



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Міністерство освіти і науки України  
Міністерство оборони України  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
Державне підприємство «Центральний проектний інститут»



**РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
**З ПРОЕКТУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ**  
**ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД**

Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Рівне - 2018**



Авторський колектив: Є. М. Бабич, д.т.н., професор; Л. Й. Дворкін, д.т.н., професор; В. В. Житковський к.т.н., доцент; Д. В. Кочкар'юв, к.т.н., доцент; С. В. Філіпчук, к.т.н., доцент; О. М. Бордюженко, к.т.н., доцент, О. М. Приймачук, заслужений будівельник України, академік, М. М. Барановський, член Національної спілки архітекторів України.

*Рекомендовано до видання вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування.  
Протокол № 10 від 27 грудня 2017 р.*

*Рекомендовано до видання Науково-технічною радою  
Державного підприємства  
«Центральний проектний інститут»  
Протокол № 3 від 28 грудня 2017 року*

**Р36** Рекомендації з проектування залізобетонних конструкцій фортифікаційних споруд: Рекомендації / Бабич Є. М., Дворкін Л. Й., Житковський В. В. та ін. – Рівне : НУВГП, 2018 – 173 с.

**ISBN 978-966-327-398-3**

В рекомендаціях реалізована методологія проектування захисних конструкцій, в якій послідовно залежно від виду зброї розглядаються питання призначення механічних характеристик матеріалів, проектування складів високоміцних швидкотверднучих бетонів та конструкцій на їх основі.

**УДК 624.012.35:623.1/3**

**ISBN 978-966-327-398-3**

© Є. М. Бабич, Л. Й. Дворкін,  
В. В. Житковський, та ін., 2018  
© Національний університет  
водного господарства та  
природокористування, 2018



## ЗМІСТ

	Умовні позначення.....	5
	Вступ.....	8
1	ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД.....	10
1.1	Задачі проектування залізобетонних конструкцій.....	10
1.2	Загальна характеристика вогнепальної зброї.....	11
1.3	Визначення виду і класу бетону.....	11
1.4	Визначення необхідної товщини захисних конструкцій.....	15
1.5	Особливості проектування захисних конструкцій з механічними демпферами.....	22
1.6	Реконструкція існуючих фортифікаційних споруд.....	25
1.7	Розрахунок несучої здатності залізобетонних плит за деформаційною методикою з використанням дволінійної діаграми деформування бетону.....	28
1.8	Розрахунок кривизни елементів при руйнуванні.....	33
1.9	Розрахунок згинальних елементів за деформаційною методикою з використанням діаграми механічного стану бетону у вигляді поліному п'ятого ступеня.....	35
1.10	Спрощена методика розрахунку фортифікаційних споруд.....	37
1.11	Автоматизація розрахунків залізобетонних конструкцій фортифікаційних споруд.....	38
2	ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БЕТОНІВ З КОМПЛЕКСОМ НОРМОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ.....	43
2.1	Завдання на проектування складу бетону.....	43



2.2	Вибір вихідних матеріалів.....	44
2.3	Схема розрахунку складів важкого бетону.....	50
2.4	Визначення цементно-водного відношення.....	50
2.5	Визначення водопотреби бетонної суміші.....	57
2.6	Визначення витрати компонентів бетонної суміші.....	59
2.7	Проектування складів високоміцних бетонів.....	64
2.8	Проектування складів дрібнозернистих бетонів та фібробетонів.....	67
2.9	Експериментальне корегування складів бетонів.....	73
3	ПРИКЛАДИ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКЦІЙ ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД ТА СКЛАДІВ БЕТОНІВ.....	79
3.1	Типові приклади.....	79
3.2	Варифікаційні приклади.....	121
3.3	Приклади розрахунку за спрощеною методикою.....	126
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	130
	ДОДАТКИ.....	135
	ДОДАТОК А Табличні дані для розрахунку конструкцій.....	135
	ДОДАТОК Б Дані для розрахунку складів бетону.....	144



## УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$M_{ult}$  – максимальне значення згинаючого моменту, яке може сприйняти переріз

$f_c$  – міцність бетону на стиск

$f_{cm}$  – середня міцність бетону на стиск

$f_{ct}$  – міцність бетону на осьовий розтяг

$f_{ctf}$  – міцність бетону на розтяг при згині

$f_{cd}$  – розрахункове значення міцності бетону на стиск

$f_{ck,prism}$  – середнє значення міцності бетону за випробування призм із забезпеченістю 95%

$f_{c,d}$  – розрахункове значення міцності бетону на стиск при динамічних навантаженнях

$f_{ctd}$  – розрахункове значення міцності бетону на розтяг

$f_{ct,d}$  – розрахункове значення міцності бетону на розтяг при динамічних навантаженнях

$f_{ctk}$  – характеристичне значення міцності бетону на осьовий розтяг

$f_{ct}$  – середнє значення міцності бетону на осьовий розтяг за результатами випробування контрольних зразків

$f_{yd}$  – розрахункове значення міцності арматури на межі текучості

$f_y$  – значення міцності арматури на межі текучості

$E_{cd}$  – розрахункове значення модуля пружності бетону

$E_{c,d}$  – розрахункове значення модуля пружності бетону при динамічних навантаженнях

$E_{ck}$  – характеристичне значення модуля пружності бетону

$E_{cm}$  – середнє значення модуля пружності бетону

$E_s$  – розрахункове значення модуля пружності арматурної сталі

$1/r_{ult}$  – граничне значення кривизна по довжині елемента

$\varepsilon_c$  – відносні деформації стиснутого бетону

$\varepsilon_{cl}$  – значення відносних деформацій стиснутого бетону за напруженнях  $f_{cm}$

$\varepsilon_{cl,d}$  – значення відносних деформацій стиснутого бетону при напруженнях  $f_{c,d}$

$\varepsilon_{ct1,d}$  – значення відносних деформацій розтягнутого бетону при напруженнях



$\varepsilon_{cu,l}$  – відносні граничні деформації стиснутого бетону

$\varepsilon_{cu,d}$  – відносні граничні деформації стиснутого бетону при динамічних навантаженнях

$DEF_c$  – коефіцієнт динамічного зміцнення при стиску

$DEF$  – коефіцієнт динамічного зміцнення при розтязті

$\dot{\varepsilon}$  – швидкість зміни деформації

$A_s$  – площа перерізу розтягнутої арматури

$L, l$  – повна довжина елемента

$W_c$  – пружний момент опору робочого перерізу бетону прямокутного профілю

$b$  – ширина перерізу елемента

$d$  – робоча висота перерізу

$h$  – висота перерізу елемента

$l_0$  – розрахунковий проліт елемента

$l_s$  – довжина закладання арматури у бетон

$x$  – висота стиснутої зони бетону

$x_t$  – висота розтягнутої зони бетону

$\emptyset$  – діаметр повздовжньої арматури

$k$  – відношення робочої висоти перерізу до висоти стиснутої зони бетону

$\rho_f$  – коефіцієнт (процент) армування перерізу розтягнутою арматурою

$\omega$  – механічний коефіцієнт (процент) армування

$M_k$  – модуль крупності піску

$ПАР$  – поверхнево активні речовини

$A_{ef}$  – питома ефективна активність природних радіонуклідів

$f_{fk}$  – мінімальний опір розтягу фібри

$E_f$  – модуль пружності фібри

$r$  – вміст піску в суміші піску та щебеню (гравію)

$C$  – значення класу бетону за міцністю

$k_t$  – коефіцієнт необхідної міцності бетону

$R_q$  – активність цементу

$R_{q,np}$  – активність цементу після пропарювання

$F$  – морозостійкість бетону

$OK$  – осадка конусу бетонної суміші (рухомість)

$Ж$  – жорсткість бетонної суміші



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

$K_{ц.в.}$  – коефіцієнт “цементуючої ефективності”

$HГ$  – нормальна густина цементного тіста

$\rho_{ц}, \rho_{п}, \rho_{щ}$  – густина відповідно цементу піску, щебеню чи гравію

$\alpha$  – коефіцієнт розсунення зерен щебеню (гравію) цементно-піщаним розчином

$V_{з.п.}$  – об’єм затисненого в бетонній суміші повітря

$n$  – співвідношення між заповнювачем і цементом

$K_{зм}$  – коефіцієнт змочування заповнювача

$\rho_{б.с}$  – середня густина бетонної суміші

$\beta_{б}$  – коефіцієнт виходу бетонної суміші



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



## ВСТУП

Сучасне світове суспільство стурбоване збільшенням інтенсивності виникнення і проявлення різноманітних конфліктів, в тому числі і збройних. Виникають військові сутички на кордонах, а також на лініях розмежування у випадках агресії. Все це ставить перед державами складні задачі захисту своїх територій шляхом облаштування належним чином кордонів, а також зведення будівель і споруд, здатних захистити людей від терористичних актів.

Міждержавні кордони призначені для здійснення різноманітних функцій: пропуск людей при їх законному переміщенні з країни в країну; запобігання незаконній міграції; недопущення контрабанди; захист території країни від зовнішньої агресії. Кордон є найважливішим елементом забезпечення суверенітету та незалежності країни, цілісності її території. В зв'язку з цим до облаштування кордонів ставляться високі вимоги щодо їх надійності. Самі ж кордони включають в себе різноманітні елементи захисту та обслуговування і представляють собою складні інженерно-технічні системи. Крім цього, сучасність ставить задачі і захисту мирного населення, тобто зведення надійних захисних споруд цивільного призначення.

Надійність захисних споруд вимагає від них такі основні гарантії: безпеки для здоров'я і життя людей; збереження цілісності об'єкта та їхніх основних частин; використання об'єкта за призначенням; нормального функціонування технологічного процесу; необхідного рівня зручностей і комфорту для користувачів. Крім цього, фортифікаційні споруди повинні чинити надійний опір динамічним впливам різноманітної зброї. Наведеним вимогам відповідають залізобетонні конструкції, виготовлені з високоміцних швидкотверднучих бетонів та фібробетонів.

Ці Рекомендації з проектування залізобетонних конструкцій для фортифікаційних споруд розроблені на основі аналізу світового і вітчизняного досвіду та результатів експериментально-теоретичних досліджень створення високоміцних швидкотверднучих бетонів і фібробетонів та





Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

залізобетонних конструкцій на їхній основі, які виконані в Національному університеті водного господарства та природокористування.

В Рекомендаціях реалізована методологія проектування захисних конструкцій, залежно від виду зброї розглядаються питання призначення механічних характеристик матеріалів, проектування конструкцій та складів бетонів, наведені приклади та необхідні додатки.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



## 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ

### КОНСТРУКЦІЙ ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД

#### 1.1. Задачі проектування залізобетонних конструкцій

**1.1.1. Визначення умов армування, виду та класу бетону.** Даний тип задач необхідно вирішувати у випадку відомих параметрів зброї та конструкції фортифікаційної споруди. Задача зводиться до пошуку умов армування, виду та класу бетону при заданих інших параметрах. У даному випадку попередньо визначають необхідний коефіцієнт піддатливості проникненню матеріалу, за яким попередньо встановлюють необхідні міцнісні параметри матеріалу. Після їх встановлення перевіряється загальна міцність конструкції. За необхідності можуть збільшуватися міцнісні параметри шляхом використання вищих класів бетону, армування тощо. Рішенням таких задач необхідно пристосовувати конструкції фортифікаційних споруд, що проектуються, під задані види зброї.

**1.1.2. Визначення необхідної товщини захисних конструкцій.** При вирішенні цього типу задач повинні бути наперед відомі параметри матеріалу, які визначаються конструктивними та технологічними особливостями відповідних заводів та підприємств будівельної індустрії. За відомих параметрів зброї необхідно із умов пробиття встановити потрібну товщину фортифікаційної конструкції, після чого уточняється значення товщини із умов міцності.

**1.1.3. Проектування захисних споруд з механічними демпферами.** В окремих випадках для суттєвого підвищення захисної здатності фортифікаційних споруд можна використовувати механічні демпфери. При їх проектуванні необхідно за конструктивними вимогами підібрати параметри демпферів, після чого визначити параметри захисної конструкції.

**1.1.4. Реконструкція існуючих фортифікаційних споруд.** У більшості випадків задачі зводяться до вибору способів збільшення захисних показників конструкцій при заданому типу зброї. Серед можливих способів можна



застосовувати влаштування обвалування ґрунтом, посилення додатковим шаром бетону або фібробетону, влаштування додаткової армованої стіни або демпферу. Вибраний підсилення необхідним чином повинен бути обґрунтованим і запроектованим.

## 1.2. Загальна характеристика вогнепальної зброї

1.2.1. Розрахунок фортифікаційних споруд повинен виконуватись з урахуванням параметрів вогнепальної зброї, до основних з яких належать наступні:

- швидкість підходу боеприпасу до захисної товщі  $v_c$ , м/с;
- маса боеприпасу  $m$ , кг;
- калібр снаряду  $d$ , мм;
- висота головної частини снаряду  $H_2$ , м (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Геометричні характеристики снаряду

1.2.2. Швидкість підходу боеприпасу до захисної товщі  $v_c$  повинна визначатися за балістичними розрахунками. Допускається приймати дану швидкість рівною початковій швидкості боеприпасу.

1.2.3. Основні параметри вогнепальної зброї (швидкість підходу боеприпасу до захисної товщі, маса боеприпасу, калібр снаряду, висота головної частини снаряду) встановлюються за паспортними даними. При відсутності певних даних допускається використовувати характеристики зброї з близькими параметрами. Основні параметри окремих боеприпасів наведені в табл. А.1 Додатка А.

## 1.3. Визначення виду і класу бетону

1.3.1. Для призначення виду і класу бетону та умов армування повинні бути задані вихідні дані, які включають:



- геометричні параметри розрахункової стіни або перекриття фортифікаційної споруди: розрахунковий проліт  $l_0, \text{м}$ ; висота (ширина)  $H, \text{м}$ ; товщина  $h, \text{м}$ ;

- параметри вогневої зброї, вогнепальний вплив, якої повинно витримувати захисне покриття: швидкість підходу боеприпасу до захисної товщі  $v_c, \text{м/с}$ ; маса боеприпасу  $m, \text{кг}$ ; калібр снаряду  $d, \text{мм}$ ; висота головної частини снаряду  $H_2, \text{м}$ .

1.3.2. Допоміжні параметри визначаються за наступними формулами:

- коефіцієнт форми головної частини снаряду  $\lambda_1$ :

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,43 \sqrt{\left(\frac{H_2}{d}\right)^2}; \quad (1.1)$$

- коефіцієнт калібру снаряду  $\lambda_2$ :

$$\lambda_2 = 2,83\sqrt{d} - 1,3\sqrt{d}; \quad (1.2)$$

- коефіцієнт, який враховує форму головної частини снаряду та його калібр:

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2. \quad (1.3)$$

1.3.3. Коефіцієнти піддатливості проникненню матеріалу з умови, що пробивання відбувається під прямим кутом до поверхні захисної конструкції, за виразом:

$$k_{np} = \frac{hd^2}{\lambda m v_c}. \quad (1.4)$$

1.3.4. Характеристичні значення призмової міцності бетону призначаються за формулами:

- для важкого бетону (в межах від С15 до С100)

$$f_{fck,prism} = \frac{13,37 - k_{np} \times 10^7}{0,05}; \quad (1.5)$$

- для дрібнозернистого бетону (в межах від С15 до С80)

$$f_{fck,prism} = \frac{13,75 - k_{np} \times 10^7}{0,05}; \quad (1.6)$$

- для дрібнозернистого сталевібробетону (в межах від С15 до С80)



$$f_{fck,prism} = \frac{11,55 - k_{np} \times 10^7}{0,05}. \quad (1.7)$$

1.3.5. За визначеною призмовою міцністю бетону приймається вид і клас бетону та за табл. А.1 визначаються його основні характеристики:  $f_{fck,prism}$ ,  $f_{cd}$ ,  $f_{ctb}$ ,  $E_c$ ,  $\varepsilon_{c1}$ ,  $\varepsilon_{cu1}$

1.3.6. Значення коефіцієнту піддатливості проникненню для встановленого типу та класу бетону знаходяться за наступними формулами:

- для важкого бетону (від С15 до С100)

$$k_{np} = (13,37 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}; \quad (1.8)$$

- для дрібнозернистого бетону (від С15 до С80)

$$k_{np} = (13,75 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}; \quad (1.9)$$

- для дрібнозернистого сталевібробетону (від С15 до С80)

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}. \quad (1.10)$$

1.3.7. Глибина проникнення боєприпасу в захисне покриття визначається за формулою

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c. \quad (1.11)$$

1.3.8. Час дії навантаження знаходиться за формулою

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_c}. \quad (1.12)$$

1.3.9. Граничні деформації стиску відповідного класу та типу бетону  $\varepsilon_{cu}$  попередньо приймаються рівними  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1}$  (табл. А.1).

1.3.10. Швидкість зміни деформацій приймається рівною

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau}. \quad (1.13)$$

1.3.11. Значення  $\varepsilon_{cu1}$  в розрахунках необхідно використовувати з урахуванням зміцнення бетону при впливах динамічного характеру. Для цього необхідно знайти коефіцієнт динамічного зміцнення бетону за формулою:



$$\left\{ \begin{array}{l} DEF_c = \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} \quad \text{при } 30 \times 10^{-6} \leq \dot{\varepsilon} \leq (30 + 23i) c^{-1}; \\ DEF_c = \eta \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^k \quad \text{при } (30 + 23i) \leq \dot{\varepsilon} \leq 300 c^{-1}, \end{array} \right. \quad (1.14)$$

де  $\alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_c / f_{c0}}, f_{c0} = 10 \text{ МПа}; \quad \dot{\varepsilon}_{sc} = 30 \times 10^{-6} c^{-1},$

$$\gamma_s = 10^{(6,15\alpha_s - 2)}, \eta = (1 - 0,3392i)\gamma_s, k = \frac{1 + 0,05i}{3},$$

$$i = \begin{cases} 0 - \text{для важкого бетону;} \\ 1 - \text{для сталевіфібробетону.} \end{cases}$$

У виразах(1.14):  $\dot{\varepsilon}$  – швидкість зростання деформацій,  $c^{-1}$ ;  $f_c$  – міцність бетону на стиск при статичній дії навантаження, МПа.

1.3.12. Уточнення значення граничних деформацій стиску відповідного класу та типу бетону здійснюється за формулою:

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c}. \quad (1.15)$$

1.3.13. Розбіжність між попередньо прийнятими значеннями граничних деформацій стиску  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cul}$  та  $\varepsilon_{cu1,d}$ , що отримані за виразом (1.15) не повинна перевищувати 5%. Якщо різниця більше 5%, необхідно визначити нове значення коефіцієнту динамічного зміцнення за п. 2.1.9-2.1.11, прийнявши  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1,d}$ .

