрахована з урахуванням лімітованих значень температури бетону до визначеного терміну твердіння ( $T_{\text{крит.}}$ ) і тепловідлення бетону  $Q$  у кДж/м<sup>3</sup> за формулою (2.105).

Вибір водоцементного відношення і витрати цементу залежить від нормованих значень проектної і критичної міцності ( $R_{\text{кр}}$ ) бетону,

при якій припиняється догляд. Остання не повинна бути меншою 50% проектної. Час досягнення необхідної критичної міцності бетону залежить крім параметрів складу суміші та температурно-вологісних умов твердіння. При твердінні бетону в умовах запобігання інтенсивному випаровуванню вологи необхідний час (діб) досягнення необхідного відношення критичної і проектної міцності ( $\eta$ ) може бути орієнтовно розраховане за формулою (2.109).

З цієї залежності маємо:

$$\eta = 10 \frac{\lg \tau + K \cdot \lg (K_{\text{ц}} \cdot T_{\text{б.сп.}})}{K} \quad (4.38)$$

де  $K=1/K_1$ .

При термосному витримуванні бетону середню його температуру визначають за формулою (2.109).

У випадках, коли нормується час досягнення рівня відносної міцності  $\eta$ , може виявитися необхідним або підвищення температури твердіння  $T_{\text{б.сп.}}$  або зменшення  $\eta$  за рахунок підвищення проектної міцності. У останньому випадку відповідно зменшується розрахункове В/Ц і зростає витрата цементу.

Після визначення розрахункового складу бетону з використанням рівняння теплового балансу уточнюється розрахункова початкова температура бетонної суміші і, при необхідності, вибираються технологічні рішення по її зниженню. При можливому використанні для охолодження води льоду рівняння теплового балансу має вид [58, 93,127,128]:

$$T_{\text{н}} = \frac{0,22 \sum T_i M_i + \sum T_i W_i - 79,6 \text{ Л}}{0,22 \sum M_i + \sum W_i + \text{Л}} \quad (4.39)$$

де  $T_i$ - температура компонентів суміші;  $M_i$  - маса твердих компонентів (не рахуючи лід);  $W_i$ - маса води затворення разом із масою води, яка міститься в дрібному і крупному заповнювачі; Л - лід.

З формули (5) випливає, що для зниження температури свіжо-приготованої бетонної суміші звичайного складу на  $1^{\circ}\text{C}$  необхідно знизити температуру цементу на  $8 \dots 10^{\circ}\text{C}$ , або води приблизно на  $4^{\circ}\text{C}$ , або заповнювачів на  $1,6 \dots 1,8^{\circ}\text{C}$ .

Для масивних конструкцій уточнюється задовільність прийнятого складу з позицій лімітованого тепловиділення  $Q$  із використанням формули (2.111). При цьому величину  $q_c$  можна розрахувати за

допомогою поліноміальних рівнянь (2.121, 2.122).

Якщо  $Q > Q_d$  (де  $Q_d$  - допустиме тепловиділення бетону) можливе зменшення витрати цементу при використанні пластифікуючих добавок, зміни рухливості сумішей або зменшенні  $q_c$  за рахунок, наприклад, переходу з портландцементу на шлакопортландцемент. Якщо необхідний ефект за рахунок зазначених прийомів не досягається, можливе глибше охолодження суміші з відповідним коригуванням складу.

Дані розрахунку складів можуть бути використані при призначенні параметрів догляду за бетоном і режиму його твердіння.

Далі наведені схеми алгоритмів розрахунку складів бетонних сумішей для масивних і немасивних конструкцій.

### Схема алгоритму для розрахунку масивних конструкцій ( $M_p \leq 3 \text{ м}^3$ ).

1. Виходячи з заданого комплексу властивостей визначають допустиме В/Ц і витрати компонентів бетонної суміші.

2. Визначають температуру бетонної суміші в момент її укладки  $T_1^{\text{см}}$  за формулою теплового балансу (4.39) або за рис. 4.7..

3. Визначають початкову температуру бетонної суміші  $T_2^{\text{см}}$  за рис. 4.10, при якій швидкість випаровування води з поверхні твердіючого бетону не перевищує  $0,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$  (з умови запобігання раннього пластичного розтріскування).

4. Визначають необхідну початкову температуру бетонної суміші  $T_3^{\text{см}}$ , виходячи зі складу суміші для запобігання критичних температурних градієнтів у бетонному масиві за формулою (2.105).

5. Вибирають найменшу з температур  $T_1^{\text{см}}$ ,  $T_2^{\text{см}}$  і  $T_3^{\text{см}}$ , яку приймають за початкову необхідну температуру бетонної суміші  $T_{\text{п.н.}}^{\text{см}}$ .

6. Визначають початкову температуру бетонної суміші  $T_{\text{в.д.}}^{\text{см}}$ , яку можна досягти з урахуванням наявних технічних засобів.

7. Якщо  $T_{\text{в.д.}}^{\text{см}} > T_{\text{п.н.}}^{\text{см}}$ , тоді:

7.1. Визначають при початковій допустимій температурі  $T_{\text{в.д.}}^{\text{см}}$  допустиме тепловиділення бетонної суміші  $Q_d$  за формулою (2.105).

7.2. Визначають шляхи досягнення  $Q_d$  (зниження питомого тепловиділення цементу  $q_c$  за рахунок переходу на інший вид цементу;

зменшення витрати цементу Ц за рахунок застосування пластифікуючих добавок, застосування більш жорстких сумішей і ін.).

7.3. Кориґують (або повторно розраховують) склад бетонної суміші з врахуванням прийнятих шляхів досягнення  $Q_d$ .

8. Якщо  $T_{п.д.}^{с.м.} \leq T_{п.н.}^{с.м.}$ , тоді визначають технологічні заходи, спрямовані на досягнення остаточно обраної початкової температури бетонної суміші  $T_{п.н.}^{с.м.}$  і на підтримку її на необхідному рівні в процесі твердіння бетону.

**Приклад 4.14.** Розрахувати необхідну температуру бетонної суміші в момент її укладки і склад бетону класу В15 у віці 180 діб для масивної конструкції при таких вихідних даних:

- ОК=2 см;
- вологість піску  $W_{п.} = 1\%$ ; щебеню 1,5%;
- температури піску, щебеню і води дорівнюють  $T_{п.} = T_{щ.} = 30^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{в.} = 25^{\circ}\text{C}$ ;
- марка портландцементу М400;
- модуль поверхні конструкції  $M_{п.} = 2 \text{ м}^2$ ;
- є установка по виробництву льоду;
- температура зовнішнього повітря  $25^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість повітря 40%, швидкість вітру 20 км/год.

**Розв'язання** виконуємо згідно наведеного вище алгоритму:

1. Розрахований склад бетонної суміші:  
 $V = 163 \text{ л/м}^3$ ;  $\text{Ц} = 178 \text{ кг/м}^3$ ;  $V/\text{Ц} = 0,9$ ;  $\text{П} = 820 \text{ кг/м}^3$ ;  $\text{Щ} = 1283 \text{ кг/м}^3$ .  
 Вода, яка міститься у піску при вологості 1%:  $W_{п.} = 8 \text{ л/м}^3$ .  
 Вода, яка міститься у щебені при вологості 1,5%:  $W_{щ.} = 19 \text{ л/м}^3$ .  
 Вода для затворення бетонної суміші:  $163 - 8 - 19 = 136 \text{ л/м}^3$ .
2. При загальній температурі заповнювачів  $30^{\circ}\text{C}$  початкова орієнтовна температура бетонної суміші  $T_1^{с.м.}$  складає  $32^{\circ}\text{C}$  (рис. 4.7).
3. При швидкості випаровування води з поверхні твердіючого бетону  $0,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$  температура бетонної суміші  $T_2^{с.м.} = 22^{\circ}\text{C}$ .
4. Знайдемо тепловиділення бетону Q за формулою (2.111). За рівнянням (2.121) питоме тепловиділення цементу у віці 28 діб  $Q_{28} = 336 \text{ кДж/кг}$ . Тоді  $Q_{28} = 336 \cdot 178 = 59808 \text{ кДж}$ .  
 Допустиму температуру укладки бетонної суміші визначимо з умови (2.105).

$$T_3^{с.м.} \leq T_{крит.} - K \frac{Q}{C} \cdot \rho \leq 35 - 0,8 \frac{59808}{1,05 \cdot 2400} \leq 16^{\circ}\text{C}$$

5. За остаточну початкову температуру бетонної суміші приймемо:

$$T_{н.н.}^{см} = T_3^{см} = 16^{\circ}\text{C}$$

6. Установка по виробництву льоду дозволяє охолоджувати бетонну суміш до температур  $T_{п.д.}^{см} = 10 \dots 15^{\circ}\text{C}$ . Температура  $T_{п.н.}^{см} = 16^{\circ}\text{C}$  технічно досяжна.

7. Оскільки  $T_{п.д.}^{см} < T_{п.н.}^{см}$ , переходимо до пункту 8.

8. Для зниження температури укладки суміші до  $16^{\circ}\text{C}$  приймаємо рішення про заміну частини води затворення подрібненим льодом.

За формулі (4.39) розрахункова кількість подрібненого льоду  $L = 25 \text{ кг/м}^3$ . Відповідно витрата води для затворення бетонної суміші зменшується до  $111 \text{ кг/м}^3$ .

### Схема алгоритму розрахунку немасивних конструкцій ( $M_n > 3 \text{ м}^{-1}$ )

1. Наближено визначаємо початкову температуру бетонної суміші  $T_1^{см}$  за рис 4.7 або наявними емпіричними даними.

2. Визначаємо температуру бетонної суміші  $T_2^{см}$  за рис 4.10, при якій швидкість випаровування води з поверхні твердіючого бетону не перевищує  $0,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$ .

3. Вибирають меншу з температур  $T_1^{см}$  і  $T_2^{см}$ , яка і приймається за остаточну температуру бетонної суміші в момент її укладки.