1.3.14. Інші динамічні характеристики бетону вибраного типу та класу знаходяться за формулами:

- коефіцієнт динамічного зміцнення при розтязі

$$DEF = DEF_c^{2/3}; \quad (1.16)$$

- розрахунковий опір стиску при встановленому динамічному впливі

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c; \quad (1.17)$$



- розрахунковий опір розтягу при встановленому динамічному впливі

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct}; \quad (1.18)$$

- модуль деформацій при встановленому динамічному впливі

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2; \quad (1.19)$$

- деформаційні характеристики

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF_c}; \quad (1.20)$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF}; (\varepsilon_{ct1} = 667 \times 10^{-5} - \text{для фібробетонів}); \quad (1.21)$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF}; (\varepsilon_{ctu} = 1000 \times 10^{-5} - \text{для фібробетонів}). \quad (1.22)$$

1.3.15. Гранична кривизна  $\frac{1}{r_{ult}}$  та максимальний згинаючий момент, який може сприйняти конструкція  $M_{ult}$ , визначаються за формулами, наведеними в п.1.7 та п.1.8, відповідно.

1.3.16. За наявності визначених всіх параметрів умова міцності конструкції перевіряється за виразом

$$mv_c^2 \leq \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} l. \quad (1.23)$$

Виконання умови (1.23) свідчить про те, що вид і клас бетону для конструкції визначено правильно. При невиконанні умови (1.23) необхідно збільшити клас або тип бетону та повторити розрахунок починаючи з п. 1.3.5. В окремих випадках можна змінити конструкцію фортифікаційної споруди або влаштувати обвалування.

## 1.4. Визначення необхідної товщини захисних конструкцій

1.4.1. Для визначення товщини захисних конструкцій необхідні такі дані:

- геометричні параметри розрахункової стіни або перекриття фортифікаційної споруди: розрахунковий проліт  $l_0$ , м, висота (ширина)  $H$ , м,;



- параметри вогневої зброї, вогнепальний вплив, якої повинно витримувати захисне покриття: швидкість підходу боеприпасу до захисної товщі  $v_c$ , м/с; маса боеприпасу  $m$ , кг; калібр снаряду  $d$ , мм; висота головної частини снаряду  $H_c$ , м;
- клас та тип бетону, із заданими фізико-механічними характеристиками;
- схема та параметри армування, що планується.

1.4.2. Встановлюється вплив армування на міцність бетону. Вплив армування на міцність бетону необхідно враховувати при наявності наступних конструктивних умов:

- 1) площі перерізу стержнів на одиницю довжини в одному та в іншому напрямках не відрізняються більш ніж у 1,5 рази;
- 2) відстань між стержнями одного напрямку не перевищують 150 мм, і не перевищують більше, ніж 1/3 меншої сторони перерізу елемента.

1.4.3. Якщо конструктивні умови армування відповідають п. 1.4.2, приведена міцність бетону з урахуванням армування визначається за формулою

$$f_{c,red} = f_{fck,prism} + \varphi \mu_{xy} f_{s,xy}, \quad (1.24)$$

де  $f_{s,xy}$  – розрахунковий опір арматури,

$\varphi$  – коефіцієнт ефективності армування, що визначається за виразом

$$\varphi = \frac{1}{0,23 + \psi}, \quad (1.25)$$

$$\psi = \frac{\mu_{xy} f_{s,xy}}{f_c + 10}, \quad (f_c, f_{s,xy} - \text{в МПа}), \quad (1.26)$$

$$\mu_{xy} = \frac{n_x A_{sx} l_x + n_y A_{sy} l_y}{A_{ef} s}. \quad (1.27)$$

Для дрібнозернистого бетону коефіцієнт  $\varphi$  приймається не більше одиниці.

У виразах (1.24) і (1.27):

$n_x, A_{sx}, l_x$  – відповідно число стержнів, площа поперечного перерізу і довжина стержня в одному напрямку;





$n_y, A_{sy}, l_y$  – те саме, в іншому напрямку;

$A_{ef}$  – площа перерізу бетону, що знаходиться в середині контуру сіток, (рис. 1.2);

$s$  – відстань між стержнями в напрямку дії динамічного навантаження (рис. 1,2).

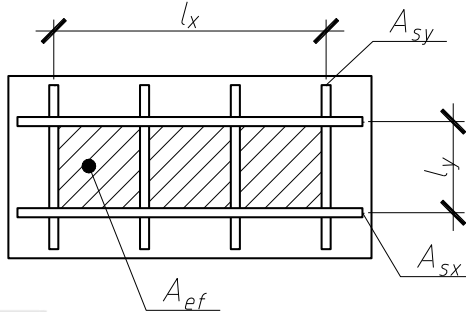


Рис. 1.2. До визначення приведеної міцності бетону

1.4.4. Якщо умови армування не відповідають конструктивним умовам п. 1.4.2, попередньо встановлюється значення коефіцієнту піддатливості проникненню для встановленого типу та класу бетону за формулами:

- для важкого бетону (від С15 до С100)

$$k_{np} = (13,37 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}; \quad (1.28)$$

- для дрібнозернистого бетону (від С15 до С80)

$$k_{np} = (13,75 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}; \quad (1.29)$$

- для дрібнозернистого сталевібробетону (від С15 до С80)

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}. \quad (1.30)$$

У випадку залізобетонної плити із армуванням, що відповідає конструктивним вимогам п. 1.4.2, у виразах (1.28)-(1.30) необхідно замість  $f_{fck,prism}$  приймати  $f_{c,red}$ .

1.4.5. Глибина проникнення боєприпасу в захисне покриття встановлюється за формулою:



$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c. \quad (1.31)$$

1.4.6. Товщина захисної конструкції приймається не менше глибини проникнення боєприпасу  $h \geq h_{np}$ .

1.4.7. Час дії навантаження знаходиться за формулою:

$$\tau = \frac{2h}{v_c}. \quad (1.32)$$

1.4.8. Граничні деформації стиску відповідного класу та типу бетону попередньо призначаються за табл. А.1 при  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1}$ .

1.4.9. Швидкість зміни деформацій визначається за формулою:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau}. \quad (1.33)$$

1.4.10. Коефіцієнт динамічного зміцнення бетону знаходиться за формулою:

$$\left. \begin{aligned} DEF_c &= \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} \quad \text{при } 30 \times 10^{-6} \leq \dot{\varepsilon} \leq (30 + 23i) c^{-1}; \\ DEF_c &= \eta \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^k \quad \text{при } (30 + 23i) \leq \dot{\varepsilon} \leq 300 c^{-1}, \end{aligned} \right\} \quad (1.34)$$

де  $\alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_c / f_{c0}}$ ,  $f_{c0} = 10 \text{ МПа}$ ;  $\dot{\varepsilon}_{sc} = 30 \times 10^{-6} c^{-1}$ ,

$$\gamma_s = 10^{(6,15\alpha_s - 2)}, \eta = (1 - 0,3392i)\gamma_s, k = \frac{1 + 0,05i}{3},$$

$$i = \begin{cases} 0 - \text{для важкого бетону;} \\ 1 - \text{для сталевібробетону.} \end{cases}$$

1.4.11. Значення граничних деформацій стиску відповідного класу та типу бетону обчислюється за формулою:

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c}. \quad (1.35)$$



1.4.12. Обчислюється різниця між попередньо прийнятими значеннями граничних деформацій стиску  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1}$  та  $\varepsilon_{cu1,d}$ , яка не повинна перевищувати 5%. Якщо різниця більше 5%, визначаємо нове значення коефіцієнту динамічного зміцнення за п. 1.4.9 – 1.4.11, прийнявши  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1,d}$ .

1.4.13. Динамічні характеристики бетону вибраного класу та типу знаходяться за формулами:

- коефіцієнт динамічного зміцнення при розтязі

$$DEF = DEF_c^{2/3}; \quad (1.36)$$

- розрахунковий опір стиску при встановленому динамічному впливі

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c; \quad (1.37)$$

- розрахунковий опір розтягу при встановленому динамічному впливі

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct}; \quad (1.38)$$

- модуль деформацій при встановленому динамічному впливі

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2; \quad (1.39)$$

- деформаційні характеристики

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c}; \quad (1.40)$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF}; (\varepsilon_{ct1} = 667 \times 10^{-5} \text{ – для фібробетонів}); \quad (1.41)$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF}; (\varepsilon_{ctu} = 1000 \times 10^{-5} \text{ – для фібробетонів}). \quad (1.42)$$

1.4.14. Коефіцієнти динамічного зміцнення арматури необхідно визначати за графіком, наведеним на рис. 1.3. Значення межі текучості арматури у залежності від її класу при динамічних впливах знаходиться за рис. 1.4 або за системою:



$$f_{y,d} = DEF_s \times f_y = \begin{cases} A - 240, \left(1 + 2,227 \times \dot{\varepsilon}\right) f_y \leq 1,48; \\ A - 400, \left(1 + 1,272 \times \dot{\varepsilon}\right) f_y \leq 1,27; \\ A - 500, \left(1 + 0,75 \times \dot{\varepsilon}\right) f_y \leq 1,15. \end{cases} \quad (1.43)$$

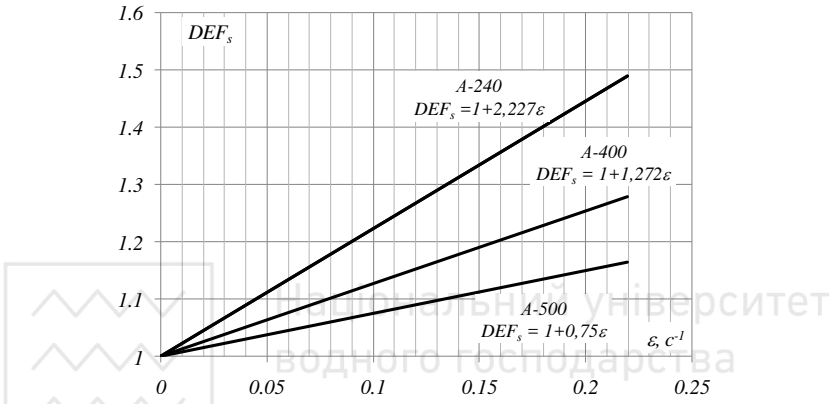


Рис. 1.3. Зміна коефіцієнта зміцнення арматурної сталі залежно від швидкості зміни деформацій

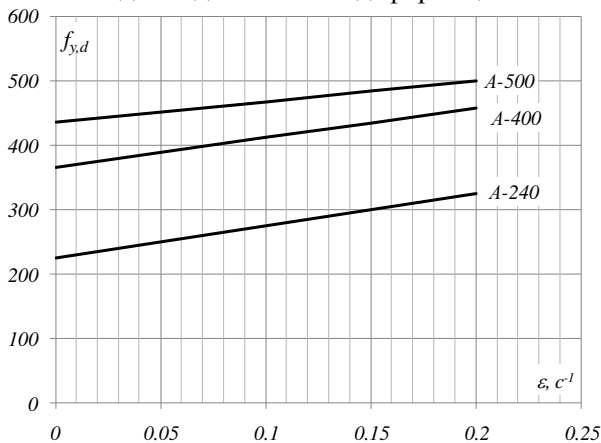


Рис. 1.4. Залежність межі текучості при динамічних впливах  $f_{y,d}$  від швидкості зміни деформацій  $\dot{\varepsilon}$



1.4.15. Визначення граничної кривизни  $\frac{1}{r_{ult}}$  та згинаючого

моменту  $M_{ult}$  здійснюється відповідно до п. 1.7 та п. 1.8.

1.4.16. За отриманими параметрами перевіряється умова

$$mv_c^2 \leq \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} l. \quad (1.44)$$

Якщо умова (1.44) виконується, то вважається, що вид і клас бетону, армування і товщина конструкції встановлені вірно. За невиконання умови (1.44) необхідно збільшити товщину захисного покриття та повторити розрахунок починаючи з п. 1.4.15.





## 1.5. Особливості проектування захисних конструкцій з механічними демпферами

1.5.1. Конструкція захисної споруди із механічним демпфером повинна складатися із: захисної плити, демпфера та несучої плити (рис. 1.5).

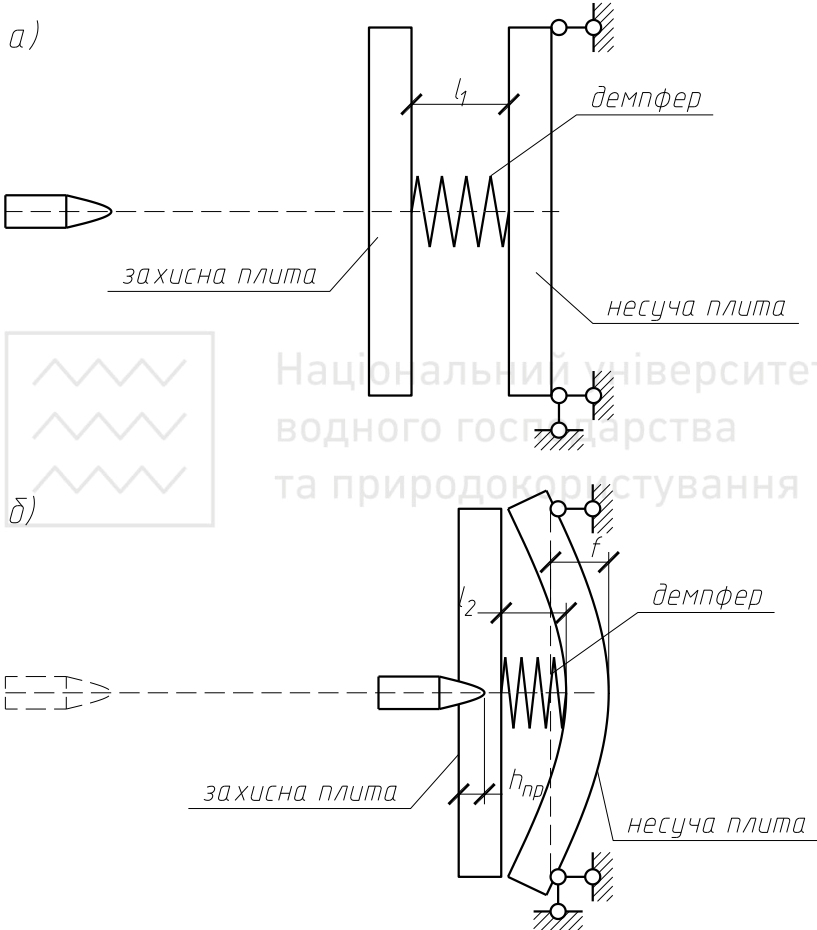


Рис. 1.5. Схема захисної споруди із демпфером: а) до пробою; б) після пробою



1.5.2. У розрахунках беруться до уваги тільки ті демпфери, які розташовуються в межах основи піраміди продавлювання захисної плити від дії боєприпасу.

1.5.3. При проектуванні необхідно враховувати, що механічний демпфер дозволяє зменшити кінетичну енергію боєприпасу та знизити його швидкість.

1.5.4. Потенціальна енергія пружинного механічного демпфера (рис. 1.6) визначається за формулою:

$$W_d = k_2 \frac{2\pi R n}{4G} \frac{\pi d^2}{4} \tau_y^2, \quad (1.45)$$

де  $G$  – модуль пружності при зсуві (для більшості сталей  $G = 8 \times 10^4$  МПа);

$n$  – кількість витків;

$d$  – діаметр поперечного перерізу стержня пружини, м;

$R$  – середній радіус пружинного демпфера, м;

$\tau_y$  – граничні напруження на зріз (для більшості сучасних сталей граничні значення напружень на зріз знаходяться у межах  $\tau_y = 400..500$  МПа), МПа;

$k_2$  – поправочний коефіцієнт, який залежить від відношення  $2R/d$  (табл. 1.1).

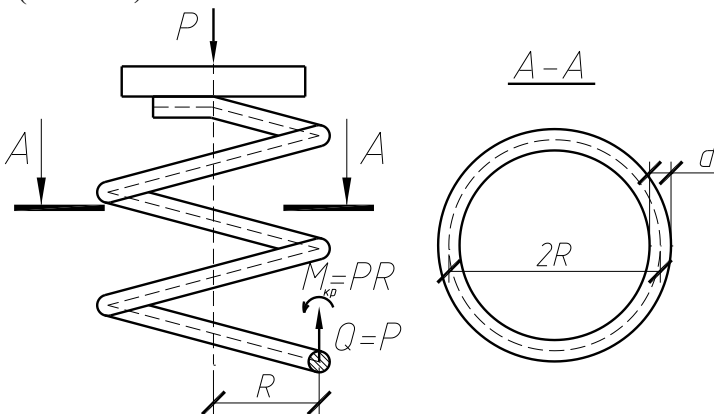


Рис. 1.6. Механічний пружинний демпфер



Таблиця 1.1

Поправочний коефіцієнт  $k_2$

№ з/п	Коефіцієнт	Відношення $2R/d$					
		3	4	5	6	8	10
1	$k_2$	1,11	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05

Примітка. Проміжні значення визначаються інтерполяцією.

1.5.5. Кінетична енергія боеприпасу з урахуванням роботи демпферів визначається за формулою:

$$mv_1^2 = 2W_d n, \quad (1.46)$$

де  $n$  – кількість демпферів, які попадають у піраміду продавлювання захисної плити від дії боеприпасу, шт,

$v_1$  – швидкість снаряду з урахуванням роботи демпферів, м/с.

1.5.6. Швидкість снаряду з урахуванням роботи демпферів дорівнює

$$v_1 = \sqrt{\frac{mv^2 - 2W_d n}{m}}. \quad (1.47)$$

1.5.7. Перевірку міцності захисних покриттів з демпферами можна виконати в такій послідовності:

1. За конструктивними вимогами попередньо приймається конструкція механічного демпфера.
2. Визначається кількість демпферів, які розташовуються у піраміді продавлювання захисної плити від дії боеприпасів:

$$n = \left(\frac{h}{R}\right)^2, \quad (1.48)$$

де  $h$  – товщина захисної плити, м.

3. Визначається потенціальна енергія пружинного механічного демпфера за виразом (1.45) або за табл. А.6.
4. Визначається швидкість снаряду з урахуванням роботи демпферів за формулою (1.47).
5. Знаходиться кінетична енергія боеприпасу з урахуванням роботи демпферів за формулою (1.46).
6. Подальший розрахунок залежить від типу задач і виконується за п. 1.2 або п. 1.3 із встановленими значеннями швидкості боеприпасу та кінетичної енергії. При розрахунках з





механічними демпферами допускається нехтувати впливом енергії прогину несучої плити внаслідок низького її значення.

## 1.6. Реконструкція існуючих фортифікаційних споруд

1.6.1. Для проектування підсилення залізобетонних конструкцій при реконструкції використовуються наступні вихідні дані:

- геометричні параметри існуючої стіни або перекриття фортифікаційної споруди: розрахунковий проліт  $l_0$ , м, висота (ширина)  $H$ , м;
- характеристики матеріалу існуючої стіни: класи матеріалів, фізико-механічні характеристики; розрахункові характеристики;
- параметри вогневої зброї, вогнепальний вплив якої повинна витримувати реконструйована фортифікаційна споруда: швидкість підходу боеприпасу до захисної товщі  $v_c$ , м/с; маса боеприпасу  $m$ , кг; калібр снаряду  $d$ , мм; висота головної частини снаряду  $H_s$ , м;
- кількість шарів посилення, клас та тип бетону посилення;
- схема та параметри армування, що планується.

1.6.2. Основною задачею при реконструкції є встановлення товщини додаткового захисного шару. Для цього можна використати послідовність розрахунку, який наводиться подальше.

1.6.3. При посиленні існуючих фортифікаційних споруд необхідно розглядати багатошарову конструкцію (рис. 1.7). Підсилення необхідно виконувати таким чином, щоб боеприпас міг пробивати додаткову захисну стіну посилення, але не повинен пробивати існуюче покриття.

1.6.4. Встановлюється швидкість боеприпасу, яка необхідна для пробігу усіх шарів за виразом

$$v_{chi} = \frac{h_i d^2}{\lambda k_{npi} m}, \quad (1.49)$$

де  $h_i$  – товщина  $i$ -го шару комплексної багатошарової конструкції;

$k_{npi}$  – коефіцієнт піддатливості проникненню  $i$ -го шару комплексної багатошарової конструкції.

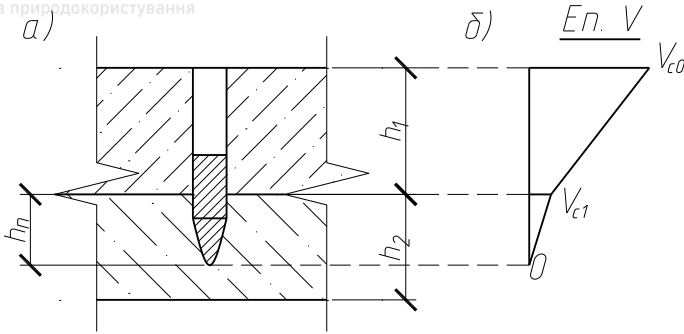


Рис. 1.7. До розрахунку пробою комплексної багатошарової конструкції: а) проникнення боеприпасу в багатошарову конструкцію; б) еюра зміни швидкості по товщині захисного покриття

1.6.5. Перевіряється чи відбувається пробивання конструкції за формулою:

$$\sum_{i=1}^n v_{chi} \geq v_{c0}, \quad (1.50)$$

де  $n$  – кількість шарів комплексної багатошарової конструкції.

При виконанні умови (1.50) пробій конструкції не відбувається. При невиконанні даної умови необхідно збільшити товщину шарів захисної конструкції або збільшити їх міцність.

1.6.6. Визначається шар, у якому застрягне боеприпас. Для цього перевіряється виконання умови (1.50) для кожного  $i$ -того шару. При якому значенні  $i_n$  буде виконуватись умова, у такому ж номері шару застрягне боеприпас.

1.6.7. Встановлюється швидкість підходу боеприпасу до поверхні шару, в якому він застрягне, за формулою

$$v_{cin} = v_{c0} - \sum_{i=1}^{i_n} v_{chi}. \quad (1.51)$$

1.6.8. Глибина проникнення боеприпасу у шар, в якому він застрягне, дорівнює

$$h_{in} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_{cin}. \quad (1.52)$$



1.6.9. Загальна глибина пробивання знаходиться за виразом:

$$h_{np\Sigma} = \sum_{i=1}^{i_n} h_i + h_{in}. \quad (1.53)$$

1.6.10. Час дії навантаження визначається для кожного шару окремо за формулою:

$$\tau = \frac{2h_i}{v_{cin}}. \quad (1.54)$$

1.6.11. Подальший розрахунок залежно від задачі виконується за п. 1.2 або п. 1.3.

1.6.12. Максимальний згинаючий момент, який може сприйняти багат шарова конструкція визначається за формулою:

$$M_{ult\Sigma} = \sum_{i=1}^n M_{ulti}, \quad (1.55)$$

де  $M_{ulti}$  – максимальний згинальний момент, який може сприйняти відповідний шар комплексної захисної конструкції,  $n$  – загальна кількість шарів комплексної захисної конструкції.

1.6.13. Міцність багат шарової конструкції при дії динамічного навантаження повинна перевірятися за умовою:

$$mv_c^2 \leq \frac{4M_{ult\Sigma}}{l} h_{np\Sigma} + \frac{1}{3} M_{ult1} \frac{l}{r_{ult1}}, \quad (1.56)$$

де  $M_{ult1}$  – максимальний згинальний момент, який може сприйняти перший захисний шар комплексної конструкції,  $\frac{l}{r_{ult1}}$  – кривизна в момент руйнування першого захисного шару комплексної конструкції.

1.6.14. Товщина захисного обвалування захисних споруд визначається за формулою:

$$h_2 = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} V_e, \quad (1.57)$$

де  $k_{np}$  – коефіцієнту піддатливості проникненню для відповідного матеріалу (табл. А.7);

$V_e$  – швидкість боєприпасу, м/с.



## 1.7. Розрахунок несучої здатності залізобетонних плит за деформаційною методикою з використанням дволінійної діаграми деформування бетону

### А. Залізобетонні конструкції.

1.7.1. Відповідно до ДСТУ Б В.2.6-156:2010 розрахунок несучої здатності залізобетонних конструкцій необхідно виконувати за нелінійною деформаційною методикою, сутність якої полягає у тому, що враховується приріст не зусиль, а деформацій у перерізі. Водночас допускається використовувати спрощені діаграми залежності напруження-деформації бетону, в якості яких можна приймати дволінійну залежність.

1.7.2. За використанням спрощеної діаграми деформування бетону допускається приймати рівномірний розподіл напружень в стиснутому бетоні, замінюючи криволінійну епюру напружень на прямокутну шляхом введенням коефіцієнтів  $\lambda$  та  $\eta$  (рис. 1.8).

Значення коефіцієнтів  $\lambda$ ,  $\eta$ , які визначають фактичну висоту та міцність, стиснутої зони бетону визначаються за виразами:

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 \text{ при } f_{ck} \leq 50 \text{ МПа}; \\ 0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400} \text{ при } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ МПа}; \end{cases} \quad (1.58)$$

$$\eta = \begin{cases} 1,0 \text{ при } f_{ck} \leq 50 \text{ МПа}; \\ 1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \text{ при } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ МПа}. \end{cases} \quad (1.59)$$

Для дрібнозернистого бетону  $\lambda=0,7$ .

1.7.3. Значення несучої здатності згинальних залізобетонних елементів прямокутного перерізу з одиничним армуванням при  $\xi = x/d \leq \xi_R$  визначається за формулою:

$$M_{ult} = \lambda \eta f_c b x (d - 0,5 \lambda x), \quad (1.60)$$

де  $x$  – висота стиснутої зони залізобетонного елемента визначається за формулою:



$$x = \frac{1}{\lambda \eta} \frac{f_{yd} A_s}{f_c b} \quad (1.61)$$

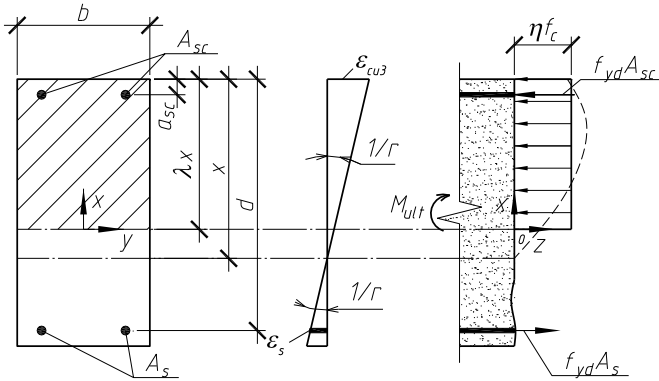


Рис. 1.8. Схема зусиль та епюри напружень у нормальному перерізі при використанні дволінійної діаграми деформування бетону

1.7.4. Для елементів із подвійним армуванням:

а) при  $\xi = x/d \leq \xi_R$

$$M_{ult} = \lambda \eta f_c b x (d - 0,5 \lambda x) + f_{yd} A_{sc} (d - a_{sc}), \quad (1.62)$$

$$x = \frac{1}{\lambda \eta} \frac{f_{yd} A_s - f_{yd} A_{sc}}{f_c b} \quad (1.63)$$

б) при  $\xi = x/d > \xi_R$

$$M_{ult} = \lambda \eta f_c b x_R (d - 0,5 \lambda x_R) + f_{yd} A_{sc} (d - a_{sc}). \quad (1.64)$$

Граничне значення висоти стиснутої зони визначається за виразом:

$$\xi_R = \frac{x_R}{d} = \frac{\varepsilon_{cu,3}}{\varepsilon_{cu,3} + \varepsilon_{s0}}, \quad (1.65)$$

де  $\varepsilon_{s0} = \frac{f_{yd}}{E_s}$  – розрахункове значення граничних відносних деформацій арматури;



$\varepsilon_{cu,3}$  – граничні значення стиснутого бетону при використанні спрощеної діаграми деформування.

1.7.5. Допускається несучу здатність згинальних елементів визначати з використанням модифікованих розрахункових опорів залізобетону. В цьому випадку несучу здатність визначають за формулою:

$$M_{ult} = W_c f_{zM}, \quad (1.66)$$

де  $W_c = \frac{bd^2}{6}$  – момент опору робочого перерізу бетону

елемента, що розраховується;

$f_{zM}$  – розрахунковий опір залізобетону на згин, який залежить від класів бетону і арматури, форми перерізу та процента армування перерізу визначається за виразом

$$f_{zM} = k_z f_c. \quad (1.67)$$

Параметр  $k_z$  обчислюється залежно від механічного коефіцієнта армування  $\omega$ , за таблицями.

*Б. Фібробетонні конструкції без армування поздовжньою арматурою.*

1.7.6. В розрахунках фібробетонних згинальних елементів допускається використання спрощеної моделі роботи фібробетону, яка приймається із припущень прямокутного розподілу напружень у стиснутій та розтягнутій зонах бетону (рис. 1.9).

1.7.7. Значення несучої здатності згинальних фібробетонних елементів прямокутного перерізу без поздовжнього армування визначається за виразом:

$$M_{ult} = 0,5 \eta f_{fc} b x_p h, \quad (1.68)$$

де  $x_p$  – висота стиснутої зони за спрощеної прямокутної епюри напружень бетону фібробетонного елемента без поздовжнього армування визначається за формулою:

$$x_p = \frac{\eta_t k f_{fct} h}{\eta_t k f_{fct} h + \eta f_{fc}}, \quad (1.69)$$



де  $k = 0,56$ ;

$\eta_t$  – коефіцієнт повноти епюри напружень у розтягнутій зоні в перерізі фібробетонного елемента, приймається у залежності від відношення опору фібробетону на розтяг при згині, до остаточної міцності фібробетону на розтяг при згині.

$$\eta_t = \begin{cases} 0,75 \text{ при } 0,5 \leq \frac{f_{fct3}}{f_{fct}} < 0,7; \\ 0,85 \text{ при } 0,7 \leq \frac{f_{fct3}}{f_{fct}} < 0,9; \\ 0,95 \text{ при } 0,9 \leq \frac{f_{fct3}}{f_{fct}} < 1,1; \\ 1,05 \text{ при } 1,1 \leq \frac{f_{fct3}}{f_{fct}} < 1,3; \\ 1,15 \text{ при } 1,3 \leq \frac{f_{fct3}}{f_{fct}}. \end{cases} \quad (1.70)$$

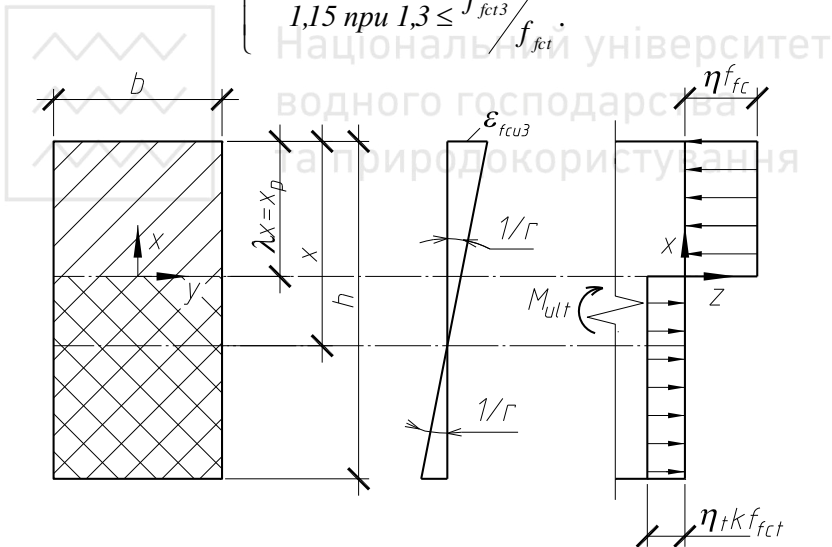


Рис. 1.9. Схема зусиль та епюри напружень у перерізі, нормальному до поздовжньої осі згинального фібробетонного елемента прямокутного перерізу без поздовжнього армування при розрахунку його за міцністю



1.7.8. Нелінійна деформаційна модель з використанням функції Єврокоду-2 для стиснутої та розтягнутої зони бетону може бути реалізована з використанням ЕОМ.

*В. Фібробетонні конструкції з армуванням поздовжньою арматурою.*

1.7.9. Значення несучої здатності згинальних фібробетонних елементів прямокутного перерізу з поздовжнім армуванням при  $\xi = x_p / d \leq \xi_R$  визначається за виразом (рис. 1.10)

$$M_{ult} = \eta f_{jc} b x_p (d - 0,5 \lambda x_p) + \eta_t k f_{jcc} b (h - x_p) \left( \frac{h - x}{2} - a \right) + f_{yd} A_{sc} (d - a_{sc}). \quad (1.71)$$

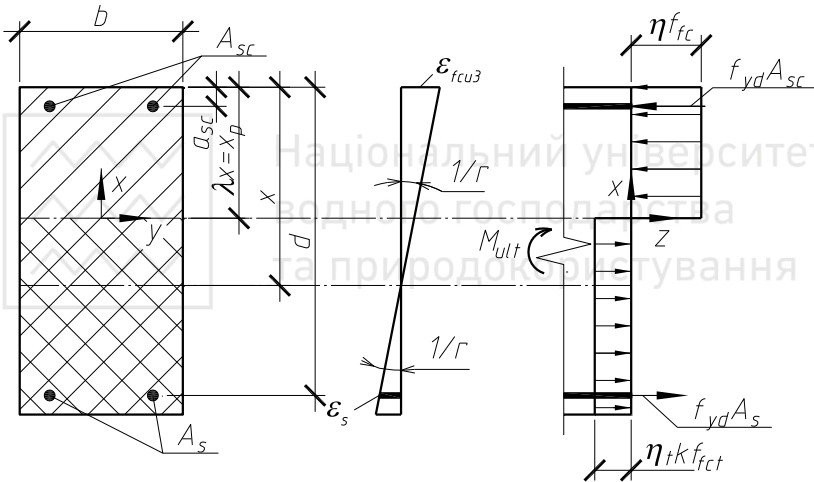


Рис. 1.10. Схема зусиль та епюри напружень у перерізі, нормальному до поздовжньої осі згинального фібробетонного елемента прямокутного перерізу з поздовжнім армуванням при розрахунку його за міцністю

Значення  $M_{ult}$  можна розрахувати за формулою:

$$M_{ult} = \eta f_{jc} b x_p (d - 0,5 \lambda x_p) + \eta_t k f_{jcc} b (h - x_p) \left( \frac{h - x}{2} - a \right) + f_{yd} A_{sc} (d - a_{sc}), \quad (1.71)$$

де  $a = h - d$ ,  $x_p$  – висота стиснутої зони за спрощеної прямокутної епюри напружень бетону фібробетонного елемента з поздовжнім армуванням визначається за формулою:





$$x_p = \frac{f_{yd}A_s - f_{yd}A_{sc} + \eta_t k f_{ct} b h}{(\eta_t k f_{ct} h + \eta f_{fc}) b}. \quad (1.72)$$

1.7.10. Граничне значення висоти стиснутої зони визначасмо за умови:

$$\xi_R = \frac{\omega \varepsilon_{fcu,3}}{\varepsilon_{fcu,3} + \varepsilon_{s0}}, \quad (1.73)$$

де  $\varepsilon_{s0} = \frac{f_{yd}}{E_s}$  – розрахункове значення граничних відносних

деформацій арматури;

$\varepsilon_{fcu,3}$  – граничні значення стиснутого фібробетону бетону при використанні спрощеної діаграми деформування;

$\omega$  – характеристика стиснутої зони фібробетону, яка приймається для фібробетону з важкого бетону класу до B60 включно рівною 0,8, а для фібробетону з важкого бетону класів B70 – B100 та з дрібнозернистого бетону – рівною 0,7.

1.7.11. Нелінійна деформаційна модель з використанням функції Єврокод-2 для стиснутої та розтягнутої зони бетону, а також діаграми Прандтля для арматури, реалізується з використанням ЕОМ.

## 1.8. Розрахунок кривизни елементів при руйнуванні

### А. Залізобетонні конструкції

1.8.1. Кривизну елемента перед руйнуванням можна визначити за деформаційною методикою, використовуючи залежність "напруження-деформації" в бетоні у вигляді, запропонованому у Єврокод-2. Приймаючи плече внутрішньої пари сил  $z=0,78d$ , формулу для визначення кривизни можна прийняти у вигляді:

$$\frac{1}{r_{ult}} = \frac{f_{yd}}{0,45 E_s d}. \quad (1.74)$$

1.8.2. Також для визначення кривизни можна використати інші наближені формули залежно від прийнятої форми епюри напружень в стиснутій зоні бетону:

- при трикутній формі епюри напружень



$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\alpha \rho_f d \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha \rho_f}} - 1 \right)}, \quad (1.75)$$

де  $\rho_f = A_s / (bd)$  – коефіцієнт армування;  $\alpha = E_s / E_{ck}$ .

- при рівномірному розподілі напружень у стиснутій зоні бетону

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\lambda x}, \quad (1.76)$$

де  $x$  – висота стиснутої зони залізобетонного елемента, яка визначається за формулами (1.61), (1.63).

*Б. Фібробетонні конструкції без поздовжнього армування*

1.8.3. Доцільно використати спрощений метод, допускаючи прямокутний характер розподілу напружень у стиснутій та розтягнутій зонах фібробетону. Для цього за виразом (1.69) встановлюється висота стиснутої зони в момент руйнування, яка повинна визначитися при значеннях розрахункових опорів бетону, які відповідають граничним станам другої групи. За цих умов граничне значення кривизни елемента можна визначити за виразом:

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{fcu,3}}{\lambda x_p}, \quad (1.77)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт, який визначає фактичну висоту стиснутої зони фібробетону (приймається для фібробетону з важкого бетону класу до С60 включно рівною 0,8, а для фібробетону з важкого бетону класів С70 – С100 та з дрібнозернистого бетону – рівною 0,7).