4. Визначають водопотребу суміші за відомими стандартними методиками із врахуванням поправки на температуру за табл 4.12 або за рис 4.8 чи 4.9.

5. Визначають критичну міцність  $R_{кр}$  і відповідний рівень відносної міцності  $\eta = \frac{R_{кр}}{R_{пр}}$ . Розраховують тривалість температурно-

вологісного догляду  $\tau$  за формулою (2.109).

6. Якщо  $\tau$  більше допустимого з умов технологічного регламенту, знаходиться величину  $\eta$  за формулою (4.38) і відповідну проектну міцність  $R_{28}$  при заданому значенні  $\tau$ . Можливі також інші технологічні рішення: перехід на другий вид цементу і зміна  $K_{ц}$ , зміна  $T_{б.ср}$  за рахунок зміни умов твердіння.

7. Визначають В/Ц бетонної суміші, яке забезпечує необхідну проектну міцність  $R_{пр}$ .



8. Визначають за відомими методиками витрати компонентів бетонної суміші: цементу (Ц), піску (П), крупного заповнювача (Щ) і води (В).

9. Визначають технологічних заходи, спрямовані на досягнення остаточно обраної температури бетонної суміші в момент її укладки.

**Приклад 4.15.** За вихідними даними з попереднього прикладу розрахувати необхідну температуру бетонної суміші в момент її укладки і склад бетону класу В15 у віці 180 діб для немасивної конструкції ( $M_n=6 \text{ м}^{-1}$ ), якщо тривалість температурно-вологісного режиму повинна бути не більшою 3 діб.

**Розв'язання** виконуємо згідно наведеного вище алгоритму:

1. При загальній температурі заповнювачів  $30^\circ\text{C}$  початкова орієнтована температура бетонної суміші  $T_1^{\text{см}}$  складає  $32^\circ\text{C}$  (рис. 4.7).
2. При швидкості випаровування води з поверхні твердіючого бетону  $0,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год.}$  температура бетонної суміші  $T_2^{\text{см}} = 22^\circ\text{C}$ .
3. За остаточно необхідну температуру бетонної суміші в момент її укладки приймаємо  $22^\circ\text{C}$ .
4. Згідно табл. 4.12 збільшення водопотреби при температурі бетонної суміші  $22^\circ\text{C}$  немає. Загальна водопотреба В складає  $163 \text{ л/м}^3$ .
5. У проектному віці 180 діб орієнтовна середня міцність складає:

$$R_{\text{пр}} = \frac{B15}{0,778} = 19 \text{ МПа} . \text{ Тоді необхідна критична міцність}$$

$$(50\% \text{ від марочної}) R_{\text{кр}}=9,5 \text{ МПа. Отже: } \eta = \frac{9,5}{19} = 0,5 .$$

$$T_{\text{б.ср}} = 30 + \frac{22-30}{1,03+0,181 \cdot 6+0,006(22-30)} = 26^\circ\text{C} ;$$

$$K_1 = 0,001 (0,37 \cdot 26^2 - 25,7 \cdot 27 + 814) = 0,39 ;$$

$$\tau = \left[ \frac{0,5}{0,012 \cdot 26} \right]^{1/0,39} = 3 \text{ доби} .$$

6. Величина  $\tau$  не перевищує допустиму тривалість температурно-вологісного режиму.
7.  $B/C=0,9$ .
8. Розрахований склад бетонної суміші:

$$C=178 \text{ кг/м}^3; B=163 \text{ л/м}^3; П=820 \text{ кг/м}^3; Щ=1283 \text{ кг/м}^3.$$

$$\text{Вода, яка міститься у піску при вологості 1\%: } W_n=8 \text{ л/м}^3.$$

$$\text{Вода, яка міститься у щебені при вологості 1,5\%: } W_n=19 \text{ л/м}^3.$$

Вода для затворення бетонної суміші:  $163-8-19=136 \text{ л/м}^3$ .

9. Охолодження і вологісний догляд здійснюються за рахунок спільного застосування двох технологічних прийомів:

- Періодичне розбризкування води на поверхні конструкції, що дозволяє знизити температуру бетону на  $5...6^{\circ}\text{C}$  і збільшити відносну вологість повітря.
- Влаштування навісу, який захищає від прямої сонячної радіації, що дозволяє знизити температуру бетону ще на  $4...6^{\circ}\text{C}$ .

В результаті вжитих заходів початкова температура бетону повинна знизитись до  $20...22^{\circ}\text{C}$ .

### Параметри зволоження твердіючого бетону

При наявності на поверхні бетону захисного шару (акумулюючого воду), загальна витрата води  $V_{зв}$  для зволоження твердіючого бетону визначається за рис. 4.11 [130].

Виходячи з умов природного випаровування рис. 4.11 складений для двох основних випадків: для помірних і сухих (жарких) 2 умов, які характеризуються відносною вологістю зовнішнього повітря відповідно 0,7 і 0,4 (при швидкості вітру не більшій  $5 \text{ м/с}$ ).

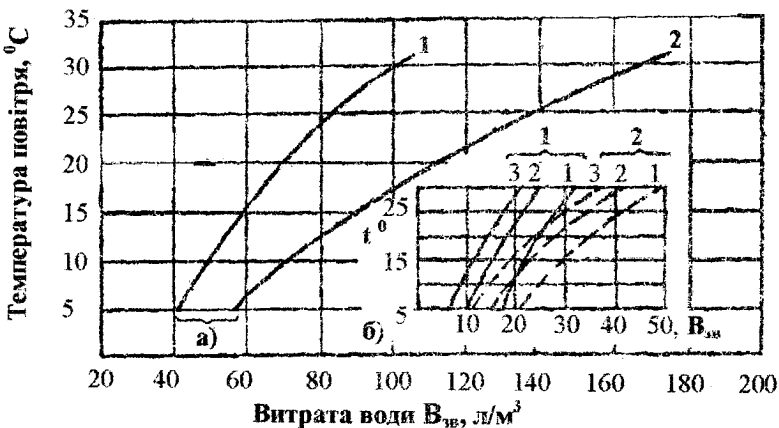


Рис. 4.11. Графік визначення витрати води для зволоження твердіючого бетону:

а) залежність загальної витрати води  $V_{зв}$  при твердінні бетону від кліматичних умов, розрахункової температури і тривалості зволоження; б) допоміжний графік для призначення витрати води по тижнях: 1 — для помірних кліматів; 2 — для жаркого і сухого клімату.

На рис. 4.11 показана загальна витрата води для всього заданого терміну твердіння бетону до набору проектної міцності і по тижнях.

**Приклад 4.16.** У літніх умовах, при температурі повітря  $22,5^{\circ}\text{C}$ , передбачене влаштування залізобетонного покриття товщиною 15 см площею 10 тис.  $\text{м}^2$ . Термін вологісного догляду прийнятий рівним 14 діб; захисний матеріал - пісок з товщиною шару 16 см. Потрібно визначити загальну витрату води  $R_{\text{зв}}$ .

**Розв'язання.** Витрату води визначаємо за графіком б (див. рис. 4.11). На першому тижні  $V_{\text{зв},I}=27 \text{ л/м}^2$ , на другому  $V_{\text{зв},II}=20 \text{ л/м}^2$ . Сумарна витрата води на  $1 \text{ м}^2$  складе  $V_{\text{зв}} = V_{\text{зв},I} + V_{\text{зв},II} = 27+20=47 \text{ л/м}^2$ , або з коефіцієнтом запасу 1,5 -  $V_{\text{зв}}=70 \text{ л/м}^2$ . На  $10000 \text{ м}^2$ , отже, буде потрібно 700 тис. л.

Строки зволоження поверхні твердіючого бетону зменшуються зі збільшенням пористості бетону і зниженням витрати цементу. За мінімальну приймають тривалість зволоження на протязі 1 доби з початку твердіння бетону. Максимальний термін зволоження обмежується двома тижнями у поєднанні із заходами, які захищають бетон від висихання в термін від 14 доби до кінцевого.

Частоту поливок при наявності захисного (аккумуляючого воду) шару на поверхні бетону визначають за рис. 4.12 [130], складеному для найбільш вживаного для цієї мети матеріалу - природного піску.

При кожній черговій поливці захисний шар доводять до повного водонасичення. Чергову поливку роблять при зниженні вологості захисного шару приблизно до 5%.

При розрахунку за рис. 4.12 загальна витрата води при заданому терміні зволоження приймається з коефіцієнтом запасу 1,5. Крім визначення кількості поливок за допомогою рис. 4.12 можна встановлювати оптимальний за умовами виконання робіт варіант поєднання товщини захисного шару і кількості поливок.

**Приклад 4.17.** Витрата води для зволоження бетону складає: у перший тиждень -  $40 \text{ л/м}^2$ , у другий -  $30 \text{ л/м}^2$  (із врахуванням коефіцієнта запасу 1,5). Визначити: кількість поливок при товщині піщаного захисного шару 4 см.

**Розв'язання.** Від зазначених на осі ординат витрат (40 і 30) проводять горизонтальні лінії до перетину з прямою, яка відповідає товщині шару 4 см; проєкції точок перетину на вісь абсцис дають потрібну кількість поливок (округлено 5 і 4). Загальна кількість поливок - 9.

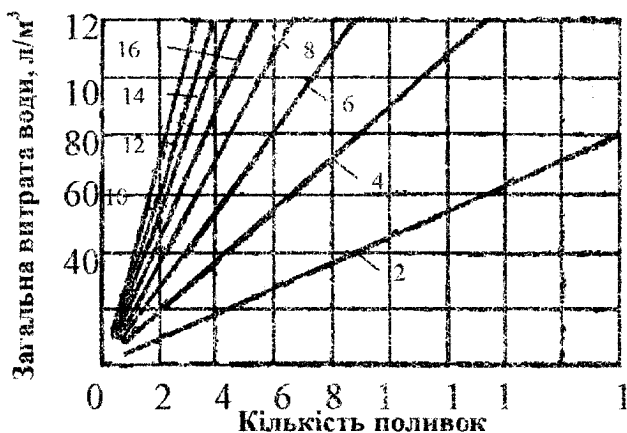


Рис. 4.12. Графік для призначення кількості поливок при зволоженні твердіючого бетону у залежності від витрати води та товщини піщаного захисного шару:

2...16 - товщина піщаного захисного шару, см

### Прискорене витримування бетону без наступного догляду

Найбільш ефективним способом прискорення твердіння бетону є теплова обробка, що дозволяє залежно від температури прогріву, складу бетону та інших факторів досягти в короткі терміни міцності  $R_6^{sp}$ , критичної щодо втрат вологи. При наступному впливі сухого високотемпературного середовища і при відсутності вологісного догляду  $R_6^{sp}$  забезпечує набуття бетоном у місячному віці проектної міцності.