*В. Фібробетонні конструкції з армуванням поздовжньою арматурою*

1.8.4. Розрахунок граничного значення кривизни виконується за виразом (1.77), як для фібробетонних елементів без поздовжнього армування. У такому разі висоту стиснутої зони фібробетонних елементів за спрощеної прямокутної епюри напружень  $x_p$ , визначають за виразом (1.75), у якому також



приймають значення розрахункових опорів фібробетону, що відповідають граничним станам другої групи.

## 1.9. Розрахунок згинальних елементів за деформаційною методикою з використанням діаграми механічного стану бетону у вигляді поліному п'ятого ступеня

1.9.1. Основні положення проектування залізобетонних конструкцій ДБН В.2.6-98:2009 передбачають їх розрахунок за деформаційною методикою з використанням криволінійної діаграми механічного стану бетону. При використанні цієї методики слід приймати діаграму деформування бетону у вигляді поліному п'ятого ступеня:

$$\sigma_c = f_{(ck),(cd)} \sum_{k=1}^5 a_k \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^k =$$

$$= f_{(ck),(cd)} \left[ a_1 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} + a_2 \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^4 + a_5 \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^5 \right], \quad (1.78)$$

де  $f_{(ck),(cd)}$  – розрахунковий опір бетону осьовому стиску (приймається рівним  $f_{ck}$  в розрахунках за граничними станами другої групи та  $f_{cd}$  – в розрахунках за граничними станами першої групи);

$\varepsilon_{c1}$  – деформація при максимальних напруженнях (в розрахунках за граничними станами першою групою приймається  $\varepsilon_{c1,cd}$ , за граничними станами другої групи –  $\varepsilon_{c1,ck}$ );

$a_k$  – коефіцієнти полінома, які визначаються по таблицям ДБН В.2.6-98:2009.

1.9.2. Напружено-деформований стан нормального перерізу згинального залізобетонного елемента прямокутного перерізу наведений на рис. 1.11.

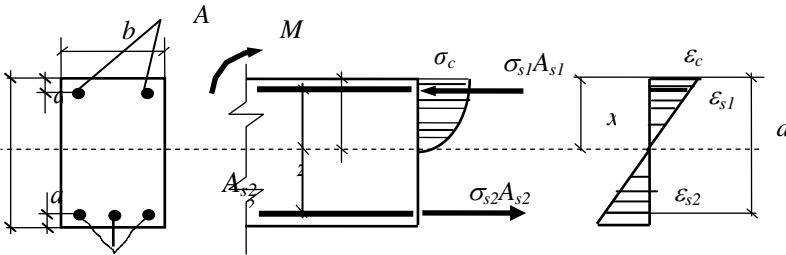


Рис. 1.11. Напружено-деформований стан нормального перерізу за умови криволінійної діаграми деформування бетону



1.9.3. Несучої здатності згинальних залізобетонних елементів прямокутного перерізу відповідно до ДСТУ Б В.2.6-156:2010 визначається шляхом спільного рішення наступних умов рівноваги:

$$\frac{bf_{cd}}{\bar{\chi}} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} + \sum_1^n \sigma_{si} A_{si} = 0, \quad (1.79)$$

$$\frac{bf_{cd}}{\chi^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2} + \sum_1^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) - M = 0, \quad (1.80)$$

де  $\chi = \frac{1}{r} = \frac{(\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c(2)})}{h}$  – кривизна вигнутої осі в перерізі;

$\varepsilon_{c(1)}$  – деформації бетону крайньої стиснутої фібри;

$\varepsilon_{c(2)}$  – осереднені деформації розтягнутої фібри бетону;

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c1}};$$

$x_1 = \varepsilon_{c(1)} / \chi$  – висота стиснутої зони;

$\bar{\chi} = \chi / \varepsilon_{c1}$  – відносна кривизна;

$z_{si}$  – відстань  $i$ -го стержня або прошарку арматури від найбільш стиснутої грані елементу;

$M$  – значення зовнішнього згинального моменту.

Спільне рішення рівнянь рівноваги (1.79) і (1.80) здійснюється методом послідовних наближень з використанням алгоритму, наведеному в ДСТУ Б В.2.6-156:2010.

1.9.4. Умови рівноваги (1.79) і (1.80) можна використати у такому математично удосконаленому вигляді:

$$\omega f_{cd} b x_{(1)} + \sum_1^n \sigma_{si} A_{si}, \quad (1.81)$$

$$\beta f_{cd} b x_{(1)}^2 + \sum_1^n \sigma_s A_s z_i - M = 0, \quad (1.82)$$

де  $\omega$  – коефіцієнт повноти епюри напружень в стиснутому бетоні, визначається за формулою

$$\omega = \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c1}} \right)^k, \quad (1.83)$$

$z_i$  – в цій формулі відстань  $i$ -го стержня або прошарку арматури до нейтральної лінії (рис. 1.11);

$\beta$  – коефіцієнт відносної несучої здатності нормального перерізу, який визначається за формулою:

$$\beta = \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c1}} \right)^k. \quad (1.84)$$



1.9.5. Коефіцієнти  $\omega$  і  $\beta$  залежать тільки від деформаційних характеристик бетону, а тому вони можуть прийматися по таблицям, які розраховані залежно від класу бетону та рівня деформацій в крайній стиснутій фібрі бетону (табл. А.9)

1.9.6. Деформації в арматурі залежно від заданої деформації в стиснутій фібрі бетону  $\varepsilon_{c(1)}$  визначаються співвідношеннями, які впливають з гіпотези плоских перерізів.

1.9.7. На основі рівнянь рівноваги (1.81) та (1.82), використовуючи коефіцієнти  $\omega$  і  $\beta$ , можна вирішувати завдання в постановках, передбачених ДСТУ Б В.2.6-156:2010, та знаходити необхідну площу робочої арматури при заданому зовнішньому згинальному моменті.

## 1.10. Спрощена методика розрахунку фортифікаційних споруд

1.10.1. Допускається виконувати розрахунки міцності захисного покриття за формулами:

$$h \geq h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c; \quad (1.85)$$

$$v_c \leq \frac{4M_{ult}}{l} \frac{\lambda k_{np}}{d^2}. \quad (1.86)$$

Формула (1.85) виражає умову міцності на пробивання, друга умова (1.86) дозволяє встановлювати максимально можливу швидкість боєприпасу, при якій ще буде забезпечена загальна міцність захисної плити. Друга умова отримана шляхом знехтування внутрішньої енергії, що припадає на прогин захисної стіни. Це дає можливість застосовувати запропоновані умови для розрахунку стін при різних граничних умовах.

1.10.2. Порядок розрахунку за спрощеною методикою наступний:

1. Встановлюється глибина проникнення боєприпасу у захисну стіну за виразом (1.85).
2. Перевіряється умова (1.85). За необхідності збільшується товщина захисної стіни.



3. Встановлюється динамічні характеристики бетону та арматури.
4. Визначається несуча здатність  $M_{ult}$  при отриманих динамічних характеристиках.
5. Перевіряється умова (1.86).

### **1.11. Автоматизація розрахунків залізобетонних конструкцій фортифікаційних споруд**

**1.11.1. Основні положення.** Розрахунок фортифікаційних споруд являє собою доволі складну багато параметричну задачу, яка потребує варіантних розв'язків. Автоматизація фортифікаційних розрахунків значно прискорює їх розрахунок та дозволяє вирішити поставлені задачі.

На основі методології розрахунку фортифікаційних споруд та проектування складів бетонів та фібробетонів представлених у п. 1 та п. 2 даних рекомендацій, було розроблено програмний комплекс. Він дозволяє проводити конструктивні розрахунки захисних фортифікаційних споруд, а також встановлювати необхідний склад бетонів та фібробетонів.

Програмний комплекс розроблено у єдиному інтегрованому середовищі Visual Studio 2010. Він складається із двох основних блоків. Перший блок дозволяє виконувати конструктивні розрахунки: а) встановлювати вид, клас бетону та необхідне армування; б) геометричні характеристики фортифікаційних споруд (проліт, товщину, ширину); в) параметри боєприпасів від яких необхідно створити захист. Другий блок дозволяє проектувати склад встановленого виду та класу бетону. Реалізовано можливість підбору складів для: важкого бетону, важкого дрібнозернистого бетону, важкого дрібнозернистого фібробетону. В результаті розрахунку користувач отримає відповідний звіт розрахунку із встановленими параметрами.

**1.11.2. Основи роботи з програмним комплексом.** Перед початком роботи програми необхідно виконати її інсталяцію. Для цього необхідно скористатися файлом *setup.exe*. Після встановлення програми вона з'явиться в меню *Пуск*.



Зразу після запуску програми буде запущено вікно нового розрахунку (див. рис. 1.12). При необхідності вікно нового розрахунку можна визвати із основної панелі, натиснувши *Розрахунок*.

Вікно розрахунку (рис. 1.12) складається із шести основних полів.

*Поле 1* призначено для введення фізико-механічних характеристик бетону, фібробетону та арматури фібробетону при статичному навантаженні, а також геометричних параметрів споруди. Дані характеристики можна вибрати автоматично скориставшись меню списком клас.

*Поле 2* – поле командних кнопок: *параметри зброї та додаткові дані*; *розрахунок*; *склад бетону*.

Кнопка "*Параметри зброї та додаткові дані*" відкриває відповідне діалогове вікно для введення необхідних даних (див. рис. 1.13). У даному вікні необхідно ввести параметри зброї або вибрати із відповідного випадаючого меню.

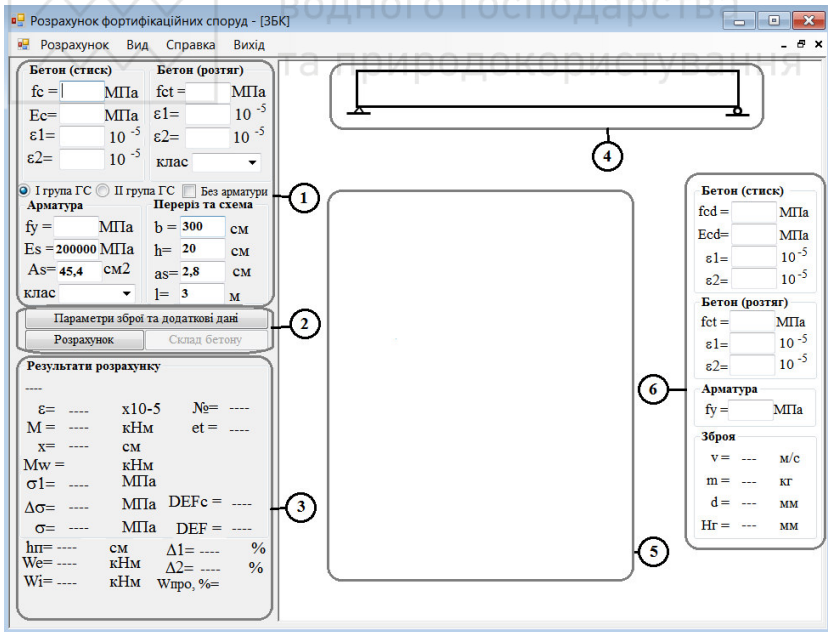


Рис. 1.12. Вікно нового розрахунку



Додатково необхідно задати дані по непрямому армуванню, вибрати тип бетону та задати його призмову міцність. Після вводу всіх необхідних даних будить встановлені динамічні характеристики бетону та арматури, які повинні відобразитися у текстових вікнах полів. За необхідністю користувач може внести в них певні корективи.

Поле 3 відображає результати розрахунку. У результаті розрахунку будуть показані всі розрахункові параметри, та висновок – забезпечена чи незабезпечена міцність.

Поле 4 показує розрахункову схему та епіюру згинаючих моментів, поле 5 – залежність кривизни від згинаючого моменту.

Параметри зброї та додаткові дані

**Параметри зброї**

Швидкість підходу боеприпасу до споруди,  $v = 960$  м/с

Маса боеприпасу,  $m = 0,390$  кг

Калібр снаряду,  $d = 30$  мм

Висота головної частини снаряду,  $H_g = 45,4$  мм

База даних зброї **Осколково-фугасно-запальний снаряд (ОФЗ)**

**Додаткові дані**

Вид бетону **дрібнозернистий фібробетон (від C15 до C80)**  $f_{ck,prism} = 22$  МПа

$f_{s,xy} = 435$  МПа

$n_x = 20$  ШТ

$A_{sx} = 2,27$  см<sup>2</sup>

$l_{sx} = 300$  см

$n_y = 20$  ШТ

$A_{sy} = 2,27$  см<sup>2</sup>

$l_{sy} = 300$  см

$s = 8$  см

OK Отмена

Рис. 1.13. Діалогове вікно "Параметри зброї та додаткові дані"





Поле 6 призначене для введення фізико-механічних характеристик бетону, арматури та фібробетону при динамічному навантаженні, воно також показує параметри зброї.

При незабезпеченні міцності необхідно змінити параметри (як правило товщину захисної стіни  $b$ ) і повторити його знову. Після проведення конструктивного розрахунку стане доступним командна кнопка "Склад бетону" поля 2, а також кнопка "Файл" основної форми (рис. 1.14). Командна кнопка "Склад бетону" поля 2 запускає діалогове вікно підбору складів відповідного типу та виду бетону. Скориставшись кнопкою "Файл" основної форми є можливість зберегти основні параметри розрахунку у текстовому файлі. Загальний вигляд текстового звіту приведено на рис. 1.15.

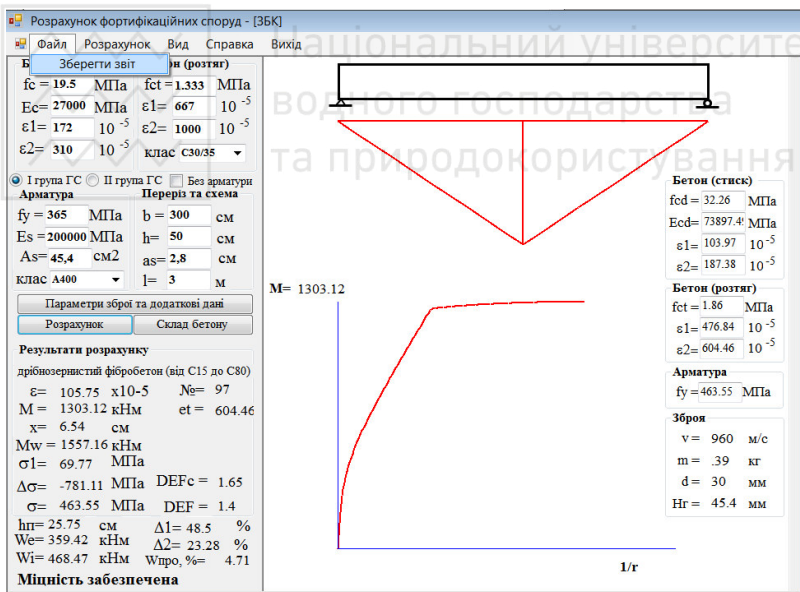


Рис. 1.14. Збереження результатів розрахунку



```
1 |РОЗРАХУНОК ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД-
2 |Дата - 12.10.2017
3 |1.ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНУ:
4 | -Вид бетону - дрібнозернистий фібробетон (від С15 до С80)
5 | -Міцність бетону на стиск  $f_c = 19.5$  МПа;
6 | -Міцність бетону на розтяг  $f_{ct} = 1.333$  МПа;
7 | -Модуль пружності  $E_c = 27000$  МПа;
8 |2.ХАРАКТЕРИСТИКИ АРМАТУРИ:
9 | -Межа текучості  $f_y = 365$  МПа;
10 | -Площа робочої арматури  $A_s = 45,4$  см2;
11 | -Захисний шар бетону (до центра арматури)  $a_s = 2,8$  см;
12 |3.ХАРАКТЕРИСТИКА ЗБРОЇ:
13 | -Швидкість боєприпасу  $v = 960$  м/с;
14 | -Маса боєприпасу  $m = .39$  кг;
15 | -Калібр боєприпасу  $d = 30$  мм;
16 | -Висота головної частини боєприпасу  $H_g = .39$  мм;
17 |4.ПАРАМЕТРИ ФОРТИФІКАЦІЙНОЇ СПОРУДИ:
18 | -Ширина захисної стіни  $b = 300$  см;
19 | -Розрахунковий проліт  $l = 3$  м;
20 | -Необхідна товщина захисної стіни  $h = 50$  см;
21 |5.РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ:
22 | -Глибина пробивання  $h_p = 25.75$  см;
23 | -Запас міцності на пробивання  $48.5$  %;
24 | -Запас загальної міцності  $23.28$  %.
```

Рис. 1.15. Звіт за результатами розрахунку

Основними результатами, які відображаються у *полі* 3 є граничні деформації бетону при максимальному значенні згинаючого моменту, згинаючого моменту та моменту утворення тріщин, якщо такі утворюються, висота стиснутої зони бетону, напруження в арматурі в момент руйнування, коефіцієнти динамічного зміцнення при стиску та розтязі, глибина проникнення боєприпасу у захисну споруду, запас міцності за відповідною перевіркою, а також процент впливу внутрішньої енергії прогину на загальну міцність.

Закриття програми відбувається натисканням кнопки "Вихід" основної форми або кнопкою управління форми "Закрити".



## 2. ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БЕТОНІВ З КОМПЛЕКСОМ НОРМОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ

### 2.1. Завдання на проектування складу бетону

Склад бетону характеризується витратами окремих компонентів із визначеними якісними показниками на  $1 \text{ м}^3$  бетонної суміші, які необхідні для забезпечення нормованих показників. Розрізняють номінальний (лабораторний) і виробничий (робочий) склади. *Номінальний склад* вказує витрати на  $1 \text{ м}^3$  суміші сухих компонентів, *виробничий* – з певною вологістю компонентів.

Проектування (підбір) складів бетонів може виконуватись експериментальними або розрахунково-експериментальними методами. Першим етапом проектування складів бетонів є вибір вихідних матеріалів і визначення їх технічних властивостей. При виборі вихідних матеріалів враховують як їх якісні параметри, так і техніко-економічні характеристики. Загальні правила проектування складів бетонів наведені в ДСТУ Б В. 2.7-215:2009.

Завдання на проектування складу бетону повинно бути підготовлено для конструкцій або виробів конкретної номенклатури, що виготовляють із бетону одного виду і якості по визначеній технології.

Воно повинно містити:

- нормовані показники якості бетону відповідно до вимог проектної документації на конструкції (вироби) конкретних видів, для яких призначений бетон;
- показники якості бетонної суміші, тривалість і режими тверднення бетону та інші вимоги виробництва відповідно до технологічної документації;
- показники однорідності міцності бетону, а також відповідний їм середній рівень міцності, який передбачається на певний період;
- обмеження за параметрами складу бетону і застосування матеріалів для його виготовлення, що встановлені нормативною і технологічною документацією.



## 2.2. Вибір вихідних матеріалів

Задача вибору вихідних матеріалів є техніко-економічною задачею, що значною мірою визначає ефективність складів бетону і досягнення ним необхідних властивостей.

2.2.1. Основними технічними показниками при *виборі виду цементу* є його хіміко-мінералогічний і речовинний склад; активність і марка або клас; міцність, яка досягається через визначений час тверднення в т.ч. при необхідності й в умовах тепловологісної обробки; нормальна густина, строки тужавлення і тонкість помелу; ряд інших показників, обумовлених проектними вимогами до бетону, умовами його роботи в конструкціях і спорудах.

Для бетонів, що тверднуть у природних умовах бажано застосовувати портландцементи I і II типів (ДСТУ БВ.2.7-46-2010, що виробляють на цементних заводах України (табл. Б.1 Додаток Б).

Для бетонів, що піддають тепловій обробці слід застосовувати цементи I і II групи ефективності при пропарюванні, які відносяться до низько- і середньоалюмінатних ( $C_3A = 3...8\%$ ), нормально- і високоалітових ( $C_3S = 50...60\%$ ). Не рекомендується в умовах теплової обробки бетонів застосовувати пуцоланові цементи (цементи IV типу).

При звичайній технології виробництва для бетонів класів C16/20...C25/30 необхідно застосовувати цемент марки не нижче M400, для бетонів класів C30/37 і вище – цемент марки не нижче M500. Для бетонів класів C12/15 і нижче можна застосовувати портландцемент марки M300.

2.2.2. Для важкого бетону в якості *дрібною заповнювача* застосовують пісок за ДСТУ Б В.2.7-32-95. Показником крупності піску є модуль крупності ( $M_k$ ). Дуже дрібні піски ( $M_k=1...1,5$ ) рекомендується застосовувати для бетонів класів C8/10 і нижче, дрібні піски ( $M_k= 1,5...2$ ) для бетонів класів C20/25 і нижче, середні піски ( $M_k=2...2,5$ ) можна застосовувати для бетонів любых класів за міцністю. Крупні піски ( $M_k=2,5...3$ ), а також піски підвищеної крупності ( $M_k= 3...3,5$ ) доцільно застосовувати для приготування бетонів класів C25/30 і вище.



При можливості для покращення зернового складу дрібних і дуже дрібних пісків бажано додавати укрупнюючі добавки (крупний пісок, відсів від подрібнення щебеню).

Якість піску залежить від вмісту пиловидних, глинистих, а також інших шкідливих домішок. До пиловидних відносять частинки крупністю понад 0,005 до 0,05 мм, до глинистих і мулистих – менше 0,005 мм. Вміст часток, що відмулюються у природному піску допускається до 3%, у збагаченому – 2%, у подрібненому до 5%. Вміст глини в грудках не повинен перевищувати 0,5%.

Рекомендований зерновий склад піску з умови досягнення максимальної щільності наведений на рис. Б.1.

При невідповідності зернового складу природного піску рекомендованим (рис. Б.1) вимогам застосовують коригувальні добавки, зокрема пісок з відсівів фракції 2,5...5 мм.

2.2.3. В якості крупного заповнювача застосовують щебінь із природного каменю, гравій і щебінь із гравію, які задовольняють ДСТУ Б В.2.7-75-98 та ДСТУ Б В.2.7-43-96.

У крупному заповнювачі вміст окремих фракцій повинен забезпечувати отримання щільної суміші (табл. Б.2, Б.3).

Щебінь або гравій характеризують зерновим або гранулометричним складом, який визначається шляхом просівання проби через стандартні сита. При цьому розміри отворів сит, на яких залишається чи проходить не менше 95% матеріалу, вважають відповідно найменшою чи найбільшою крупністю заповнювача.

При приготуванні бетонної суміші крупний заповнювач застосовують у виді окремих фракцій. Фракція 3...10 мм застосовується у випадку використання в якості дрібного заповнювача піску з модулем крупності не більше 2,5.

Вміст часток, що відмулюються у складі щебеню обмежується в межах 1...3%, у тому числі глини в грудках – не більше 0,25%.

Найбільший розмір крупного заповнювача не повинен перевищувати  $\frac{3}{4}$  відстані між арматурними стержнями і  $\frac{1}{3}$  товщини виробу чи конструкції.



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

Вміст зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми у крупному заповнювачі не повинен перевищувати 35%.

Міцність щебеню і гравію характеризується маркою за міцністю, яку визначають за його дробимістю при стискуванні (роздавлюванні) у циліндрі. Показник дробимості визначають за втратою маси після роздавлювання проби матеріалу і просіювання її на ситі з розміром отвору вчетверо меншим найменшого розміру зерен випробовуваної фракції згідно табл. Б.4.

Для бетону застосовують щебінь із природного каменю з маркою не нижче 600 для класів за міцності до C12/15 включно, не нижче 800 для класів від C15/20 до C25/30 та 1200 для класів вище C25/30. Показники дробимості повинні бути для гравію і щебеню із гравію не менше: 800 для бетонів класів C12/15 і нижче, 1000 для бетонів класів C15/20 та вище.

До числа шкідливих домішок у заповнювачах бетону, що викликають його корозію і погіршення якості поверхні, відносяться: аморфні різновиди діоксиду кремнію, розчинні в лугах (халседон, опал, кремій та ін.); сірка, сульфід, сульфати, магнетит, гідроксиди заліза. Міцність і довговічність бетону зменшують такі домішки в заповнювачах як вугілля, графіт, горючі сланці, апатит, нефелін, фосфорит. Домішки, які містять водорозчинні хлориди, сірку, сульфід та сульфати, можуть викликати корозію арматури у бетоні.

Допустимий вміст шкідливих домішок у заповнювачах бетонів наведений в табл. Б.5.



2.2.4. Поряд з основними компонентами при отриманні бетону вводять *добавки* для регулювання властивостей бетонної суміші та бетону, а також для економії цементу. Умовно сукупність можливих добавок можна розділити на дві групи:

1) добавки-модифікатори (хімічні добавки), які вводять, як правило, у невеликій кількості (від долі відсотка до декількох відсотків від маси цементу);

2) мінеральні добавки, що частково замінюють клінкерну складову портландцементу і виконують роль мікронаповнювачів.

2.2.5. Згідно до ДСТУ Б В.2.7-171:2008 добавки, які застосовують для модифікування властивостей бетонних і розчинових сумішей, поділяють на три види: що регулюють властивості готових до використання сумішей; що змінюють властивості бетонів регулюють кінетику їх тверднення, та такі, що надають бетонам спеціальних властивостей (табл. Б.6).

*Пластифікуючі* добавки призначені для покращення легкоукладальності бетонних сумішей або зниження їх водовмісту та економії витрати цементу. Їх поділяють на чотири категорії залежно від величини пластифікуючого ефекту (табл. Б.7). Найбільш ефективні пластифікуючі добавки – *суперпластифікатори* класифікують за механізмом дії (табл. Б.8).

Основне призначення *повітровтягувальних* добавок – підвищення морозостійкості бетону.

Як *добавки-прискорювачі твердіння* як правило застосовують електроліти – хлориди, сульфати і нітрати лужних металів і кальцію. Рекомендовані витрати прискорювачів: хлориду кальцію, сульфату натрію – 1...1,5%, нітрату кальцію, нітрату натрію, нітрит-нітрат-хлориду кальцію, тринатрійфосфату – 1,5...2,5%.

Порівняльна технологічна ефективність застосування добавок-прискорювачів наведена в табл. Б.9. Хлоридні добавки забороняється застосовувати для попередньо напружених конструкцій, а також конструкцій з робочою арматурою діаметром до 5 мм та тих, що працюють у агресивних середовищах



Для забезпечення твердіння бетону при знижених та від'ємних температурах застосовують протиморозні добавки (табл. Б.10). Концентрація протиморозних добавок залежить від розрахункової температури твердіння (табл. Б.11).

Комплексні добавки (поліфункціональні модифікатори (ПФМ)) можна розбити на чотири групи: I – суміші електролітів; II- суміші ПАР; III- суміші електролітів і ПАР; IV – суміші хімічних і мінеральних добавок.

2.2.6. *Мінеральні добавки* залежно від їх здатності хімічно взаємодіяти з гідроксидом кальцію, утвореним при гідратації цементу поділяють на активні та інертні.

Мінеральні добавки, вводять або із цементом, або безпосередньо в бетонні суміші для економії цементу і регулювання ряду властивостей бетону.

Найбільшого поширення набуло введення в бетонні суміші в якості активної мінеральної добавки *золи-виносу* теплових електростанцій.

Залежно від області застосування золу згідно ДСТУ Б В.2.7-205:2009 поділяють на види: I – для залізобетонних конструкцій і виробів; II – для бетонних конструкцій і виробів; III – для конструкцій гідротехнічних споруд, а також на класи – для важкого (А) і легкого (Б) бетону.

Питома поверхня золи класу А повинна бути не менше 800 см<sup>2</sup>/г, а золи класу Б – знаходиться в інтервалі 1500...4000 см<sup>2</sup>/г. Залишок на ситі №008 для золи класу А не повинен перевищувати 15% за масою. Хімічний склад і вологість золи повинні відповідати вимогам, зазначеним у табл. Б.12.

До високоактивних мінеральних добавок у бетон відносять *мікрокремнезем*. Мікрокремнезем представляє собою конденсований аерозоль, що вловлюється фільтрами систем газоочистки плавильних металургійних печей. В якості високоактивної мінеральної добавки може бути застосованим також метакаолін (продукт помірною випалу каолінів).

2.2.7. Для замішування бетонної суміші використовується вода що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011. У воді обмежується до 10 мг/л вміст органічних ПАР, цукру та фенолу,





не допускаються плівки нафтопродуктів, водневий показник не повинен бути меншим 4 і більше 12,5. У воді замішування обмежується вміст розчинних солей, іонів  $\text{SO}_4^{-2}$  та  $\text{Cl}^-$ , а також зважених частинок.

Допускається застосування технічної і природної води, забрудненої стоками, які містять домішки в кількості, що перевищує норми, зазначені в табл. Б.35, крім домішок  $\text{SO}_4^{-2}$  і  $\text{Cl}^-$ , за умови обов'язкової відповідності якості бетону показникам, установленим проектом.

2.2.8. Критерієм для прийняття рішення про використання вихідних матеріалів згідно прийнятих радіаційно-гігієнічних норм є питома ефективна активність природних радіонуклідів –  $A_{\text{еф}}$ . Заповнювачі застосовують без обмежень, якщо  $A_{\text{еф}}$  не перевищує 370 Бк/кг (І клас).

#### 2.2.9. Фібра.

*Сталева фібра.* Для фібрового армування сталеві фібробетонні і комбіновано армованих сталеві фібробетонні конструкції слід застосувати сталеву фібру. Характеристика найбільш розповсюджених на території України видів сталевих фібр наведена в табл. Б.37.

Мінімальний опір розтягу фібри  $f_{fk}$  для сталеві фібробетону повинен бути не менше 800 МПа.

Модуль пружності всіх видів фібри  $E_f$  приймається 190000 МПа.

Довжина фібри повинна перевищувати щонайменше в чотири рази найбільший розмір крупного заповнювача.

*Базальтова фібра.* Базальтову фібру виготовляють на основі базальтового грубого волокна діаметром 50...80 мкм, яке повинно відповідати вимогам ТУ 023.005-89 та ТУ У В.2.7-26.8-32673353-001.

Фізико-механічні показники базальтової фібри представлені в табл. Б.36.

За величину міцності грубого базальтового волокна на розтяг, МПа, приймають середнє арифметичне результатів випробувань не менше п'ятнадцяти зразків.



## 2.3. Схема розрахунку складів важкого бетону

### 2.3.1. Загальні положення

Для важкого бетону основними розрахунковими параметрами складу є цементно-водне відношення – Ц/В, водопотреба – В і вміст піску в суміші піску та щебеню (гравію) – г. Похідними від цих параметрів можна вважати витрату цементу – Ц, піску – П та щебеню – Щ.

Бетонна суміш у загальному випадку являє собою систему, для якої справедлива умова:

$$V_1 + V_2 + V_3 \dots V_n = I, \quad (2.1)$$

де  $V_i$  – абсолютний об'єм компонента бетонної суміші.

При використанні цієї умови задача розрахунку складу бетонної суміші зводиться до визначення витрат n-1 компонентів, наприклад для звичайного важкого бетону, витрат цементу, води, піску або щебеню (гравію).

Загальна схема розрахунку складів важкого бетону наведена на рис. 2.1. Дана схема може ускладнюватися при введенні додаткових нормованих властивостей, які пов'язані не лише з Ц/В, а із іншими параметрами складу (усадка, динамічна міцність, морозостійкість та ін.), збільшенні числа компонентів суміші, оптимізації складів.

### 2.4. Визначення цементно-водного відношення

2.4.1. Основним параметром, що визначає цементно-водне відношення є міцність бетону на стиск, яка встановлюється залежно від відповідного класу (табл. Б.13). При розрахунках Ц/В приймається середній рівень міцності бетону, який визначається за формулою:

$$f_c = k_t C_n, \quad (2.2)$$

де  $C_n$  – значення класу бетону за міцністю на стиск, осьовий розтяг або розтяг при згині, МПа, у проектному або проміжному віці, що зазначена у нормативній або проектній документації (*характеристична міцність бетону*);

$k_t$  – коефіцієнт необхідної міцності для усіх видів бетонів, що приймається залежно від середнього значення групового коефіцієнта варіації міцності бетону  $V_{cm}$  (табл. Б.14).

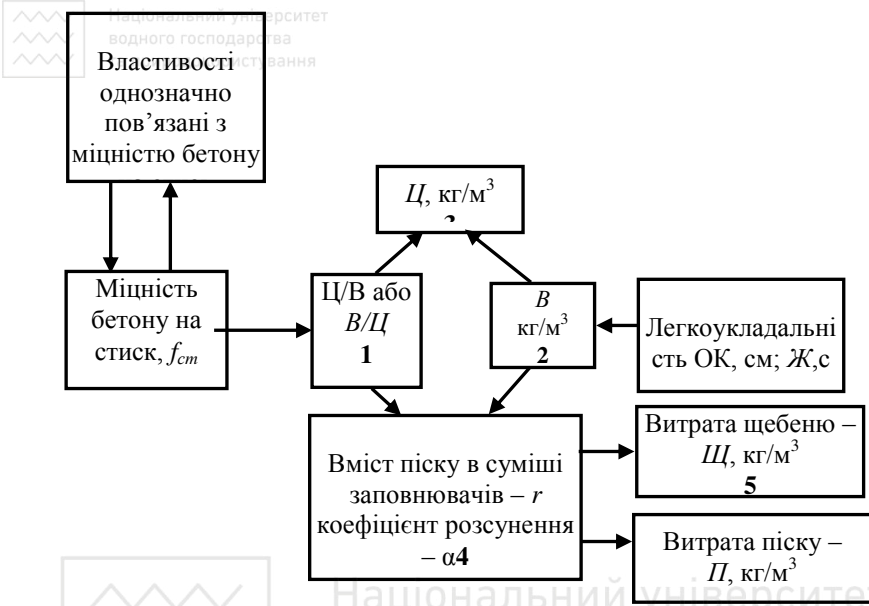


Рис. 2.1. Схема розрахунку номінальних складів важкого бетону

При відсутності даних статистичного контролю або до накопичення їх необхідної кількості необхідну міцність бетону розраховують за формулою:

$$f_c = 1,1 \frac{C_n}{0,78}. \quad (2.3)$$

Якщо визначальними для бетону є показники морозостійкості, водонепроникності та ін. середній рівень міцності повинен бути достатнім, щоб забезпечити дані показники.

Для розрахунків Ц/В найбільш широко застосовують формулу:

$$f_{cm} = AR_y (C/W - 0,5). \quad (2.4)$$

де  $f_{cm}$  – проектна середня міцність бетону на стиск, МПа;  $R_y$  – активність або марка цементу, МПа;  $A$  – коефіцієнт, що залежить від якості заповнювачів. (табл. Б.15).



При орієнтовних розрахунках і застосуванні заповнювачів високої якості  $A=0,65$ , середньої якості –  $A=0,6$ , низької –  $A=0,55$ .

Розрахункові формули Ц/В і В/Ц:

$$\frac{Ц}{В} = \frac{f_{cm} + 0,5AR_u}{AR_u}; \quad (2.5)$$

$$\frac{В}{Ц} = \frac{AR_u}{f_{cm} + 0,5AR_u}; \quad (2.6)$$

Якщо поставлено задачу запроєктувати склад бетону із заданою міцністю через 4 год., після пропарювання за нормалізованим режимом (2+3+6+2 год) із відомою активністю цементу після пропарювання ( $R_{u,пр.}$ ), може бути використана формула:

$$f_{cm} = (0,41R_{u,пр} + 9)Ц/В - 0,83(Ц/В)^2 - 0,35R_{u,пр} - 7. \quad (2.7)$$

2.4.2. Якщо подати параметр  $A$  у формулі (2.4) як інтегральний *мультиплікативний коефіцієнт*  $pA_i$ , можна значно збільшити її “дозволяючу здатність”, зробити її придатною для розрахунку Ц/В бетонів із різними умовами тверднення, у різному віці і т.д.

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

$$pA_i = AA_1A_2 \dots A_n, \quad (2.8)$$

де  $A_i$  – вихід міцності, зумовлений дією певних факторів, наприклад температури та тривалості твердіння ( $A_{\tau,t}$ ).

Значення  $A_{\tau,t}$  при  $t = 5 \dots 40^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 1 \dots 28$  діб можна знайти за табл. Б.16 або за формулою:

$$A_{\tau,t} = a \cdot \ln(n) + b \cdot t + c, \quad (2.9)$$

де  $n$  – кількість діб твердіння,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти (табл. Б.17).

Орієнтовний вихід міцності бетону при від’ємних температурах з урахуванням виду та концентрації протиморозних добавок (табл. Б.10, Б.11).

2.4.3. При необхідності визначення Ц/В для бетонів, з комплексом нормованих показників враховують їх зв’язки з міцністю бетону на стиск і встановлюють за відповідними



розрахунковими залежностями (табл. Б.18, Б.19) необхідне значення Ц/В, що задовольняє усім проектним вимогам.

Ц/В бетону із заданою морозостійкістю визначається поряд із міцністю об'ємом втягнутого повітря. Об'єм втягнутого повітря може бути призначений за нормативними рекомендаціями або орієнтовно розрахований за емпіричними залежностями.