Величину  $R_6^{sp}$  не варто призначати меншою 50% від проектної міцності  $R_{28}$  [93,131].

Методи теплової обробки в літніх і зимових умовах повинні бути ідентичними [93,131].

При попередньому прогріві бетонної суміші пропонується наступна схема розрахунку:

1. Визначається середня температура бетонної суміші за час охолодження за формулою (2.109).

2. Час витримування бетону до охолодження (днів) визначається за формулою (4.30).

3. Розраховується питоме тепловиділення цементу за рівняннями (2.121), (2.122).

4. Коефіцієнт теплопередачі опалубки або укриття бетонної конструкції  $K_{\delta}$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C})$ , визначається з умови рівності формул (2.108) і (2.111):

$$K_{\delta} = \frac{q \cdot \Pi + C_{\beta} \rho_0 (t_{\beta,п.} - t_{\beta,к.})}{M_{п} (t_{\beta,ср.} - t_{п,ср.})},$$

де  $\Pi$  - витрата цементу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C_{\beta}$  - питома теплоємність бетону, при  $\rho_0=2400 \text{ кг}/\text{м}^3$  можна прийняти  $C_{\beta}=1,05 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_{п,ср.}$  - середня температура зовнішнього повітря,  $^\circ\text{C}$ .

5. Визначається товщина опалубки ( $y$  м) або теплоізоляційного укриття за формулою [7,9]:

$$\delta = \lambda \left( \frac{1}{K_{\delta}} - \frac{1}{\alpha} \right),$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу шару огородження,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha$  - коефіцієнт теплопередачі зовнішньої поверхні огородження,  $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C})$ .

**Приклад 4.18.** Розрахувати товщину теплоізоляційного шару з піску, а також необхідний час витримування бетону способом термоса в умовах сухого клімату.

Модуль поверхні конструкції  $M_{п}=10 \text{ м}^2$ . Температура зовнішнього повітря  $t_{п,ср.}=20^\circ\text{C}$ , початкова температура бетонної суміші  $t_{\beta,п.}=70^\circ\text{C}$ , кінцева температура бетону  $t_{\beta,к.}=35^\circ\text{C}$ .

Питома теплоємність бетону  $C_{\beta}=1,05 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$  при середній густині  $\rho_0=2400 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Вид цементу, який використовується - портландцемент марки 400. Витрата цементу  $\Pi=280 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Швидкість вітру  $15 \text{ м}/\text{с}$ .

### Розв'язання.

1. Визначимо середню температуру бетону за формулою (2.109):

$$t_{\text{б,ср}} = 35 + \frac{70 - 35}{1,03 + 0,181 \cdot 10 + 0,006(70 - 35)} = 46,5^{\circ}\text{C};$$

2. Розрахуємо час витримування бетону до досягнення ним міцності, яка дорівнює 50% від марочної за формулою (4.30):

$$\tau = \left( \frac{0,5}{0,012 \cdot 46,5} \right)^{\frac{1000}{0,37 \cdot 46,5^2 - 25,7 \cdot 46,5 + 814}} =$$
$$\left( \frac{0,5}{0,012 \cdot 46,5} \right)^{2,39} = 0,78 \text{ дб або } 19 \text{ год.}$$

3. Питоме тепловиділення цементу  $q$  (при  $t_{\text{б,ср}} = 46,5^{\circ}\text{C}$  за формулою (2.121) :

$$q = -46,59 - 0,365 \cdot 40 + 7,11 \cdot 46,5 + 212,98 \cdot \lg 0,78 + 0,038 \cdot 402 - 0,054 \times$$
$$\times 46,52 - 29,7(\lg 0,78)^{2-0} + 36 \cdot 46,5 \cdot \lg 0,78 = 193,5 \text{ кДж/кг.}$$

4. Визначимо коефіцієнт теплопередачі  $K_{\delta}$  теплоізоляційного шару опалубки:

$$K_{\delta} = \frac{193,5 \cdot 280 + 1,05 \cdot 2400(70 - 35)}{10(46,5 - 28) \cdot 19} = 26 \text{ кДж/(м}^2 \text{ год } ^{\circ}\text{C)}.$$

5. Розрахуємо товщину шару опалубки за формулою:

$$\delta = \lambda \left( \frac{1}{K_{\delta\delta}} - \frac{1}{\alpha} \right) = 0,62 \left( \frac{1}{26} - \frac{1}{37,2} \right) = 5 \text{ см.}$$

## РОЗДІЛ 5. АДАПТАЦІЯ РОЗРАХУНКОВИХ СКЛАДІВ БЕТОНУ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ І СТАТИСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ МІЦНОСТІ

### 5.1. Адаптація розрахункових складів бетону у виробничих умовах

Розрахункові склади можна розглядати як базові, що підлягають експериментальному коригуванню в лабораторії і адаптації в умовах реального виробництва. Базові склади повинні розраховуватися на стадії технологічної підготовки виробництва з проробкою можливих оптимізаційних рішень, пов'язаних із вибором вихідних матеріалів, економії цементу, енерговитрат і т.д. Результати цих розрахунків можуть бути використані також для рішення задач матеріально-технічного забезпечення виробництва і формування виробничої програми.

У залежності від можливої тривалості технологічної підготовки виробництва нового виду бетону або конструкцій, циклічності й інших параметрів виробничого процесу, матеріальної бази заводської або будівельної лабораторії, глибина лабораторного обґрунтування розрахункових складів може бути різною. Наприклад, в одних випадках вона може полягати лише в уточненні необхідної водопотреби й В/Ц бетонних сумішей, в інших додатково включати коригування співвідношення заповнювачів і ін. Однак, з огляду на те, що реальні будівельно-технологічні процеси є стохастичними системами з неминучими коливаннями більшості їхніх параметрів, навіть попередньо відкориговані в лабораторії склади необхідно адаптувати в умовах виробництва [126].

Задача адаптації складів полягає в їх корекції з уточненням емпіричних коефіцієнтів використовуваних усереднених залежностей на основі "зворотного 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 їхньої варіації. Для адаптації складів можливо використання звичайних, експресних і автоматичних способів виміру нормованих показників і технологічних параметрів.

Адаптовані склади бетонної суміші можуть регулюватися за допомогою різних алгоритмів і вимірювальних комплексів [7,127,128] при зміні таких технологічних параметрів як активність цементу, во-

логість і гранулометрія заповнювачів, температура і тривалість теплової обробки й ін.

Адаптація складів і їх регулювання дозволяють радикально підвищити ефективність статистичного контролю якості бетону, направити його не тільки на забезпечення надійності продукції, яка виготовляється, але і на істотну економію цементу та інших ресурсів.

Найважливішою задачею адаптації розрахункових і лабораторних складів бетону є досягнення необхідних показників легковкладальності виробничих бетонних сумішей і реєстрація їх фактичної водопотреби. На першому етапі адаптації до одержання інформації про міцність та інші властивості затверділого бетону в залежності від фактичної водопотреби перераховується витрата цементу при  $C/V = \text{const}$  і співвідношення заповнювачів при відповідній зміні розрахункових значень частки піску в суміші заповнювачів  $\Gamma$  або коефіцієнта розсуву  $\alpha$ .

Водопотреба ( $V_0$ ) бетонної суміші, як показує обробка численних експериментальних даних, пов'язана з показником легковкладальності (рухливості або жорсткості)  $\Pi_n$  параболічною функцією (формули 3.23...3.26) типу:

$$V_0 = a + b\Pi_n + c\Pi_n^2. \quad (5.1)$$

Фактичну водопотребу бетонної суміші у виробничих умовах можна визначити з умови:

$$V_\phi = V_0 + \Delta V. \quad (5.2)$$

Величина  $\Delta V$  знаходиться з рівнянь (5.1 і 5.2):

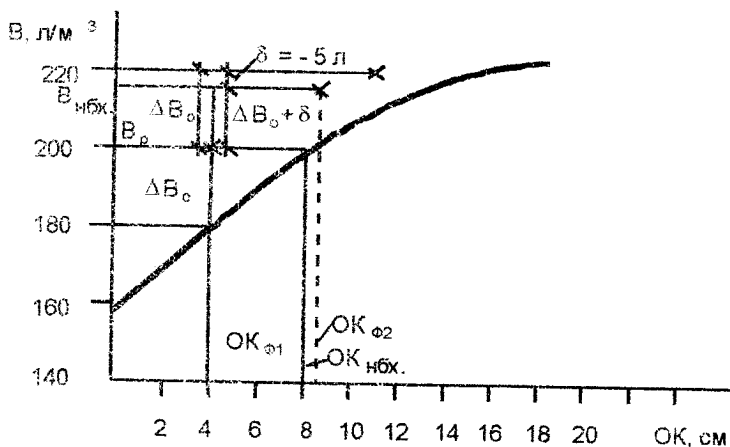
$$\Delta V = b\Delta\Pi_n + \Delta\Pi_n^2 + \sigma, \quad (5.3)$$

де  $\Delta\Pi_n = \Pi_n^p - \Pi_n^\phi$ ,

$$\Delta\Pi_n^2 = (\Pi_n^p)^2 - (\Pi_n^\phi)^2.$$

Тут  $\Pi_n^p$  і  $\Pi_n^\phi$  відповідно розрахункові і фактичні значення легковкладальності,  $\sigma$  - емпіричний параметр, який відбиває особливості конкретного виробництва і визначається експериментально в процесі коригування. Коригування  $\Delta V$  виконують у всіх випадках, коли  $\Delta\Pi_n$  більше допустимих значень, встановлених у технологічному регламенті (рис.5.1). При зміні вологості чи інших особливостей заповнювачів уточнюється розрахункове значення водопотреби бетонної суміші  $V_0$ .