Для бетонів з *нормованою морозостійкістю* F200 і вище, які експлуатуються в умовах насичення водою, об'єм втягнутого повітря в бетонній суміші згідно ДСТУ Б В.2.7.-43-96 повинен відповідати значенням зазначеним у табл. Б.20.

Орієнтовно об'єм необхідного втягнутого повітря може бути знайдений із наступної формули:

$$V_{n.в} = \frac{\ln\left(\frac{F}{A_1 f_{cm}^{A_2}}\right)}{0,35}, \quad (2,10)$$

де  $F$  – марка бетону за морозостійкістю;  $f_{cm}$  – міцність бетону на стиск, МПа;  $A_1$  і  $A_2$  – коефіцієнти.

Для рухомих бетонних сумішей з ОК=9...12 см  $A_1=0,34$ ;  $A_2=1,68$ , молорухомих (ОК=1...4 см)  $A_1=0,91$ ;  $A_2=1,47$ , жорстких –  $A_1=2,48$ ;  $A_2=1,28$ .

Необхідний об'єм втягнутого повітря забезпечується введенням повітрявтягувальних добавок, дозування яких визначається експериментально залежно від складу бетонних сумішей. На рис. Б.3 Додаток Б наведена експериментально отримана номограма для визначення вмісту повітрявтягувальної добавки типу СНП залежно від необхідного об'єму втягнутого повітря ( $V_{n.в}$ ), витрат води ( $B$ ) і цементу ( $C$ ), частки піску в суміші заповнювачів ( $r$ ) і вмісту в піску фракції менше 0,63 мм.

Для бетонів з нормованою водонепроникністю розраховують коефіцієнт фільтрації і марку бетону за водонепроникністю (табл. Б.19, (10)).

Перехід від розрахункового коефіцієнта фільтрації до марки бетону за водонепроникністю може бути виконаний за табл. Б.21.



Додаткові можливості для розширення діапазону розв'язуваних задач за допомогою формули (2.4) з'являються при використанні поняття “*приведеного Ц/В*”, тобто такого Ц/В, при якому міцність бетону з добавками ідентична міцності бетону без добавок. У цьому випадку формула (2.4) приймає вид:

$$f_{cm} = pAR_u \left( \frac{Ц + K_{ц.е.}Д}{B + V_n} - 0,5 \right), \quad (2.11)$$

де  $pA$  – мультиплікативний коефіцієнт – 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 Ц/В;  $Д$  – витрата мінеральної добавки, яка вводиться у бетонну суміш;  $K_{ц.е.}$  – коефіцієнт “цементуючої ефективності” або “цементний еквівалент” 1 кг добавки;  $V_n$  – об'єм втягнутого повітря.

Перехід від “приведеного Ц/В” до фактичного Ц/В можна здійснити за формулою:

$$Ц/B = \frac{(Ц + K_{ц.е.}Д) - K_{ц.е.}Д}{(B + V_n) - V_n}. \quad (2.12)$$

Коефіцієнт “цементуючої ефективності” легко визначити за експериментальними даними для рівномісних бетонів за формулою:

$$K_{ц.е.} = \frac{Ц_1 - Ц_2}{Д}, \quad (2.13)$$

де  $Ц_1$  – витрата цементу в бетоні без мінеральних добавок;  $Ц_2$  – витрата цементу в бетоні з мінеральними добавками;  $Д$  – витрата добавки.

Для прикладу значення рекомендованої витрати і коефіцієнта “цементуючої ефективності” для золи-виносу Бурштинської ТЕС наведені в табл. Б.22, Б.23.

Для бетону з однаковою міцністю і легкоукладальністю економія цементу  $\Delta Ц$  за рахунок введення активної мінеральної добавки (активного наповнювача) може бути знайдена з рівняння:



$$\Delta C = K_{ц.с.} D - \left( \frac{C}{B} \right)_{пр} \cdot \Delta B, \quad (2.14)$$

де  $\Delta B$  – зміна водопотреби бетонних сумішей при додаванні мінеральної добавки.

**Приклад 2.1.** Необхідно розрахувати  $C/B$  для важкого бетону класу  $C16/20$ . Бетон виготовляють із застосуванням портландцементу марки  $M500$  на гранітному щебені з вмістом відмулюваних часток (глини, пилу і мулу)  $1\%$  і кварцовому піску –  $3\%$ . За даними виробничого контролю середнє значення коефіцієнта варіації бетону  $V_c = 8\%$ .

1. Розраховуємо середній рівень міцності бетону. При  $V_c = 8\%$  коефіцієнт  $k_t = 1,09$  (табл. Б.14):

$$f_{cm} = k_t C = 1,09 \cdot 20 = 21,8 \text{ МПа};$$

2. Для розрахунку  $C/B$  приймаємо формулу (2.4);

3. Значення коефіцієнта  $A$  приймемо за табл. Б.15,  $A = 0,58$ ;

4. За формулою розраховуємо значення  $C/B$ :

$$\frac{C}{B} = \frac{21,8 + 0,5 \cdot 0,58 \cdot 50}{0,58 \cdot 50} = 1,25.$$

**Приклад 2.2.** Необхідно розрахувати  $B/C$  для отримання бетону міцністю  $20$  МПа у віці ( $\tau$ )  $7$  діб при температурах тверднення ( $t$ )  $10$  і  $30^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт  $A$  в формулі (2.8) з урахуванням якості заповнювачів прийняти  $0,52$  (табл. Б.15). Активність використаного портландцементу  $R_{ц} = 40$  МПа.

1. Знаходимо за табл. Б.16 коефіцієнт  $A_{т\tau}$ :

при  $t = 10^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 7$  діб  $A_{т\tau} = 0,58$ ;

$t = 30^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 7$  діб  $A_{т\tau} = 0,90$ ;

2. Знаходимо  $B/C$  за формулою (2.6), врахувавши додатково коефіцієнт  $A_{т\tau}$ :

$$\text{при } 10^\circ\text{C} \quad B/C = \frac{0,58 \cdot 0,52 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 0,58 \cdot 40} = \frac{12,064}{26,03} = 0,46;$$

$$30^\circ\text{C} \quad B/C = \frac{0,90 \cdot 0,52 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 0,90 \cdot 40} = \frac{18,72}{29,36} = 0,64.$$



Використання коефіцієнта  $A_{tr}$  дає можливість розглянути приклад і при іншій постановці задачі, визначивши очікувану міцність бетону у віці 7 діб ( $f_{cm7}$ ) при температурах тверднення 10 і 30° С, якщо він розрахований на міцність у 28 діб. Наприклад за нормальних умов тверднення  $f_{cm} = 30$  МПа. Тоді при  $t=10^\circ\text{C}$   $f_{c7} = 0,58 \cdot 30 = 17,4$  МПа;  $t=30^\circ\text{C}$   $f_{c7} = 0,9 \cdot 30 = 27$  МПа.

**Приклад 2.3.** Бетон на портландцементі марки М500 і заповнювачах середньої якості з добавкою нітриту натрію (НН) твердне при температурі -5° С. Визначити Ц/В при якому бетон у віці 28 діб буде відповідати за міцністю на стиск класу С16/20.

1. Середній рівень міцності бетону класу С16/20 (формула 2.3):

$$f_{cm} = \frac{20}{0,778} = 25 \text{ МПа};$$

2. Приймаємо коефіцієнт  $A$  у формулі (2.8), що враховує якість заповнювачів рівним 0,6, а коефіцієнт  $A_{tr}$ , що враховує вихід міцності бетону з протиморозною добавкою у віці 28 діб 0,7 (табл. Б.33). Тоді значення Ц/В, яке при заданих умовах забезпечує отримання бетону класу С16/20 за формулою (2.4) дорівнює:

$$\frac{Ц}{В} = \frac{25 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 0,7 \cdot 50}{0,6 \cdot 0,7 \cdot 50} = \frac{35,5}{21} = 1,69.$$

**Приклад 2.4.** Для отримання бетону класу С20/25 на портландцементі марки М500 і заповнювачах низької якості, що має тверднути за нормальних умов введено 150 кг/м<sup>3</sup> золи-виносу. Визначити необхідне значення приведенного Ц/В – (Ц/В)<sub>пр</sub> і розрахувати можливе зменшення Ц/В внаслідок введення золи-виносу. Витрата води 180 л/м<sup>3</sup>.

1. Необхідний середній рівень міцності бетону:

$$f_{cm} = \frac{25}{0,778} = 32 \text{ МПа};$$





2. Приймаємо за табл. Б.15  $A = 0,55$ . Знайдемо значення  $(C/B)_{np}$  за формулою:

$$\left(\frac{C}{B}\right)_{np} = \frac{C + K_{u,c}D}{B} = \frac{32 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 50}{0,55 \cdot 50} = \frac{45,75}{27,5} = 1,66;$$

3. Величина фактичного  $C/B$  при введенні добавки золи-виносу за формулою (2.12) ( $D=150 \text{ кг/м}^3$ ,  $K_{u,c}=0,16$  (табл. Б.23):

$$\frac{C}{B} = 1,66 - \frac{0,16 \cdot 150}{180} = 1,53;$$

4. Розрахункове зменшення  $C/B$  при введенні золи-виносу:

$$\Delta C/B = 1,66 - 1,53 = 0,13.$$

**Приклад 2.5.** Визначити необхідне  $C/B$ , яке забезпечує у віці 28 діб міцність бетону на стиск  $f_{cm} \geq 20 \text{ МПа}$ , міцність бетону на розтяг при згині  $f_{c,t} \geq 8,3 \text{ МПа}$ , міцність бетону на розтяг при розколюванні  $f_{c,m} \geq 7,9 \text{ МПа}$ .

Розрахуємо за формулами табл. Б.18 значення  $C/B$  залежно від показників міцності на стиск, розтяг при згині і розтяг при розколюванні.

Для даного прикладу визначальним параметром є міцність на розтяг при розколюванні. Значення  $C/B$ , яке забезпечує  $f_{c,m} = 7,9 \text{ МПа}$  ( $C/B = 2,1$ ) дозволяє також отримання і значення міцності на стиск і на розтяг при згині не менше заданих.

## 2.5. Визначення водопотреби бетонної суміші

2.5.1. На водопотребу бетонної суміші вирішальне значення має показник легкоукладальності, який призначається залежно від особливостей конструкцій і способу укладки (табл. Б.24).

В практиці проектування складів бетону водопотребу бетонних сумішей визначають по усередненим емпіричним даним (табл. Б.25) можна також використовувати узагальнені розрахункові залежності:

$$V_0 = 176 - 0,8D_{щ} + 6,1OK + 0,0029D_{щ}^2 - 0,14OK^2; \quad (2.15)$$



$$V_0 = 197 - 0,91D_{\text{щ}} - 1,12Ж + 0,0026 D_{\text{щ}}^2 - 0,0047Ж^2, \quad (2.16)$$

де  $D_{\text{щ}}$  – найбільша крупність щебеню, мм, ОК – осадка конуса, см, Ж – жорсткість бетонної суміші, с.

Для врахування особливостей вихідних матеріалів, витрати цементу і температури бетонної суміші розрахункові значення  $V_0$  можна коригувати за (табл. Б.26).

2.5.2. При розрахунках водопотреби бетонних сумішей із пластифікуючими добавками враховується їх *водоредукуючий ефект* (табл. Б.27).

Ефект зниження водопотреби для добавок всіх груп не повинен супроводжуватись зниженням міцності бетону у всі строки випробувань. Залежно від водоредукуючого ефекту добавки поділяють на чотири групи: I – зниження витрати води на 20% і більше, II – на 12...19%, III – на 6...11%, IV – 5% і менше.

**Приклад 2.6.** *Визначити орієнтовну витрату води для виготовлення бетонної суміші марки P2 (ОК= 5...7 см). Вихідні матеріали: портландцемент з НГ=24%, крупний заповнювач – річковий гравій крупністю до 40 мм, дрібний заповнювач – пісок із  $M_p = 1,5$  і вмістом мулу та пилу – 4%.*

Орієнтовну витрату води визначаємо за даними табл. Б.25.

Розрахунок витрати води, л/м<sup>3</sup>

Водопотреба за табл. Б.25, л/м <sup>3</sup>	Поправки л/м <sup>3</sup> на застосування				Орієнтовна витрата води, л/м <sup>3</sup>
	гравію	портланд-цементу з НГ=24%	піску із $M_k=1,5$	вміст пилу та мулу в піску	
185	-10	-8	+5	+2	174



**Приклад 2.7.** *Визначити орієнтовну витрату води для отримання бетонної суміші з ОК=9...10 см. Вихідні матеріали: пуццолановий портландцемент (портландцемент IV типу), щебінь крупністю до 40 мм, пісок з  $M_{кр} = 1,5$ . Добавка – суперпластифікатор із водоредукуючим ефектом 20...25%.*

1. За даними табл. Б.25 знаходимо, що орієнтовна витрата води в бетонній суміші без пластифікуючої добавки з урахуванням поправок на водопотребу піску і застосування пуццоланового цементу повинна складати:

$$200 + 5 + 15 = 220 \text{ л};$$

2. Введення добавки суперпластифікатора знижує витрату води на 20...25%:  $220 \text{ л} - (44 \dots 55) \text{ л} = 176 \dots 165 \text{ л}$ .

## 2.6. Визначення витрати компонентів бетонної суміші

2.6.1. Витрату цементу ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) розраховують за формулою:

$$Ц = B \cdot \frac{Ц}{B} \text{ або } Ц = \frac{B}{B/Ц}. \quad (2.17)$$

Мінімальна витрата цементу приймається за ДСТУ Б В.2.7.-43-96 відповідно до табл. Б.28.

2.6.2. Витрату заповнювачів розраховують, знаючи об'єм цементного тіста ( $V_{ц.т}$ ) в бетонній суміші і рекомендовану частку піску ( $r$ ) в сумарному об'ємі піску та щебеню (гравію).

Об'єм цементного тіста,  $\text{л}/\text{м}^3$ :

$$V_{ц.т} = \frac{Ц}{\rho_ц} + B. \quad (2.18)$$

Об'єм заповнювачів бетону,  $\text{л}/\text{м}^3$ :

$$V_з = 1000 - V_{ц.т}. \quad (2.19)$$

Об'єм  $V_n$ ,  $\text{л}/\text{м}^3$  і маса  $\Pi$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$  піску:

$$V_n = rV_з, \quad \Pi = \rho_n V_n. \quad (2.20)$$

Об'єм  $V_{цц}$ ,  $\text{л}/\text{м}^3$  і маса  $\mathcal{I}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , крупного заповнювача:

$$V_{цц} = V_з - V_n, \quad (2.21)$$

$$\mathcal{I} = \rho_{цц} V_{цц}, \quad (2.22)$$



У наведених вище формулах  $\rho_{ц}$ ,  $\rho_n$ ,  $\rho_{щ}$  – густина відповідно цементу ( $\rho_{ц} \approx 3,1$  кг/л), піску, щебеню чи гравію.

Рекомендовані орієнтовні значення частки піску ( $r$ ) у суміші заповнювачів наведені в табл. Б.29.

2.6.3. Для визначення витрат піску і щебеню (гравію) при відомих значеннях В/Ц і Ц можна застосовувати коефіцієнт заповнення порожнин і розсунення зерен щебеню (гравію) цементно-піщаним розчином –  $\alpha$  (табл. Б.30).

З умови матеріального балансу: витрати крупного заповнювача (Щ) і піску (П) можна знайти за формулами:

$$\text{Щ} = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{щ}} + \frac{\alpha P_{щ}}{\rho_{н.щ}}}; \quad (2.23)$$

$$\text{П} = (1000 - \text{Щ} / \rho_{щ} - \text{В} / \rho_{с} - \text{Щ} / \rho_{щ}) \rho_n. \quad (2.24)$$

У формулах 2.23 і 2.24:  $P_{щ}$  – пустотність щебеню (гравію),  $\rho_{щ}$  і  $\rho_{н.щ}$  – істинна та насипна густина крупного заповнювача;  $\rho_n$  – густина піску.

**Приклад. 2.8.** Розрахувати номінальний склад бетону класу С12/15 у віці 28 діб, що вкладається бетононасосом у неармовану конструкцію завтовшки 700 мм при відсутності арматури. Активність портландцементу 40 МПа, його густина  $\rho = 3,1$  кг/л, нормальна густина цементного тіста 26%. Густина кварцового піску  $\rho_n = 2,62$  кг/л, модуль крупності дорівнює  $M_K = 2$ , густина гранітного щебеню  $\rho_{щ} = 2,68$  кг/л. Рухомість бетонної суміші за умовами укладки бетононасосом приймається рівною  $OK = 6$  см (марка за легкоукладальністю Р2). Найбільша крупність заповнювача для бетононасосу 40 мм, насипна густина  $\rho_{н.щ} = 1,48$  кг/л.

1. Встановлюємо необхідну середню міцність бетону за формулою (2.3):

$$f_{cm} = \frac{15}{0,788} = 19,2 \text{ МПа}. \text{ Приймаємо } f_{cm} = 20 \text{ МПа};$$

2. Водоцементне відношення визначаємо за формулою (2.4) для рядових заповнювачів ( $A = 0,6$ ).



$$\frac{B}{Ц} = \frac{0,6 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 40} = 0,75;$$

3. Витрата води –  $B = 185 \text{ л/м}^3$  (за табл. Б.25).

4. Визначаємо витрату цементу,  $\text{кг/м}^3$ :

$$Ц = \frac{185}{0,75} = 247.$$

5. Вираховуємо пустотність крупного заповнювача:

$$P_{ц} = 1 - \frac{1,48}{2,65} = 0,44.$$

6. Коефіцієнт розсунення зерен  $\alpha = 1,35$  (за табл. Б.30).

Оскільки пісок має водопотребу 8%, зменшуємо коефіцієнт розсунення на 0,03, остаточно приймаємо  $\alpha = 1,32$ . Визначаємо витрату щебеню за формулою (2.23),  $\text{кг/м}^3$ :

$$Щ = \frac{1000}{\frac{0,44 \cdot 1,32}{1,48} + \frac{1}{2,68}} = 1310.$$

7. Визначаємо за формулою 2.24 витрату піску,  $\text{кг/м}^3$ :

$$П = \left[ 1000 - \left( \frac{247}{3,1} + \frac{1310}{2,68} + 185 \right) \right] \cdot 2,62 = 645.$$

Розрахунковий номінальний склад бетону,  $\text{кг/м}^3$ :  $Ц = 247$ ;  
 $П = 645$ ;  $Щ = 1310$ ;  $B = 185$  або 1:2,61:5,3 при  $B/Ц = 0,75$ .

**Приклад 2.9.** Визначити склад важкого бетону з середнім рівнем міцності в 28 діб  $f_{cm} = 60 \text{ МПа}$ , що твердне в умовах, які наближаються до нормальних. Рухомість бетонної суміші відповідає  $OK = 2 \dots 4 \text{ см}$ , у суміш вводиться добавка-суперпластифікатор С-3 в оптимальній кількості 0,8% від маси цементу.

Вихідні матеріали: портландцемент із активністю  $R_{ц} = 45 \text{ МПа}$ . Щебень гранітний з максимальною крупністю зерен 40 мм, істинною густиною  $\rho_{ц} = 2,7 \text{ г/см}^3$ , насипною густиною  $\rho_{н.ц} = 1630 \text{ кг/м}^3$ , пісок середньозернистий із модулем крупності  $M_k = 2,2$  і густиною  $\rho_n = 2,6 \text{ г/см}^3$ .



1. Знайдемо значення водоцементного відношення за формулою (2.4). Коефіцієнт  $A=0,65$ :

$$\frac{B}{Ц} = \frac{0,65 \cdot 45}{60 + 0,5 \cdot 0,65 \cdot 45} = 0,39;$$

2. Витрата води за табл. Б.25  $B_0=175 \text{ л/м}^3$

Приймаємо, що водоредукуючий ефект при введенні добавки С-3 складає 20%, тоді витрата води в бетонній суміші з добавкою:

$$B = 0,8 \cdot 175 = 140 \text{ л/м}^3$$

3. Розрахуємо витрати окремих компонентів за формулами (2.17, 2.23, 2.24). Пустотність щебеня:  $1 - 1,63/2,7 = 0,4$ . Коефіцієнт  $\alpha = 1,38$  (табл. Б.30):

$$Ц = 140 : 0,39 = 359 \text{ кг/м}^3;$$

$$С-3 = \frac{0,8 \cdot 359}{100} = 2,87 \text{ кг/м}^3;$$

$$Щ = \frac{1000}{0,4 \cdot \frac{1,38}{1,63} + \frac{1}{2,7}} = 1408 \text{ кг/м}^3;$$

$$П = \left[ 1 - \left( \frac{359}{3100} + \frac{140}{1000} + \frac{1408}{2700} \right) \right] \cdot 2600 = 572 \text{ кг/м}^3.$$

**Приклад 2.10.** При умовах зазначених в прикладі 2.9, знайти витрати щебеню і піску, використавши рекомендовані в табл. Б.29 значення  $g$ .

1. Об'єм цементного тіста:

$$V_{ц.т} = \frac{378}{3,1} + 140 = 262 \text{ л/м}^3.$$

Об'єм заповнювачів:

$$V_s = 1000 - 262 = 738 \text{ л/м}^3;$$

2. При  $g=0,33$  (табл. Б.29) витрата піску:

$$П = 738 \cdot 0,30 \cdot 2,6 = 575 \text{ кг/м}^3;$$

3. Витрата щебеню:

$$Щ = [738 - (738 \cdot 0,30)] \cdot 2,7 = 1395 \text{ кг/м}^3.$$



**Приклад 2.11.** Розрахувати склад бетону з заданими показниками міцності на стиск  $f_{cm}=30$  МПа і згин  $f_{c,tf}=4,4$  МПа. Марка бетону за морозостійкістю F300. Бетонна суміш укладається бетоноукладальною машиною (OK=2 см).

Вихідні матеріали: портландцемент М500, НГ=25,5%; кварцовий пісок із модулем крупності  $M_k=2,2$ , вмістом відмулюваних домішок 2,5%, густиною  $\rho_n=2,67$  кг/л,  $\rho_{n,n}=1,55$  кг/л; гранітний щебінь фракції 5...40 мм,  $\rho_{ш}=2,7$  кг/л,  $\rho_{ш,ш}=1,4$  кг/л; вміст відмулюваних частинок 0,8%. Вводиться повітрявтягувальна добавка.

1. Визначаємо за формулою (1) (табл. Б.18) необхідну міцність при стиску ( $f_{cm_1}$ ), що забезпечує нормовану міцність при згині:

$$f_{cm_1} = \left( \frac{4,4}{0,08} \right)^{1,5} / 10 = 40,8 \text{ МПа.}$$

2. Оскільки  $f_{cm_1} > f_{cm}$  приймаємо її для подальших розрахунків ( $f_{cm} = 40,8$  МПа).

3. За формулою (2.10) визначаємо необхідний об'єм втягнутого повітря,  $V_{n_1}$ , що забезпечує при заданій міцності задану марку за морозостійкістю. Коефіцієнти  $A_1, A_2$  вибираємо з врахуванням рухомості бетонної суміші (OK=2 см):

$$V_{n_1} = \frac{\ln\left(\frac{F}{0,91 \cdot R_{cm'}^{1,47}}\right)}{0,35} = \frac{\ln\left(\frac{300}{0,91 \cdot 40,8^{1,47}}\right)}{0,35} \approx 1\%.$$

4. Уточнюємо значення міцності бетону з урахуванням впливу втягнутого повітря:

$$f'_{cm} = 40,8 - 0,05 \cdot 1 \cdot 40,8 = 38,8 \text{ МПа.}$$

5. Необхідна міцність бетону на стиск, що забезпечує задані міцність при згині і морозостійкість із врахуванням втягнутого повітря:

$$f''_{cm} = 40,8 \frac{40,8}{38,8} \approx 43 \text{ МПа.}$$



6. Розраховуємо  $B/C$  бетонної суміші, що забезпечує розрахункову міцність бетону на стиск. Приймаємо коефіцієнт  $A=0,55$ :

$$B/C = \frac{AR_u}{R_{сж} + 0,5AR_u} = \frac{0,55 \cdot 50}{43 + 0,5 \cdot 0,55 \cdot 50} = 0,49.$$

7. Витрата води для заданої рухомості бетонної суміші з урахуванням особливостей заповнювачів складе  $180 \text{ л/м}^3$  (табл. Б.25).

8. Витрата цементу:

$$C = \frac{B}{B/C} = \frac{180}{0,49} = 368 \text{ кг/м}^3.$$

9. Витрата щебеню (коефіцієнт розсунення  $\alpha_p=1,39$ ; пористість щебеню  $P_{щ}=0,48$ ):

$$\Pi = \frac{1000}{\frac{1}{2,7} + 1,39 \cdot 0,48 \cdot \frac{1}{1,4}} = 1181 \text{ кг/м}^3.$$

10. Витрату піску знайдемо з урахуванням втягнутого повітря:

$$\Pi = \left( 1000 - \frac{368}{3,1} - \frac{1181}{2,7} - 180 - 10 \right) \rho_n = 680 \text{ кг/м}^3.$$

Розрахунковий склад бетону:  $C=368 \text{ кг/м}^3$ ;  $B=180 \text{ кг/м}^3$ ;  $\Pi=1181 \text{ кг/м}^3$ ;  $P=680 \text{ кг/м}^3$ ;  $V_n=10 \text{ л/м}^3$ .

## 2.7. Проектування складів високоміцних бетонів

Високоміцні бетони класів С55/67...С100/115 слід виготовляти із застосуванням цементу марки не нижче 500 (ДСТУ Б В.2.7-46-2010), крупних заповнювачів зі щільних вивержених порід з маркою за дробимістю не нижче 1200 (ДСТУ Б В.2.7-43-96), дрібного заповнювача з кварцового піску з модулем крупності не менше 2,0.

Для забезпечення необхідного водоцементного відношення в бетонну суміш слід вводити добавки суперпластифікаторів. Вибір виду суперпластифікатору виконується з урахуванням необхідного водоредукуючого ефекту (табл. Б.27).





Для розрахунків Ц/В високоміцних бетонів доцільно застосовувати формулу:

$$f_{cm} = k A R_c (Ц/В - b), \quad (2.25)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що залежить від виду добавки і її вмісту, при відсутності добавки  $k=1$ .

Величини  $k$  і  $b$  встановлюється експериментально, залежно від виду добавок. Значення коефіцієнта  $A$  приймається відповідно до п. 2.4.1.

Наприклад при застосуванні полікарбоксилатного суперпластифікатора Melflux 2651 F розрахункові формули для визначення Ц/В набувають виду:

$$f_{cm}^{12 год} = 0,98 A R_c (Ц/В - 1,92); \quad (2.26)$$

$$f_{cm}^{1 доба} = A R_c (Ц/В - 1,6); \quad (2.27)$$

$$f_{cm}^{2 доби} = 1,03 A R_c (Ц/В - 1,35); \quad (2.28)$$

$$f_{cm}^{28 днів} = 0,8 A R_c (Ц/В + 0,22). \quad (2.29)$$

Розрахунок витрат компонентів бетонної суміші здійснюється згідно п. 2.5, 2.6.

**Приклад 2.12.** Розрахувати склад високоміцного швидкотверднучого бетону з міцністю при стиску у віці 28 днів  $f_b^{28 днів} \geq 100$  МПа з досягненням через 12 год міцності  $f_b^{12 год} = 50$  МПа, 2 доби -  $f_b^{2 доби} \geq 80$  МПа. Активність цементу прийняти  $R_c^{28 днів} = 60$  МПа, його густина  $\rho_c = 3,1$  кг/л. Густина кварцового піску  $\rho_n = 2,65$  кг/л, модуль крупності дорівнює  $M_k = 2$ , густина гранітного щебеню  $\rho_{щ} = 2,68$  кг/л. Рухомість бетонної суміші ОК=10...15 см (марка за легкоукладальністю РЗ). Найбільша крупність заповнювача становить 20 мм, насипна густина  $\rho_{нщ} = 1,48$  кг/л. Застосовується добавка суперпластифікатора Melflux 2651 F (0.5% маси цементу).

Попередньо орієнтовно за допомогою формул (2.26...2.29) при  $A=0,6$  знаходимо послідовно значення Ц/В і встановлюємо весь набір необхідних властивостей при  $R_c = 60$  МПа.

Для забезпечення необхідної міцності бетону через 12 годин:

$$Ц/В_1 = \frac{50}{0,98 \cdot 0,6 \cdot 60} + 1,92 = 3,34;$$



-через 2 доби:

$$Ц/В_2 = \frac{80}{1,03 \cdot 0,6 \cdot 60} + 1,35 = 3,51;$$

-через 28 діб:

$$Ц/В_3 = \frac{100}{0,8 \cdot 0,6 \cdot 60} - 0,22 = 3,25.$$

Значення Ц/В, необхідних для забезпечення заданих міцнісних показників високоміцного бетону у різному віці, що знайдені при використанні запропонованих формул (2.26...2.29), достатньо близькі. Для подальших розрахунків обираємо максимальне Ц/В=3,51, яке буде забезпечувати весь набір заданих міцних показників бетону.

Розрахункова витрата води для забезпечення заданої рухомості 10...15 см при максимальній крупності заповнювача 20 мм (у відповідності з табл. Б.25) складатиме:

$$V_0 = 220 \text{ л/м}^3$$

З врахуванням поправочних коефіцієнтів на водоредукуючий ефект при використанні пластифікуючої добавки на полікарбоксилатній основі Melflux 2651F K=0,65 (табл. Б.27), яка вводиться в кількості 0,5% від маси цементу, загальні витрати води складають:

$$V_{\text{зар}} = V_0 \times K = 220 \times 0,6 = 143 \text{ л/м}^3$$

Тоді витрати цементу знаходимо за формулою:

$$Ц = Ц/В \times V_{\text{зар}} = 3,51 \times 143 = 501 \text{ кг/м}^3$$

Витрати заповнювачів знаходимо за рівняннями 2.23 і 2.24 при коефіцієнті розсуву зерен  $\alpha = 1,375$  (табл. Б.30) та міжзерновій пустотності  $\rho_{\text{щ}} = 1 - \rho_{\text{нш}}/\rho_{\text{щ}} = 1 - 1,48/2,68 = 0,45$ .

$$Щ = \frac{1000}{1,375 \times \frac{0,45}{1,48} + \frac{1}{2,68}} = 1264 \text{ кг/м}^3$$

$$П = \left( 1000 - \left( \frac{501}{3,1} + 143 + \frac{1264}{2,68} \right) \right) \times 2,65 = 594 \text{ кг/м}^3$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 463 кг/м<sup>3</sup>, вода – 132 л/м<sup>3</sup>, щебінь – 1264 кг/м<sup>3</sup>, пісок – 655 кг/м<sup>3</sup>. Витрата суперпластифікатора Melflux 2651F складає 463×0,05=23,15 кг/м<sup>3</sup>.



## 2.8. Проектування складів дрібнозернистих бетонів та фібробетонів

2.8.1. Дрібнозернисті бетони на основі рухомих та жорстких сумішей

Для розрахунку Ц/В дрібнозернистого бетону слід використовувати формулу загального виду (2.25).

Значення коефіцієнтів  $A$  і  $b$  вибираються за табл. Б.31.

При розрахунку складу дрібнозернистої бетонної суміші необхідно враховувати, що після її ущільнення в бетоні завжди залишається деякий об'єм повітря. Кількість втягнутого повітря визначається легкоукладальністю бетонних сумішей, способом ущільнення і особливостями конкретних повітрявтягувальних добавок.

Об'єм затисненого в дрібнозернистих бетонних сумішах повітря ( $l$ ) при вібруванні визначається за формулами:

- для пластичних сумішей:  
$$V_{з,п} = -6,52 \cdot \ln(OK+1) + 19,9; \quad (2.30)$$

- для жорстких сумішей:  
$$V_{з,п} = 24,95 \cdot \ln(Ж+1) - 8,3. \quad (2.31)$$

За відомими значеннями  $V/Ц$  та легкоукладальності суміші (( $OK$ , см) або ( $Ж$ , с)) за рис. Б.4, рис. Б.5 та табл. Б.32 знаходиться співвідношення між заповнювачем і цементом  $n$ .

Відомі значення  $V/Ц$  і  $n$  дають можливість знайти, на основі рівняння матеріального балансу (суми абсолютних об'ємів) витрати всіх компонентів дрібнозернистої бетонної суміші:

$$Ц = \frac{1 - V_{з,п}}{1/\rho_{ц} + V/Ц + n/\rho_{п}}, \quad (2.32)$$

$$B = Ц \cdot B / Ц, \quad (2.33)$$

$$З = nЦ. \quad (2.34)$$

У приведених формулах:  $V_{з,п}$  – об'єм затисненого повітря;  $\rho_{ц}$  і  $\rho_{п}$  – густина цементу і заповнювачі (піску) в  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

**Приклад 2.13.** Визначити склад дрібнозернистого бетону з міцністю 30 МПа для тонкостінної залізобетонної плити із легкоукладальністю суміші 7...8 с.



*Матеріали: портландцемент М400, пісок з модулем крупності  $M_k = 1,5$ , густиною  $\rho_n = 2,63$  кг/л.*

1. За формулою (2.6):

$$B/C = 0,44 \cdot 40 / (30 + 0,55 \cdot 0,44 \cdot 40) = 0,44.$$

2. За графіком (рис. Б.5) встановлюємо значення  $n$ . Воно дорівнює 2,5. Враховуючи поправку на крупність піску (рис. Б.5), уточнюємо відношення. Воно складає 1:2,3.

3. Витрата цементу (2.32):

$$C = \frac{1000}{\left(\frac{1}{3,1}\right) + 0,44 + \left(\frac{2,3}{2,63}\right)} = 610 \text{ кг/м}^3.$$

4. Витрата піску:

$$P = 3,7 \cdot 440 = 1630 \text{ кг/м}^3.$$

### 2.8.2. Високоміцні дрібнозернисті бетони

При проектуванні складу високоміцних дрібнозернистих бетонів, котрі виготовляються з використанням ефективних суперпластифікаторів при розрахунку Ц/В за формулою (2.25) слід враховувати коефіцієнт  $k$ . Експериментальні значення  $k$  для дрібнозернистого бетону з добавкою Melflux 2651 f (0,5...0,7%) знаходяться в межах 1,15...1,25.

Початкова витрата води ( $V_0$ ) знаходиться з табл. Б.39. Поправочний коефіцієнт, що враховує вплив добавок на водопотребу бетоної суміші – за табл. Б.27.

Витрата компонентів дрібнозернистого бетону (цементу та заповнювача) знаходиться за формулами:

$$C = B \cdot \frac{C}{B} \text{ або } C = \frac{B}{B/C}. \quad (2.35)$$

$$Z = \left(1000 - V_{з.н.} - C / \rho_u - B / \rho_b\right) \rho_z. \quad (2.36)$$

**Приклад 2.14.** *Визначити склад дрібнозернистого бетону з міцністю 70 МПа з рухомістю 16 см.*

*Матеріали: портландцемент ПЦ-500, модуль крупності заповнювача (суміш піску з фракцією гранітних відсівів*



2,5...5 мм)  $M_k = 3,5$ , густина  $\rho_s = 2,67$  кг/л. Добавка Melflux 2651 f (0,5%)

1. За формулою (2.25), приймаючи значення коефіцієнтів  $A$  і  $b$  за табл. Б.31, та  $k=1,15$  (для добавки Melflux 2651 f):

$$B/C = 1,15 \cdot 0,52 \cdot 50 / (70 + 1,15 \cdot 0,65 \cdot 0,52 \cdot 50) = 0,33.$$

2. За табл. Б.39 встановлюємо орієнтовне значення витрати води ( $V_0$ ).  $V_0 = 270$  л/м<sup>3</sup>. Враховуючи поправку на використання добавки знаходимо витрату води:

$$V = V_0 \cdot K_d = 270 \cdot 0,64 = 173 \text{ л/м}^3.$$

3. Витрата цементу:

$$C = 173 \cdot 0,33 = 517 \text{ кг/м}^3.$$

4. Об'єм затисненого повітря (2.31):

$$V_{з.п} = -6,52 \cdot \ln(15+1) + 19,9 = 1,8 \text{ л.}$$

5. Витрата заповнювача:

$$З = (1000 - 1,8 - 517 / 3,1 - 173) \cdot 2,67 = 1757 \text{ кг/м}^3.$$

### 2.8.3. Вібропресовані дрібнозернисті бетони

Для розрахунку  $C/V$  (чи  $V/C$ ) бетону, яке повинне забезпечити задану міцність при стиску можна застосовувати формула загального виду (2.25):

Усереднені значення коефіцієнтів  $A$  та  $b$  наведені в табл. Б.31.

Визначення співвідношення заповнювача і цементу ( $n$ ) виконується за формулою:

$$n = \frac{B/C - \left(\frac{B}{C}\right)_{ц.т.}^{за.л.}}{K_{зм}}, \quad (2.37)$$

де  $\left(\frac{B}{C}\right)_{ц.т.}^{за.л.}$  – залишкове водоцементне відношення цементного тіста після ущільнення,  $K_{зм}$  – коефіцієнт змочування заповнювача.

Для більшості вібропресів для формування стінових блоків, тротуарних плит та бордюрів, розповсюджених на



території України значення  $\left(\frac{B}{\Pi}\right)_{ц.т.}^{зал.}$  знаходиться в межах 0,16...0,17. При відомих параметрах ущільнення вібропреса (тривалість вібрування, амплітуда, частота, величина динамічного та статичного навантажень)  $\left(\frac{B}{\Pi}\right)_{ц.т.}^{зал.}$  можна визначити користуючись номограмою (рис. Б.8).