**Рис.5.1.** Приклад графічної адаптації водопотреби бетонної суміші:  $V_p, V_{нбх}$  – відповідно розрахункова і необхідна водопотреба;  $OK_{\phi_1}$  и  $OK_{\phi_2}$  - фактичні значення осадки конуса до і після коригування;  $OK_{нбх}$  – необхідна осадка.

На рис.5.2 наведений приклад номограми для визначення  $\Delta V$  при  $\sigma = 0$ .

Коригування Ц/В може бути одно- або багатоступінчатим. Останнє робиться спочатку для досягнення необхідної відпускної, потім проектної міцності, водонепроникності і т.д.

При адаптації відповідних розрахункових формул для визначення Ц/В типу:

$$R_b = AR_{ц}(\text{Ц/В} - v), \quad (5.4)$$

для умов конкретного виробництва необхідне уточнення коефіцієнтів  $A$  і  $v$ .

З огляду на те, що фактична активність цементу, який застосовується,  $R_{ц}$ , у більшості випадків із достатньою точністю невідома, формулу (5.4) можна записати у виді:

$$R_b = K(\text{Ц/В} - v), \quad (5.5)$$

де  $K = AR_{ц}$ .

Знаходження адаптованої залежності (5.5) можливе, якщо надходить інформація, як мінімум, про два фактичні значення  $R_b$  при двох різних значеннях Ц/В (рис.5.3). Тоді:

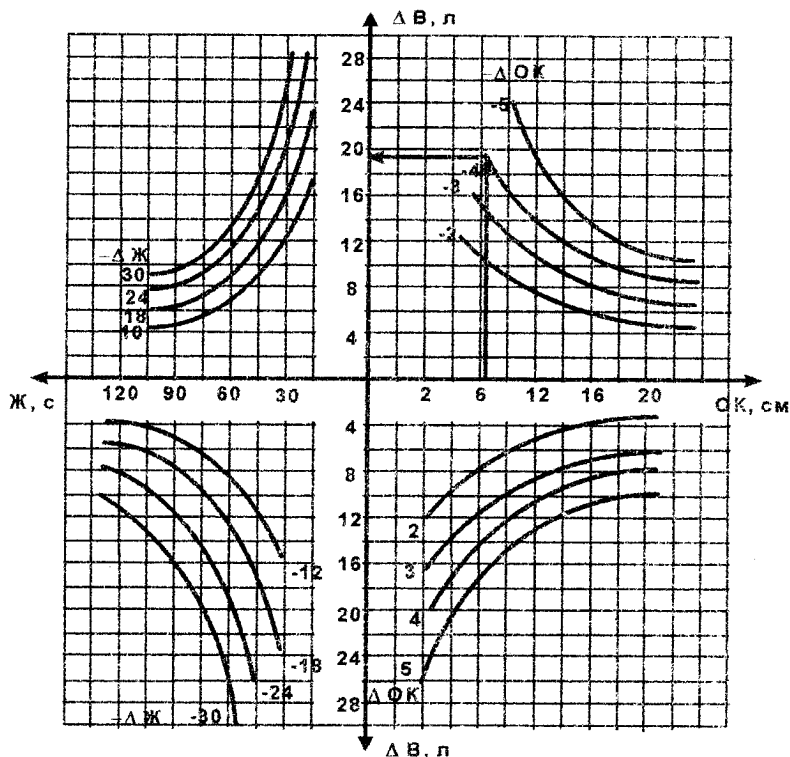


Рис. 5.2 Номограма для коригування водовмісту бетонної суміші

$$B = \frac{R_{\sigma_1} (\text{Ц}/B)_2 - R_{\sigma_2} (\text{Ц}/B)_1}{R_{\sigma_1} - R_{\sigma_2}}; \quad (5.6)$$

$$K = \frac{R_{\sigma_1}}{(\text{Ц}/B)_1 - B} \text{ або } \frac{R_{\sigma_2}}{(\text{Ц}/B)_2 - B} \quad (5.7)$$

Необхідне Ц/В можна знайти за формулою:

$$(\text{Ц}/B)^{\text{необх.}} = \frac{R_{\sigma}^{\text{необх.}} + BK}{K} \quad (5.8)$$

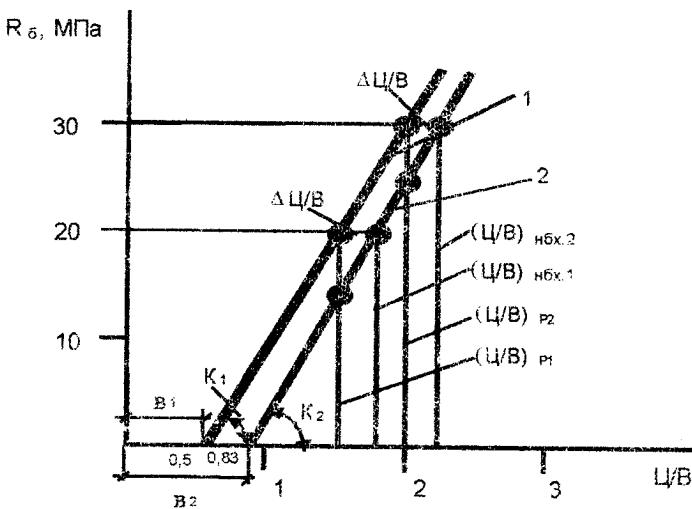


Рис. 5.3 Приклад графічної адаптації цементно-водного відношення: 1 – розрахункова залежність  $R_6 = f(\text{Ц/В})$ ; 2 – адаптована залежність  $R_6 = f(\text{Ц/В})$ ;  $(\text{Ц/В})_{p_1}$ ,  $(\text{Ц/В})_{\text{нбх.1}}$ ,  $(\text{Ц/В})_{p_2}$ ,  $(\text{Ц/В})_{\text{нбх.2}}$  – відповідно розрахункові і необхідні значення  $\text{Ц/В}$  до і після коригування;  $v_1$  і  $v_2$  – значення коефіцієнта  $v$  до і після коригування;  $K_1$  і  $K_2$  – значення коефіцієнта  $K$  до і після коригування

Фактично досягнуті показники властивостей бетону дозволяють відкоригувати емпіричні коефіцієнти і в інших розрахункових формулах. Так, коефіцієнт  $K$  в рівнянні морозостійкості бетону (2.83) легко уточнити за формулою:

$$K = \frac{F}{10^{F_k} - 1} \quad (5.9)$$

де  $F$  – середнє експериментальне значення морозостійкості бетону;  
 $F_k$  – середнє розрахункове значення модифікаційного фактора.

Коригування розрахункових залежностей, які застосовуються для визначення параметрів нестационарних технологічних процесів із врахуванням інформації “зворотного зв’язку” є задачею адаптивних систем керування [129]. У замкнутій контур сучасних адаптивних систем входять оперативний ідентифікатор – пристрій або програма обчислювального комплексу, які використовують дані поточних змін і спеціальні (рекурентні) алгоритми для їх обробки. Оперативна іден-

тифікація - уточнення розрахункових залежностей і моделей - дає можливість як прогнозувати властивості функціонуючого об'єкта в міру зміни вихідних умов, так і управляти ними за допомогою керуючих пристроїв-регуляторів.

Теорія ідентифікації [129] має у своєму розпорядженні велике число алгоритмів, оснований на налагодженні пропорційно градієнту функції помилок, методі найменших квадратів, стохастичній апроксимації. Для коригування емпіричних коефіцієнтів у розрахункових залежностях різного ступеня складності зручно використовувати алгоритм Чадеєва-Качмаьжа [129]. У роботі [130] цей алгоритм використаний для коригування коефіцієнтів формули міцності бетону Боломея-Скрамтаєва. На нашу думку, даний алгоритм доцільно застосовувати для коригування коефіцієнтів більш складних залежностей, наприклад, квадратичних поліноміальних моделей властивостей бетонних сумішей і бетону виду:

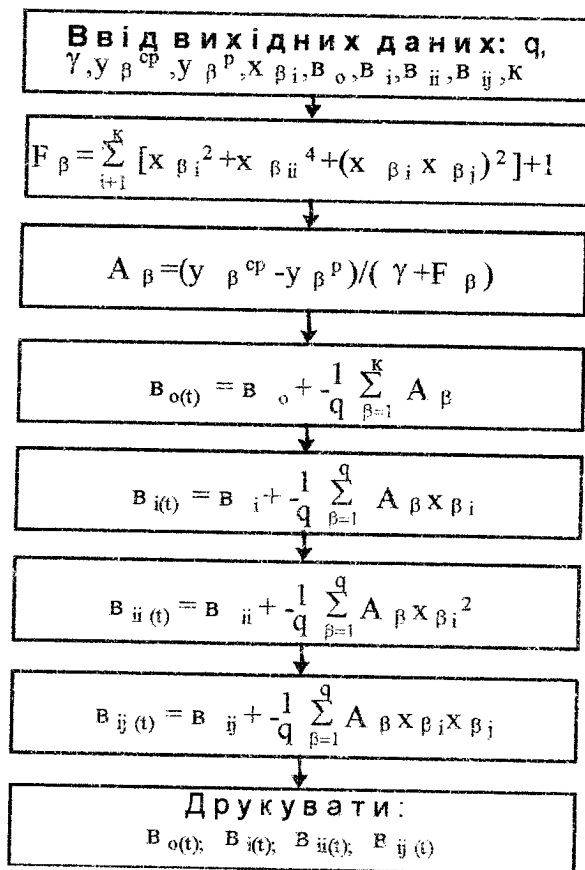
$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i=1}^k B_{i1} X_i^2 + \sum_{i < j} B_{ij} X_i X_j. \quad (5.10)$$

У цьому випадку його можна [7] привести до виду:

$$B_{m(t)} = B_{m(t-1)} + \frac{1}{q} \sum_{\beta \approx 1}^q \frac{(y_{\beta}^{\phi} - y_{\beta}^p) X_{\beta_1}}{\gamma + \sum_{i=1}^k [X_{\beta_i}^2 + X_{\beta_i}^4 (X_{\beta_i} X_{\beta_j}) + 1]}, \quad (5.11)$$

де  $B_{m(t)}$  і  $B_{m(t-1)}$  - коефіцієнти моделі при  $\beta$ -факторі відповідно після (t) і до (t-1) коригування; q - кількість вибірок контрольованого параметра;  $y_{\beta}^{\phi}$  і  $y_{\beta}^p$  - відповідно фактичне і розрахункове значення вихідного параметра;  $X_{\beta_i}$  і  $X_{\beta_j}$  - значення i-го і j-го факторів;  $\gamma$  - параметр алгоритму.

Блок-схема алгоритму коригування коефіцієнтів квадратичних моделей наведена на рис.5.4.



**Рис. 5.4** Блок-схема алгоритму коригування коефіцієнтів квадратичних моделей

Для статистичної оцінки придатності моделей порівнюють дисперсії відтворюваності  $S_v^2$  і прогнозування їх  $S_{пр}^2$  за допомогою наступного рівняння:

$$S_v^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^{\phi} - P_{i_{cp}}^{\phi})^2}{n-1}; \quad (5.12)$$

$$S_{np}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^{\phi} - P_i^{np})^2}{n - m}, \quad (5.13)$$

де  $P_i^{\phi}$  і  $P_i^{np}$  - відповідно фактичне і прогнозоване значення вихідного параметра;  $P_{i_{cp}}^{\phi}$  - середнє фактичне значення показника  $P_i$ .

Якщо  $S_{np}^2 \leq S_B^2$ , модель придатна для проектування складів, у протилежному випадку необхідне уточнення коефіцієнтів.

Розв'язання задач багатопараметричного проектування складів бетону доцільно виконувати за допомогою набору комп'ютерних програм або комп'ютерних систем, які дозволяють розраховувати базові склади, коригувати їх із врахуванням виробничої інформації, проводити статистичний контроль міцності та інших нормованих властивостей бетону з побудовою технологічних карт і вирішувати ряд суміжних задач, пов'язаних із матеріально-технічним забезпеченням виробництва, обліком витрачених матеріалів і ін. У табл.5.1 наведено розв'язання однієї з задач за допомогою розробленої авторами комп'ютерної системи керування бетонними сумішами КСУБС [131].

Таблиця 5.1

Приклад розв'язання задачі проектування складу бетону  
за допомогою системи КСУБС-1 [131]

**Постановка задачі:** Розрахувати базовий склад бетону класу В15 з ОК=9 см і відпускною міцністю 70% марочної при загальній тривалості пропарювання 13 годин за режимом 2+3+6+2 при  $t_0=80^{\circ}\text{C}$ .

Відкоригувати склад із врахуванням фактичних значень нормованих параметрів і результатів статистичного контролю міцності.

**Матеріали, які використовуються:** Портландцемент М400 з НГ=27%; кварцевий пісок із  $M_k=1,7$ , вмістом відмулюваних домішок 3%,  $\rho_n=2,65$  кг/л,  $\rho_{o.n}=1,4$  кг/л; щебінь гранітний фракції 5-20 мм із вмістом домішок 1%;  $\rho_{ш}=267$  кг/л,  $\rho_{o.ш}=1,45$  кг/л.

**Базовий склад,** який забезпечує нормовані параметри через 12 год. після пропарювання:

$C=305$  кг/м<sup>3</sup>;  $B=206$  кг/м<sup>3</sup>;  $P=653$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Pi=1162$  кг/м<sup>3</sup>.

Результати статистичного контролю:

|  |            |
|--|------------|
| Число одиничних значень міцності бетону за аналізований період | - 32       |
| Середній коефіцієнт варіації                                   | - 14,1%    |
| Необхідна відпускна міцність                                   | - 14,8 МПа |
| Середній рівень міцності                                       | - 17,0 МПа |
| Нижня попереджувальна межа (НПМ)                               | - 15,6 МПа |
| Верхня попереджувальна межа (ВПМ)                              | - 18,5 МПа |

Відкоригований склад при середній фактичній відпускній міцності 10 МПа та ОК=12 см:

Ц=375 кг/м<sup>3</sup>; В=195 кг/м<sup>3</sup>; П=591 кг/м<sup>3</sup>; Ш=1182 кг/м<sup>3</sup>.

Виробничий склад на заміс бетонозмішувача 550 л при вологості піску  $W_{п}=5\%$ ; щебеню  $W_{щ}=3\%$ :

Ц=188 кг; В=81 кг; П=310 кг; Ш=609 кг.

## 5.2. Управління якістю бетону за допомогою технологічних карт

Статистичний контроль якості бетону полягає в коригуванні параметрів технології виробництва за допомогою вибіркового контролю продукції. У ході контролю перевіряють не всю заводську партію виробів або товарного бетону, а якусь частину, вибірку, об'єм якої повинен бути достатнім для того, щоб зробити висновок про якість усієї партії.

У процесі статистичного контролю з'ясовують, чи не вийшов контрольований показник якості виробу за допустимі межі, а також визначають розмір фактичного відхилення. Якщо контрольований показник знаходиться в допустимих межах, то технологічний процес протікає нормально, тобто знаходиться в допустимих межах, "у стані контролю". Як тільки контрольований показник наближається до верхньої або нижньої допустимої межі, виникає загроза появи дефектних

виробів. У цьому випадку варто виявити причини порушення стабільності технологічного процесу і запобігти браку виробів.

Контрольованим показником якості важкого бетону звичайно є міцність на стиск, у деяких випадках визначають міцність на осьовий розтяг і на розтяг при згині. Контролюють нормовану міцність, тобто задане в проектній або нормативно-технічній документації значення міцності бетону у виробках і конструкціях. При цьому розрізняють наступні види нормованої міцності: відпускна міцність бетону в збірних конструкціях; передаточна міцність бетону в попередньо напружених конструкціях; проектна міцність бетону в збірних і монолітних конструкціях, яку необхідно досягти в проектному віці; міцність бетону в проміжному віці, встановлену проектною документацією для монолітних конструкцій [132].

Спочатку знаходять міцність бетону в кожній з партій, виготовлених на протязі початкового (аналізованого) періоду, потім обчислюють характеристики однорідності міцності за аналізований період. За цими характеристиками визначають середній рівень міцності бетону для наступного (контрольованого) періоду і параметри технологічної контрольної карти міцності.

Від кожної партії бетону відбирають з довільно обраних замісів не менше 2 проб бетонної суміші. За результатами випробувань серій зразків обчислюють середні значення міцності бетону у вибірках  $R_i$ . За сукупністю середніх міцностей у вибірках обчислюють міцність бетону в партії  $R_m$ , МПа за формулою:

$$R_m = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{n}, \quad (5.14)$$

де  $n$  - загальне число вибірок у партії.

Однорідність бетону за міцністю характеризується середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_m$ , коефіцієнтом варіації в одній окремій партії  $V_m$  (партійний) і коефіцієнтом варіації у всіх партіях аналізованого періоду  $V_{m.п.}$  (міжпартійний). Для обчислення цих статистичних характеристик необхідно, щоб число вибірок у генеральній сукупності за весь аналізований період (від одного тижня до 2 міс.) було не меншим 30.

При числі вибірок у партії  $n > 6$ , середньоквадратичне відхилення  $\sigma_m$ , МПа, обчислюють за формулою:



$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}{n-1}} \quad (5.15a)$$

При  $n=2 \dots 6$  обчислення роблять за формулою:

$$\sigma_m = \frac{\Delta R}{\alpha_B} \quad (5.15b)$$

де  $\Delta R$  - розмах середніх значень міцності у вибірках, рівний різниці між найбільшим і найменшим значеннями міцності;  $\alpha$  - безрозмірний коефіцієнт;  $n$  - величина, яка залежить від числа виборок  $n$ .

|          |      |      |      |      |     |
|----------|------|------|------|------|-----|
| $n$      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6   |
| $\alpha$ | 1,13 | 1,69 | 2,06 | 2,33 | 2,5 |

Коефіцієнт варіації міцності в партії, %:

$$V_m = \frac{\sigma_m}{R_m} \cdot 100\% \quad (5.16)$$

Міжпартійний коефіцієнт варіації обчислюють для  $N$  партій бетону, проконтрольованих на протязі аналізованого періоду:

$$V_{m.p.} = \frac{\sum_{i=1}^N V_m n_i}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (5.17)$$

де  $V_{m,i}$  - коефіцієнти варіації міцності бетону в проконтрольованих партіях;  $n_i$  - число виборок кожної  $i$ -тої із  $N$  партій бетону.

На протязі аналізованого періоду, до накопичення статистичної інформації, склад бетону підбирають виходячи з необхідної міцності:

$$R_r = 1,41 \cdot B \quad (5.18)$$

де  $B$  - нормований клас бетону.

На контрольований період, після накопичення необхідного статистичного матеріалу, устанавлюють середній рівень міцності:

$$R_y = K_1 \cdot B \quad (5.19)$$

де  $K_1$  - коефіцієнт, величина якого залежить від  $V_{m.p.}$ :

|            |          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |
|------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| $V_{m.p.}$ | $\leq 6$ | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | $\geq 16$ |
| $K_1$      | 1,1      | 1,12 | 1,14 | 1,19 | 1,22 | 1,29 | 1,34 | 1,43 | 1,49 | 1,59 | 1,64      |

Задовільна технологія характеризується коефіцієнтом варіації  $V_{м.п.} \leq 14\%$ .

Після накопичення статистичної інформації і обчислення середнього рівня міцності (контрольований період) проводять поточний аналіз результатів визначення міцності у вибірках і вносять, при необхідності, корективи до складу суміші або технологічного процесу. Такий аналіз прийнято проводити графічно на контрольних картах міцності бетону [54]. Контрольна карта - це діаграма, на яку наносять результати вимірювання чи обчислення контрольованої характеристики продукції (рис. 5.1).

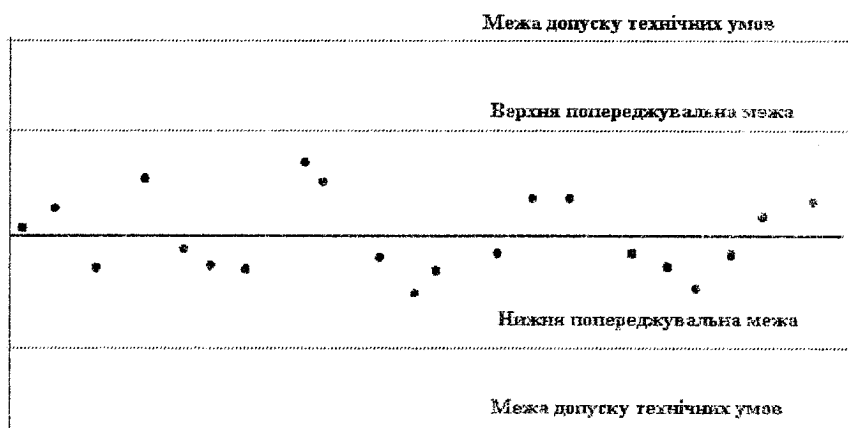


Рис. 5.5. Контрольна карта міцності бетону

За даними Британського стандарту по управлінню якістю для розрахунку відповідних меж на контрольній карті користуються формулою:

$$\text{Межі карти} = R_y \pm A \cdot \bar{W} \quad (5.20)$$

де  $A$  - коефіцієнт, який залежить від середнього за контрольований період об'єму вибірки і заданої ймовірності (табл.5.2);  $\bar{W}$  - середній за аналізований період вибірковий розмах міцності, МПа.

## Значення коефіцієнта А

| Об'єм вибірки, n | Коефіцієнт попере-<br>дження, $A_{0,025}$ | Коефіцієнт коригу-<br>вання, $A_{0,001}$ |
|------------------|---|--|
| 2                | 1,229                                     | 1,937                                    |
| 3                | 0,668                                     | 1,054                                    |
| 4                | 0,476                                     | 0,750                                    |
| 5                | 0,377                                     | 0,594                                    |
| 6                | 0,316                                     | 0,498                                    |
| 7                | 0,274                                     | 0,432                                    |
| 8                | 0,244                                     | 0,384                                    |
| 9                | 0,220                                     | 0,347                                    |
| 10               | 0,202                                     | 0,317                                    |
| 11               | 0,185                                     | 0,294                                    |
| 12               | 0,174                                     | 0,274                                    |

$\bar{W}$  визначають за формулою:

$$\bar{W} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{m,i}}{N} \cdot K_2, \quad (5.21)$$

де  $N$  - кількість партій бетону в аналізованому періоді;  $\sigma_{m,i}$  - середньоквадратичне відхилення в кожній  $i$ -й з  $N$  партій;  $K_2$  - безрозмірний коефіцієнт, який залежить від об'єму вибірки:

|                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Об'єм<br>вибірки | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| $K_2$            | 1,128 | 1,693 | 2,059 | 2,326 | 2,534 | 2,704 | 2,847 | 2,970 | 3,078 |

Для контрольованого періоду частота проведення виборок залежить від технологічного регламенту і від тієї швидкості, з якою зміна міцності може досягти контрольних меж технологічних карт, якщо відомо, що процес дрейфує. Швидкість дрейфу технологічного процесу виробництва товарного бетону і бетонних виробів залежить від ряду факторів, таких, як якість вихідних матеріалів, знос устаткування, продуктивність підприємства.

Для того, щоб уникнути погіршення якості продукції і сприяти своєчасному коригуванню, на картах повинні робитись оцінки про всі зміни умов виробництва бетону. Найбільш типові зміни:

- нове обладнання; нові партії сировини;

- переналагодження устаткування;
- регулювання технологічного процесу;
- зміна оператора; зміна контролера;
- ремонт і технічне обслуговування.

Межі, позначені на контрольній карті, повинні регулярно переглядатись з метою підвищення чутливості до змін у технологічному процесі. Застосовується наступна процедура управління процесом виробництва на основі технологічних карт:

- Якщо точка лежить за межами коригування або дві послідовні точки лежать за межами попередження, необхідна зміна (настроювання процесу).
- Якщо одна точка лежить за межами коригування, необхідне негайне проведення додаткової вибірки.
- Якщо друга вибірка не виходить за межі коригування або межі попередження, то допускається продовження процесу.

**Приклад 5.1.** Проектна міцність товарного бетону В25. У початковий період контролю склад розраховується для міцності бетону:

$$R_T = 1,41B = 35,3 \text{ МПа}$$

Для аналізованого періоду у кожній партії визначаємо середню міцність у партії, середньоквадратичне відхилення в партії  $\sigma_m$ , коефіцієнт варіації в партії (партійний)  $V_m$ . При загальному числі виборок  $n=30$ , обчислюємо міжпартійний коефіцієнт варіації  $V_{m,n}$ , середній рівень міцності  $R_y$ , середній вибірковий розмах  $\bar{W}$  і межі карти середніх значень міцності. Результати вимірювань для аналізованого періоду приведені в табл. 5.3

Таблиця 5.3

Таблиця результатів випробувань (аналізований період)

| Номер партії | Кількість виборок, n | $R_i$ , МПа                  | $R_m$ , МПа | $\sigma_m$ , МПа | $V_m$ | $V_{m,n}$ |
|--------------|----------------------|------------------------------|-------------|------------------|-------|-----------|
| 1            | 3                    | 37,2<br>35,0<br>31,0         | 34,4        | 6,2              | 10,5  | 31,4      |
| 2            | 4                    | 38,5<br>35,1<br>27,9<br>36,1 | 34,5        | 5,15             | 15    | 60        |

| Номер партії | Кількість виборок, n | $R_i$ , МПа                          | $R_m$ , МПа | $\sigma_m$ , МПа | $V_m$ | $V_{m.n}$    |
|--------------|----------------------|--------------------------------------|-------------|------------------|-------|--------------|
| 3            | 3                    | 37,0<br>33,3<br>30,9                 | 33,7        | 3,61             | 11    | 33           |
| 4            | 5                    | 34,2<br>35,5<br>23,0<br>29,9<br>34,9 | 31,5        | 5,36             | 17    | 85           |
| 5            | 5                    | 41,3<br>32,0<br>34,9<br>39,1<br>36,5 | 36,8        | 3,99             | 11    | 55           |
| 6            | 4                    | 45,1<br>38,7<br>32,2<br>34,0         | 37,5        | 6,26             | 16,7  | 66,8         |
| 7            | 3                    | 39,5<br>37,1<br>30,8                 | 35,8        | 5,15             | 14,4  | 43,2         |
| 8            | 3                    | 35,5<br>39,1<br>30,3                 | 35,0        | 5,2              | 14,8  | 44,6         |
|              | $\Sigma=30$          |                                      |             |                  |       | $\Sigma=419$ |

Міжпартійний коефіцієнт варіації  $V_{m.n}$  визначимо з формули (5.17):

$$V_{m.n} = \frac{419}{30} = 14\%.$$

Середній рівень міцності для контрольованого періоду  $R_y$  і середній вибіркової розмах  $\overline{W}$  розраховуються за формулами (5.19, 5.21):

$$R_y = 1,4925 = 37,2 \text{ МПа};$$

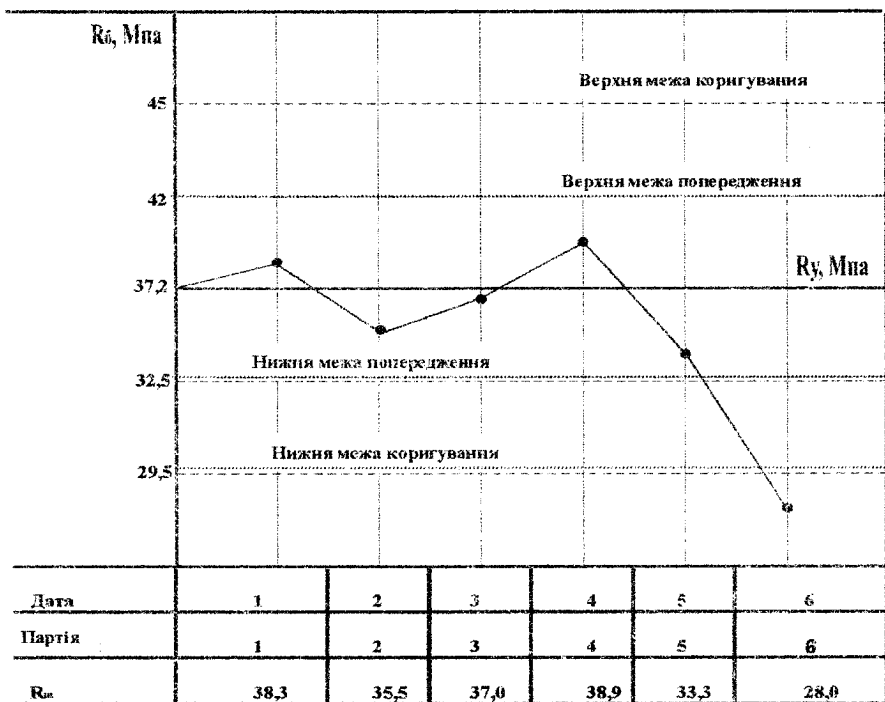
$$\bar{W} = \frac{38,32}{8} \cdot 2,02 = 9,68 \text{ МПа} \quad (\text{середній арифметичний об'єм}$$

вибірки 3,75).

Для побудови технологічної контрольної карти міцності бетону визначимо її необхідні параметри (табл. 5.2):

- коефіцієнт попередження  $A_{0,025}=0,49$ .
- коефіцієнт коригування  $A_{0,001}=0,8$ .
- межі коригування  $= 37,2 \pm 0,8 \cdot 9,68 = 45,0$  і  $29,5$  МПа.
- межі попередження  $= 37,2 \pm 0,49 \cdot 9,68 = 42,0$  і  $32,5$  МПа.

Технологічна контрольна карта міцності бетону із вказаними середніми міцностями по партіях у контрольованому періоді наведена на рис.5.6



**Рис. 5.6. Контрольна карта міцності бетону (приклад 5.1)**

Вихід міцності бетону за нижню межу коригування в 6-й партії пояснюється надходженням у виробництво нової партії цементу з ак-

тивністю, яка змінилась. Для оперативного коригування технологічного процесу доцільно збільшити Ц/В. Зміну Ц/В можна виконати за відомими методиками [134] або за наявною на підприємстві накопиченою емпіричною інформацією. Приймаючи Ц/В=2,02 для 7-ї партії бетону в контрольованому періоді і виконавши необхідні вибірки зразків, одержали середня міцність у партії  $R_m=38,1$  МПа, що досить близько до середнього рівня міцності.

Розробка методології розрахункової бази *багато-параметричного проектування складів бетону* - перспективний напрямок сучасного бетонознавства. Воно дозволяє вирішувати складні технологічні задачі із застосуванням системи розрахунків, основаної на емпіричному досвіді та теоретичних дослідженнях сучасної науки про бетон.

В міру подальшого вивчення закономірностей "синтезу" властивостей бетону будуть створюватись умови для розвитку розрахункової методології задач проектування складів бетону, не підмінючи, а розумно поєднуючись із необхідними експериментальними обґрунтуваннями.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Баженов Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов. М.: Стройиздат, 1975.
2. Дворкин Л.И. Оптимальное проектирование составов бетона. Львов: Вища школа, 1981.
3. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона. М.: Стройиздат, 1980.
4. Шмигальский В.Н. Оптимизация составов цементобетонных. Кишинев: Штинца, 1981.
5. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1.-Detroit, 1980.
6. Баженов Ю.М., Вознесенский В.А. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона. М.: Стройиздат.
7. Дворкин Л.И., Шамбан И.Б. Многофакторное прогнозирование свойств и проектирование составов бетонов. М.: Стройиздат, 1982.
8. Сторк Ю. Теория состава бетонной смеси. Л.: Стройиздат, 1971.
9. Шейн В.И. Физико-химические основы оптимизации технологии бетона. М.: Стройиздат, 1977.
10. Шгаерман Ю.Я. Тевзадзе Ю.Н. Плотный бетон на многофракционном заполнителе. Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1967.
11. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Корнейчук Ю.А. Эффективные цементно-золевые бетоны. Ровно, 1998.
12. Смит А.Э. Современный подход к применению золы-унос в бетоне. // Технология товарной бетонной смеси. М.: Стройиздат, 1981.
13. Дворкин Л.И., Соломатов В.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. Киев: Будівельник, 1991.
14. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1971.
15. Десов А.Е. Некоторые вопросы структуры прочности и деформаций бетонов. // Структура, прочность и деформации бетонов. М.: Стройиздат, 1966.
16. Грушко И.М., Ильин А.Г., Чихладзе Э.Д. Повышение прочности и выносливости бетона. Харьков: Вища школа, 1986.
17. Лещинский М.Ю. Испытания бетона, М.: Стройиздат, 1980.
18. Унифицированные практические рекомендации по расчету и осуществлению железобетонных конструкций. Европейский комитет



- по бетону (пер. с фр.). Издание ЦИНИС, 1966.
19. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М.: Стройиздат, 1965.
  20. Concrete Admixture Handbook/ Properties, Science and Technology. V.S. Ramachandran, Noyes Publications, New Jersey, USA, 1984.
  21. Abrams, Duff A. Design of Concrete Mixtures. Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, 1918.
  22. Faury J. Le beton Dronod. Paris, 1953.
  23. Малюга И.Г. Состав и способ приготовления цементного раствора (бетона) наибольшей прочности. С-0.: 1895.
  24. Самович И. Составление пропорций цементных растворов и бетонов. // Инженерный журнал. 1890, №7-9.
  25. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979.
  26. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981.
  27. Рыбьев И.А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1978.
  28. Powers T. and Brownyard T. Studies of physical properties of hardened portland-cement paste. "Proc. Amer. Concrete Inst.", 1947.
  29. Powers T. Structures and Physical Properties of hardened Portlandcement paste. "J. Amer. Ceram. Soc.", 1958, 41.
  30. Dzulinski M., Bull. Centre des Rech, et d'Essais. Scientifiques. University of Liege, 1953, 6.
  31. Wichers Y. Einfbup einer Temperaturänderung auf die Festigkeit von Zementstein und Zementmörtel mit Zuscenlangsioffen vershiedenes Würmedechnung. Schriftenreihe der Zementindustrie, H.28, 1961.
  32. Popovich S. effect of porosity on the Strength of Concrete. Journal of materials. JMLSA, 1969, Vol.4, № 2.
  33. Roy D., Youda Y. High strength Generation in Cement Pastes. Cenent and concrete research. 1973, №3.
  34. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.Д. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1979.
  35. Гершберг О.А., Левин Л.И. Уточнение формулы прочности тяжелого бетона на основе физической интерпретации закона водоцементного отношения. Бетон и железобетон. 1974, №9.
  36. Симонов М.З. Основы технологии легких бетонов. М.: Стройиздат, 1973.

37. Беляев Н.М. Метод подбора состава бетона. Изд-е 4-е. НИИ бетонов. Л.: 1930.
38. Graf O. Festigkeit und Elastizität von Beton mit hoher festigkeit. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. H.113, Vereag Ernst und Sohn, Berlin, 1954.
39. Bolomey J. Deformation elastiques, plastiques et de retrait de guelgues betons. Bulletin technique de la Suisse Romande. ann. 68, №15, 1942.
40. Яшвили А.И. К вопросу о прочности бетона в зависимости от цементно-водного фактора. Строитель. №19, 1936.
41. Френкель И.М. Основы технологии тяжелого бетона. М.: Стройиздат, 1966.
42. Кайсер Л.А., Чехова Р.С. Цементы и их рациональное использование при производстве сборных железобетонных изделий. М.: Стройиздат, 1972.
43. Сорокер В.И., Довжик В.Г. Жесткие бетонные смеси в производстве сборного железобетона. М.: Стройиздат, 1964.
44. Горчаков Г.И., Орендлихер Л.П., Савин Л.И. и др. Состав, структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1976.
45. Шмигальский В.Н. Оптимизация состава цементобетонов. Кишинев: Штинца, 1981.
46. Грушко И.М., Ильин А.Г., Рашевский С.Т. Прочность бетонов на растяжение. Харьков. Изд-во ХГУ, 1973.
47. Судаков В.Б. Рациональное использование бетона в гидротехнических сооружениях. М.: Энергия, 1976.
48. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. М.: Стройиздат, 1975.
49. Миронов С.А., Малинина Л.А. Ускорение твердения бетона. М.: Стройиздат, 1964.
50. Руководство по применению химических добавок в бетоне. М.: Стройиздат, 1980.
51. Бойко В.Е., Тихомиров Е.В. Тепловая обработка в производстве сборного железобетона. Киев, Будівельник, 1987.
52. Klieger, P., Air Entraining Admixtures. ASTM, STP 169 B:787, 1978.
53. Бужевич Г.А., Довжик В.Г. и др. Поризованный керамзитобетон. М.: Стройиздат, 1969.
54. Хаютин Ю.Г. Монолитный бетон. М.: Стройиздат, 1982. - 447 с.
55. Шестоперов С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений. М.: Транспорт, 1966.

56. Шлаен А.Г. Пути повышения морозостойкости бетонных и железобетонных конструкций в гидромелиоративном строительстве. М.: ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1976, №11.
57. Подвальный А.М. О собственных напряжениях, возникающих в замораживаемом бетоне. Инженерно-физический журнал, 1973, т. XXV, №2.
58. Design and Control of Concrete Mixury. Portland Cement Association, Ottawa, 1984.
59. Powers T. C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. J. Am. Concr. Inst. №4, V.16, 1945.
60. Litvan G. Frost action on cement paste. Mater. et constr., 1973, 6, №34.
61. Powers T.C. Void spacing as a basis for producing air-entrained Concrete. J. ACI, Proc., 1954, V50.
62. Dobrolubov G. New Microscopic Method of Determining the Resistance of Highway Concrete to Freezing and to Antifreeze Salts. 14 World Congress of Road, 1971, Prague, Perm. Intern. Ass. of Road Congress. Q2 3/3.
63. Добролюбов Г. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Прогнозирование долговечности бетона с добавками. М.: Стройиздат, 1983.
64. Лифанов И.И. К вопросу прогнозирования долговечности бетона. //Сб. трудов МИСИ. №1416 1977.
65. Whiteside T., Sweet H. Proceedings of Highway Research board. 1950, 30.
66. Powers T.C. The mechanism of Frost Action in concrete. "Cement Lime and Gravel", 1966, 41, №5.
67. Fagerlund G. The international cooperative test of the critical degree saturation method of assessing the freezethaw resistance of concrete. "Mater. constr.", 1977, 10, №58.
68. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для крайнего севера. М.: Стойиздат, 1981.
69. Copeland L.E. and Hayes J.C. Porosity of hardened portlandcement pastes. J. Am. Const. Inst. 1956, febr.
70. PCA, Design and Control of Concrete Mixtures. 12<sup>th</sup> ed., Portland Cement Assoc., Skokie, IL, 1979.
71. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Ленинград: Стойиздат, 1989.
72. Красный И.М. Исследования морозостойкости мелкозернистых бетонов. Бетон и железобетон, 1969, №12.

73. Стольников В.В. Воздухововлекающие добавки в гидротехническом бетоне. Л.: Госэнергоиздат, 1953.
74. Невилль А.М. Свойства бетона. М.: Стойиздат, 1971.
75. Коупленд Л.Е., Кантро Д.Л., Вербе Г. Химия гидратации портландцемента. //Четвертый международный конгресс по химии цемента. М.: Стойиздат, 1964.
76. Taplin J.H. A Method for Following the Hydration Reaction in Portland Cement Paste. Australian Journal of Applied Science. 1959, Vol.10, №3, Sept.
77. Запорожец И.Д., Окорочков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона. М.: Стойиздат, 1966.
78. Мощанский Н.А. Плотность и стойкость бетонов. М.: Стойиздат, 1951.
79. Стольников В.В. Исследования по гидротехническому бетону. М.: Государственное энергетическое издательство, 1962.
80. Элбакидзе М.Г. Фильтрация воды через бетон и бетонные гидротехнические сооружения.
81. Дворкин Л.Й., Шамбан И.Б. Оптимальные параметры бетонов облицовок оросительных каналов. Гидротехника и мелиорация, 1980.- №6.
82. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стойиздат, 1980.
83. Чеховский Ю.В. Понижение проницаемости бетона. М.: Энергия, 1968.
84. Nyame, B.K. and Illston, J.M., Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste. Magazine of Concr. Res., 1981, 33.
85. Иванов Ф.М., Красновская Т.Г., Солнцева В.Л. Влияние тепло-влажностной обработки на структуру и свойства цементных растворов. труды международной конференции по проблемам ускорения твердения бетона при изготовлении сборных железобетонных конструкций. М.: 1968.
86. Иванов Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. М.: Транспорт, 1968.
87. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. М.: Стойиздат, 1976.
88. Элбакидзе М.Г., Насберг В.М. Ускоренный способ испытания бетона на водонепроницаемость. Гидротехническое строительство, 1957, №12.

89. Pihlajavaara S., Paroll H., On the correlation between permeability properties and strength of concrete. Cement and Concrete research, 1975, V.5, №4.
90. Бовин Г.П. Возведение водонепроницаемых сооружений из бетона и железобетона, М.: Стойиздат, 1969.
91. Сизов В.П. К вопросу прогнозирования водонепроницаемости бетона. Бетон и железобетон. №6, 1996.
92. Стольников В.В. Проектирование и строительство высоких плит. М.: Энергия, 1972.
93. Руководство по производству бетонных работ. М.: Стройиздат, 1975.
94. Парийский А.А. Методика экспериментального определения истинно-изотермического тепловыделения бетона. Тр.координационных совещаний по гидротехнике. Вып.41. Л.-Энергия, 1968.
95. Woods H., Steinour H., Starke R. Engineering News.- Record, 109, 1932.
96. Кинд В.А., Окорков С.Д., Вольфсон С.Л. Теплота твердения портландцементов различного химического состава.- Цемент, 1937, №7.
97. Сизов В.Н. Строительные работы в зимних условиях. Стройиздат.- Л., 1954.
98. Rastrup E. Heat of hydration in Concrete.- Magazine of Concrete Research.- 1954.
99. Марьямов Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона. М.- Стройиздат, 1970.
100. Свойства бетона, определяющие его трещиностойкость. Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 112, 1976.
101. Щербаков Е.Н. К оценке модуля упругости тяжелого бетона и раствора.-Бетон и железобетон.- 1970.- №3.
102. Стольников В.В., Литвинова Р.Е. Трещиностойкость бетона.- М.: "Энергия", 1972.
103. Рушук Г.М. О связи между прочностными характеристиками и динамическим модулем упругости цементных растворов. "Цемент", 1957.-№2.
104. Voellmy A. Influence du temps sur la deformation du beton. "RILEM Bulletin", № 9, 1960.
105. Hummel A. Von Einfluss der Zementart des Wasserzementverhältnisses und des Belastungsalters auf Kriechen von Beton. - "Zement-Kalk-

- Gips", 1959, № 12.
106. Улицкий И.И., Киреева С.В. Усадка и ползучесть бетонов заводского изготовления. Киев, "Будівельник", 1965.
  107. Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуэн Дж. - Наука о бетоне. - М.: Стройиздат, 1986.
  108. Венюа М. Цементы и бетоны в строительстве. М.: Стройиздат, 1980.
  109. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести). М.: Стройиздат, 1966.
  110. Мак Милан Ф.Р. Основные принципы приготовления бетон. Пер. с англ. М.-Л., 1935.
  111. Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1961.
  112. Колокольников В.С. Технология бетонных и железобетонных изделий. М.: «Высшая школа», 1970.
  113. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. Минск. «Наука и техника», 1977.
  114. Левин Л.И., Кайсер Л.А. - В сб.: Заводская технология сборного железобетона. ВНИИЖелезобетон, вып. 17. - М.: Стройиздат, 1972.
  115. Киреев И.А. Расчет состава высокопрочных и обычных бетонов и растворов. Киев, Госстройиздат, 1961.
  116. Гинзбург А.М., Сафронов В.Д. Составление и строение бетона. Ч. 1. - Гр. Укр. Гипромеца, 1930.
  117. Баженов П.И. Технология автоклавных материалов. А. Стройиздат, 1978.
  118. Fuller M., Thompson S. The Laws of Proportional Concrete. 1927.
  119. Болоней М. Грануляция и предвидение вероятной прочности бетонов. "Travaux", №30, 1935.
  120. Hummel A. Das Beton ABC. Zwölfte Auflage. Berlin, 1959.
  121. Иванов Н.Н. Строительство автомобильных дорог. М.: Авто-трансиздат, 1957.
  122. Дворкин Л.И., В.В. Шушпанов В.А. Структурный критерий удобоукладываемости бетонной смеси. Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1977. - № 11.
  123. Яшвили А.И. Определение среднего диаметра и удельной поверхности строительных песков. Изв. ТМИСГЭИ, 1964. - Т. 15.
  124. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач. К.: Вища шк., 1989.

125. Руководство по подбору составов тяжелого бетона. НИИЖБ.-М.: Стройиздат, 1979.
126. Руководство по производству бетонных работ в условиях сухого жаркого климата, М.: Стройиздат, 1977.
127. Hot Weather Concreting, 305R - 77, ACI Committee 305 Report, American Concrete Institute, Detroit, Revised 1982.
128. Cordon, W.A., and Thorpe, V., Control of Rapid Drying of Fresh Concrete by Evaporation Control, Proceedings, American Concrete Institute, Vol. 62, 1965, pages 977 - 985.
129. Рубин В.М., Шлаен А.Г. Бетонная облицовка каналов, М.: Агропромиздат, 1987, 184 с.
130. Михайлов А.В. Графики для назначения оптимальных условий твердения бетона дорожных конструкций, М.: "Транспорт", 1976, 48 с.
131. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Проектирование составов бетона с заданными свойствами. РГТУ, г.Ровно, 1999 г., 202 с.
132. Г.И. Горчаков, Э.Г. Мурадов Основы стандартизации и управления качеством продукции промышленности строительных материалов. М.: "Высшая школа", 1987, с.333.
133. A.G. Robertson Quality control and reliability. London, Thomas Nelson and Sons LTD, 1971, с.253.
134. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Производственная адаптация расчетных составов бетона.- Бетон и железобетон.-№6, 1998.
135. Бердов Г.И., Аронов Б.Л. Экспрессный контроль и управление качеством цементных материалов. Новосибирск.-Изд-во НГУ, 1992.
136. Хаютин Ю.Г., Дорф В.А. Технологический алгоритм автоматического регулирования качества бетона.- Бетон и железобетон.- 1978.-№9.
137. Райбман Н.С., Чадеев В.М. Построение моделей процессов производства.-М.: Энергия, 1975.
138. Мороз В.Н., Теплицкий Ф.Н., Френкель М.И. Автоматизация расчетов по подбору состава тяжелого бетона на линии ЭВМ.- Бетон и железобетон.-1980.-№4
139. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Компьютерная система управления составами бетона/ Инженерные проблемы современного бетона и железобетона.- Материалы межд.конференции.- Минск, 1997.

## Зміст

|   |     |
|---|-----|
| Передмова   | 3   |
| Розділ 1. Вихідні передумови і задачі проектування складів бетону                                     | 4   |
| 1.1. Вихідні передумови   | 4   |
| 1.2. Основні задачі проектування складів  | 6   |
| Розділ 2. Розрахункові залежності основних властивостей бетону  | 17  |
| 2.1. Міцність   | 17  |
| 2.2. Морозостійкість  | 41  |
| 2.3. Водонепроникність  | 61  |
| 2.4. Тепловідлення  | 74  |
| 2.5. Деформативні властивості   | 84  |
| Розділ 3. Водопотреба і співвідношення заповнювачів у бетонній суміші                                 | 94  |
| 3.1. Водопотреба  | 94  |
| 3.2. Зерновий склад і співвідношення заповнювачів   | 104 |
| Розділ 4. Приклади задач багатопараметричного проектування складів бетону                             | 120 |
| 4.1. Загальна схема розв'язання   | 120 |
| 4.2. Бетон для збірних залізобетонних конструкцій   | 125 |
| 4.3. Дорожній і гідротехнічний бетон.   | 140 |
| 4.4. Бетон, який застосовується взимку  | 162 |
| 4.5. Розрахунок складу бетону для умов сухого жаркого клімату   | 176 |
| Розділ 5. Адаптація розрахункових складів бетону у виробничих умовах і статистичний контроль міцності | 190 |
| 5.1. Адаптація розрахункових складів бетону у виробничих умовах                                       | 190 |
| 5.2. Управління якістю бетону за допомогою технологічних карт   | 198 |
| Література  | 207 |



*Леонід Йосипович Дворкін,  
Олег Леонідович Дворкін,  
Юрій Васильович Гарніцький*

**ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БЕТОНУ  
ІЗ ЗАДАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

Навчальний посібник

Підписано до друку 30.06.2000 р. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Папір друкарський № 1. Гарнітура Times. Друк високий.  
Ум.-друк. арк.13,5. Тираж 150 прим. Зам. №8.

*Видавництво Рівненського державного технічного університету  
33000, Рівне, вул.Соборна,11.*



Рівненський державний технічний університет