Коефіцієнт змочування заповнювача відповідних фракцій заповнювача знаходимо за табл. Б.34.

Кількість затиснутого повітря ( $V_{з.н}$ ) при вібропресуванні визначається з урахуванням параметрів ущільнення бетонної суміші за номограмою (рис. Б.6).

Витрату цементу, заповнювача та води визначається за формулами (2.32...2.34).

**Приклад 2.15.** Розрахувати витрати компонентів на виготовлення бетонних виробів способом вібропресування з дрібнозернистого бетону. Потрібна міцність бетону у віці 28 днів 60 МПа. Параметри формувальної установки: тривалість вібрування – 12 с, частота – 50 Гц, амплітуда – 0,5 мм, динамічне навантаження 0,1 МПа. Характеристики вихідних матеріалів: активність портландцементу – 50 МПа, НГ – 26,5%, істинна густина – 3,1 г/см<sup>3</sup>, насипна густина – 1300 кг/м<sup>3</sup>; заповнювач – пісок з  $M_{кр}=2,0$  ( $K_{зм}=0,035$ ), істинна густина – 2,65 г/см<sup>3</sup>, насипна густина – 1450 кг/м<sup>3</sup>.

Послідовність розрахунку.

Із рівняння (2.25) знаходимо В/Ц, необхідне для забезпечення міцності бетону, приймаючи значення коефіцієнтів з табл. Б.31 ( $A=0,48$   $b=0,2$ ):

$$\frac{B}{\Pi} = \frac{AR_{ц}}{R + b AR_{ц}} = \frac{0,48 \cdot 50}{60 + 0,2 \cdot 0,48 \cdot 50} = 0,35.$$



Значення  $\left(\frac{B}{\Pi}\right)_{ц.т.}$  визначене за номограмою (рис. Б.8)

становить 0,19.

Співвідношення  $n$  знаходимо з рівняння (2.27), враховуючи змочуваність заповнювача та розраховані значення  $B/\Pi$ :

$$n = \frac{\frac{B}{\Pi} - \left(\frac{B}{\Pi}\right)_{ц.т.}^{зал.}}{K_{з.м}} = \frac{0,35 - 0,19}{0,035} = 4,57.$$

За номограмою рис.  $V_{з.п.} = 70$  л.

Витрату цементу знаходимо з рівняння (2.32):

$$\Pi = \frac{1000 - V_{з.п.}}{\frac{1}{\rho_{ц.}} + \frac{B}{\Pi} + \frac{(3/\Pi)}{\rho_{з.}}} = \frac{1000 - 70}{\frac{1}{3,1} + 0,35 + \frac{4,57}{2,65}} = 388 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата води:

$$B = \Pi \cdot \frac{B}{\Pi} = 388 \cdot 0,35 = 136 \text{ л/м}^3.$$

Витрата заповнювача:

$$З = \Pi \cdot n = 388 \cdot 4,57 = 1773 \text{ кг/м}^3.$$

#### 2.8.4. Високоміцний дрібнозернистий фібробетон

Розрахунок складу високоміцного дрібнозернистого фібробетону складається з двох етапів. На першому етапі розраховується склад дрібнозернистого бетону згідно алгоритму наведеного в п. 2.8.2. На другому етапі визначається вміст фібри (рис. Б.7) і корегується вміст води за формулою:

$$V_{\Phi} = (-0,003 \cdot \Phi - 0,0778) \cdot ОК + 0,0656 \cdot \Phi + 0,6875, \quad (2.38)$$

де ОК – задана рухомість суміші, см;  $\Phi$  – вміст фібри,  $\text{кг/м}^3$ .

Також корегуванню підлягають витрати цементу і заповнювача (формули 2.35...2.36).



**Приклад 2.16.** Визначити склад дрібнозернистого фібробетону з міцністю при стиску 60 МПа та міцністю на розтяг при згині 12 МПа із рухомістю суміші 15 см.

*Матеріали: портландцемент М500, дрібний заповнювач з модулем крупності  $M_k = 3,5$  середньої якості та дійсною густиною  $\rho_n = 2,65$  кг/л. Передбачається використання добавки Melflux 2651 f (0,5%).*

1. За формулою (2.25) з врахуванням коефіцієнтів  $A = 0,48$  і  $b = 0,65$  (табл. Б.31) та  $k=1,15$  (для добавки Melflux 2651 f):

$$V/C = 1,15 \cdot 0,48 \cdot 50 / (60 + 0,65 \cdot 0,48 \cdot 50) = 0,365.$$

2. Перевіряємо можливість забезпечення заданої міцності на розтяг при згині та міцності при стиску. Як видно з номограми (рис. Б.7), отримане  $V/C = 0,365$  та  $f_{c,tf} = 12$  МПа знаходяться в межах допустимих значень.

3. За табл. Б.25 встановлюємо орієнтовне значення витрати води ( $V_0$ ).  $V_0 = 260$  л/м<sup>3</sup>. Враховуючи поправку на використання добавки (табл. Б.27) знаходимо витрату води:

$$V' = V_0 \cdot K_d = 260 \cdot 0,65 = 169 \text{ л/м}^3.$$

4. Початкова витрата цементу (2.35):

$$C_o = 169 \cdot 0,365 = 463 \text{ кг/м}^3.$$

5. Об'єм затисненого повітря (2.30):

$$V_{z,n} = -6,52 \cdot \ln(15+1) + 19,9 = 1,8 \text{ л}$$

6. Витрата заповнювача (2.36):

$$Z = (1000 - 1,8 - 463 / 3,1 - 169) \cdot 2,65 = 1801 \text{ кг/м}^3.$$

7. За допомогою номограми (рис. Б.7) визначаємо витрату фібри, необхідну для забезпечення міцності на розтяг при згині 12 МПа. Вона складає 105 кг/м<sup>3</sup>.

8. Враховуємо поправку, % на витрату води при введенні фібри:

$$V_\Phi = (-0,003 \cdot \Phi - 0,0778) \cdot OK + 0,0656 \cdot \Phi + 0,6875 = 1,7\%.$$





9. Уточнене значення витрати води:  $V = V' + V' \cdot V_{\phi}/100 = 169 + 169 \cdot 1,7/100 = 172$  л.

8. Уточнене значення витрати цементу:

$$Ц = \frac{B}{B/Ц} = \frac{172}{0,365} = 471 \text{ кг.}$$

9. Уточнене значення витрати дрібного заповнювача визначаємо за методом абсолютних об'ємів (2.36):

$$П = \left( 1000 - 1,8 - \left( \frac{471}{3,1} + \frac{105}{7,85} + \frac{172}{1} \right) \right) \cdot 2,65 = 1752 \text{ кг.}$$

Остаточний склад фібробетонної суміші, кг/м<sup>3</sup>:

$$Ц = 471; V = 172; П = 1752; \Phi = 105; \text{Melflux 2651f} = 2,36.$$

## 2.9. Експериментальне корегування складів бетонів

2.9.1. Розрахунковий склад перевіряють на пробному замісі об'ємом 10 л або більше залежно від крупності заповнювачів і обсягу випробувань та визначають рухомість або жорсткість, а також середню густину бетонної суміші після її ущільнення у формі. Підвищення осадки конусу (*ОК*) або зниження жорсткості суміші (*Ж*), якщо вони не відповідають заданим значенням, досягають послідовним додаванням у пробний заміс 5...10% води і цементу з забезпеченням прийнятого *Ц/В*. Зменшення *ОК* або підвищення *Ж* можна досягти послідовним додаванням 5...10% за масою піску і щебеню у співвідношенні, що знайдене розрахунком. Легкоукладальність бетонної суміші відповідає заданій, якщо осадка конусу має відхилення від неї не більше  $\pm 1$  см, а жорсткість – не більше  $\pm 3$  с.

У підбраному за легкоукладальністю номінальному складі бетону фіксують фактичну витрату кожного матеріалу на заміс (*g<sub>i</sub>*) і визначають середню густину бетонної суміші ( $\rho_{\text{б.с.}}$ ). Фактичні витрати матеріалів на 1 м<sup>3</sup> суміші розраховують за формулами:



$$C_1 = \frac{\rho_{б.с.}}{\sum g} g_u; \quad \Pi_1 = \frac{\rho_{б.с.}}{\sum g} g_n; \quad \Psi_1 = \frac{\rho_{б.с.}}{\sum g} g_w; \quad B_1 = \frac{\rho_{б.с.}}{\sum g} g_a, \quad (2.39)$$

де  $g_u, g_n, g_w, g_a$  – відповідно фактичні витрати цементу, піску, щебеню, води на заміс.

При введенні в бетонну суміш тонкодисперсних мінеральних наповнювачів їх фактичні витрати знаходять за аналогічними формулами.

2.9.2. Оптимізацію співвідношення заповнювачів досягають, змінюючи показник  $r$  – частку піску в суміші заповнювачів до встановлення мінімально можливої на даних матеріалах водопотреби бетонної суміші (рис. Б.5).

Для оптимізації розрахункового  $r$  при значеннях  $C_1$  і  $B_1$ , що забезпечують задану легкоукладальність суміші розраховують два допоміжні склади бетону з  $r_1 = r + (0,03 \dots 0,05)$  і  $r_2 = r - (0,03 \dots 0,05)$ . (При необхідності число допоміжних складів може збільшуватись до чотирьох). Для цих складів перевіряють легкоукладальність. При її збільшенні і відсутності помітного водовідділення зменшується при заданому значенні  $OK$  або  $Ж$  водовміст бетонної суміші і відповідно витрата цементу.

2.9.3. Наступною стадією експериментального корегування складів бетону є перевірка міцності в заданому віці, а при необхідності і після теплової обробки, залежно від цементно-водного відношення. З цією метою розраховують додаткові склади бетону і виготовляють контрольні зразки, змінюючи  $C/B$  на  $\pm(0,3 \dots 0,5)$ , приймаючи витрату води і крупного заповнювача, що були знайдені на попередній стадії корегування. При цьому витрату піску збільшують або зменшують на відповідну величину зміни витрати цементу. За результатами визначення міцності бетону на початковому і додаткових складах будують при необхідності графічні залежності міцності бетону від  $C/B$ , або користуються інтерполяційними розрахунками. За цими залежностями визначають значення  $C/B$ , яке забезпечує отримання бетону з заданими показниками міцності.

Знайдені значення  $C/B$ , середньої густини бетонної суміші, витрати води і крупного заповнювача дають можливість



розрахувати кількість цементу і дрібного заповнювача для номінального складу бетону.

2.9.4. На відміну від лабораторних (номінальних) складів бетону, що приводяться для сухих матеріалів, у виробничих умовах враховують, що пісок і щебінь (гравій) мають деяку вологість.

Виробничі витрати дрібного ( $\Pi_{ер}$ , кг/м<sup>3</sup>) і крупного ( $\mathit{Ш}_{ер}$ , кг/м<sup>3</sup>) заповнювачів збільшують на масу води, що знаходиться в них:

$$\Pi_{ер} = \Pi \cdot (1 + W_n), \quad (2.40)$$

$$\mathit{Ш}_{ер} = \mathit{Ш} \cdot (1 + W_{щ}), \quad (2.41)$$

де  $\Pi$ ,  $\mathit{Ш}$  – витрата піску і щебеню в номінальному складі;  $W_n$ ,  $W_{щ}$  – вологість піску і щебеню, частки одиниці.

Відповідно виробничу витрату води ( $B_{ер}$ ) зменшують на масу води, що знаходиться в заповнювачах:

$$B_{ер} = B - \Pi \cdot W_n - \mathit{Ш} \cdot W_{щ}. \quad (2.42)$$

У деяких випадках виробничий склад бетону доцільно виражати в відносних масових частинах, при цьому частку цементу приймають рівній одиниці. В цьому випадку виробничий склад бетону представляють у виді пропорції:

$$1 : \Pi : \mathit{Ш} = \frac{\mathit{Ш}}{\Pi} : \frac{\Pi_{ер}}{\Pi} : \frac{\mathit{Ш}_{ер}}{\Pi}. \quad (2.43)$$

Якщо бетонозмішувач, що використовується для приготування суміші, характеризується місткістю по об'єму сухих матеріалів, тоді попередньо визначається коефіцієнт виходу бетонної суміші ( $\beta_{\sigma}$ ). Коефіцієнт виходу зазвичай знаходиться в межах 0,55...0,75 і характеризується відношенням об'єму бетонної суміші до суми об'ємів цементу і заповнювачів в насипному стані:

$$\beta_{\sigma} = \frac{1}{\frac{\mathit{Ш}}{\rho_{н.щ}} + \frac{\Pi_{ер}}{\rho_{н.п}} + \frac{\mathit{Ш}_{ер}}{\rho_{н.ц}}}, \quad (2.44)$$

де  $\rho_{н.щ}$ ,  $\rho_{н.п}$ ,  $\rho_{н.ц}$  – відповідно насипні густини цементу, піску і щебеню (гравію).



Дозування матеріалів (цементу, заповнювачів, води і добавки) на один заміс бетонозмішувача обчислюють за формулою:

$$D_i = V_{б.з} \cdot \rho_i, \quad (2.45)$$

де  $D_i$  – доза і-го матеріалу за масою, кг, або об'єму,  $m^3$ ;  $\rho_i$  – витрата і-го матеріалу у виробничому (робочому) складі бетону в  $кг/м^3$  ( $л/м^3$ );  $V_{б.з}$  – об'єм бетонозмішувача,  $m^3$ .

**Приклад 2.17.** Експериментально перевірити і уточнити розрахунковий склад важкого бетону з рухомістю бетонної суміші  $OK = 5 \dots 7$  см, міцністю на стиск у віці 28 діб 40 МПа та міцністю після теплової обробки 30 МПа.

Початковий розрахунковий склад:  $Ц = 380$   $кг/м^3$ ;  $B = 190$   $л/м^3$ ;  $П = 690$   $кг/м^3$ ;  $Щ = 1140$   $кг/м^3$ ;  $r = 0,37$ ;  $\rho_{б.с.} = 2385$   $кг/м^3$ . Густина цементу, піску та щебеню:  $\rho_ц = 3,1$   $кг/л$ ;  $\rho_п = 2,65$   $кг/л$ ;  $\rho_щ = 2,70$   $кг/л$ .

1. На пробному замісі об'ємом 10 л визначаємо, що фактична осадка конусу бетонної суміші розрахункового складу  $OK = 10$  см. При  $r = 0,37$  додаємо в суміш 34  $кг/м^3$  піску (0,34 кг на заміс) і 52  $кг/м^3$  щебеню (0,52 кг на заміс) і визначаємо, що рухомість бетонної суміші зменшилась до  $OK = 5$  см.

Уточнюємо густину бетонної суміші ( $\rho'_{б.с.}$ ) і за формулами (2.36) розраховуємо склад бетону:

$$\rho'_{б.с.} = 2375 \text{ кг/м}^3;$$
$$Ц_1 = \frac{2375}{3,8 + 1,9 + (6,9 + 0,34) + (11,4 + 0,52)} = \frac{2375}{24,86} \cdot 3,8 = 363 \text{ кг/м}^3;$$

$$B_1 = \frac{2375}{24,86} \cdot 1,9 = 181 \text{ л/м}^3; \quad П_1 = \frac{2375}{24,86} \cdot 7,24 = 692 \text{ кг/м}^3;$$

$$Щ_1 = \frac{2375}{24,86} \cdot 11,92 = 1139 \text{ кг/м}^3.$$

2. Знаходимо оптимальне значення  $r$ , що забезпечує мінімальну водопотребу бетонної суміші. З цією метою



розраховуємо два додаткових склади бетонів : № 2 –  $r=0,34$ ; 3 3 –  $r=0,41$ .

Склад № 2:

$$\text{- об'єм цементного тіста: } V_{ц.т.} = \frac{363}{3,1} + 181 = 298 \text{ л / м}^3;$$

$$\text{- об'єм заповнювачів: } V_з = 702 \text{ л / м}^3;$$

$$\text{- витрата піску: } П = (702 \cdot 0,34) \cdot 2,65 = 632 \text{ кг / м}^3;$$

$$\text{- витрата щебеню - Щ} = (702 \cdot 0,66) \cdot 2,70 = 1250 \text{ кг / м}^3.$$

$$\text{Приймаємо: } Ц_2 = 363 \text{ кг/м}^3; B_2 = 181 \text{ л/м}^3;$$

$$П_2 = 632 \text{ кг/м}^3; Щ_2 = 1250 \text{ кг/м}^3.$$

Склад № 3:

$$V_{ц.т.} = 298 \text{ л / м}^3; V_з = 702 \text{ л / м}^3;$$

$$П = (702 \cdot 0,41) \cdot 2,65 = 763 \text{ кг / м}^3;$$

$$Щ = (702 \cdot 0,59) \cdot 2,70 = 1118 \text{ кг / м}^3.$$

$$\text{Приймаємо: } Ц_3 = 363 \text{ кг/м}^3; B_3 = 181 \text{ л/м}^3;$$

$$П_3 = 763 \text{ кг/м}^3; Щ_3 = 1118 \text{ кг/м}^3.$$

На пробному замісі встановлюємо, що для бетонної суміші складу № 2  $OK = 10$  см, водовідділення не спостерігається, складу № 3 –  $OK = 2$  см.

В бетонній суміші складу № 2 зменшуємо витрату води і цементу на 5% і переконуємося, що досягається  $OK = 5$  см.

Приймаємо як оптимальний (до уточнення  $Ц/В$ ) склад № 4 бетонної суміші в  $\text{кг/м}^3$ :  $Ц_4 = 345 \text{ кг/м}^3$ ;  $B_4 = 172 \text{ л/м}^3$ ;  $Ц/В = 2$ ;  $П_4 = 646 \text{ кг/м}^3$ ;  $Щ_4 = 1278 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_6 = 2441 \text{ кг/м}^3$ .

Для уточнення  $Ц/В$ , що забезпечує як необхідну міцність після пропарювання, так і міцність в проектному віці розраховуємо два додаткових склади з  $Ц/В = 2,3$  і  $Ц/В = 1,7$ .

$$\text{Склад № 5: } Ц_5 = 396 \text{ кг/м}^3; B_5 = 172 \text{ л/м}^3;$$

$$П_5 = 630 \text{ кг/м}^3; Щ_5 = 1247 \text{ кг/м}^3.$$



Склад № 6:  $C_6 = 292 \text{ кг/м}^3$ ;  $B_6 = 172 \text{ л/м}^3$ ;

$P_6 = 661 \text{ кг/м}^3$ ;  $Щ_6 = 1307 \text{ кг/м}^3$ .

Виготовляємо і випробовуємо контрольні зразки з бетонів складів № 4, № 5 і № 6.

Результати випробувань наведені в таблиці.

Таблиця 2.1

Результати випробувань контрольних зразків бетонів складів  
№ 4, № 5 і № 6

Склад	Ц/В	Міцність на стиск через 4 год після пропарювання ( $f_{cm4}$ )	Міцність на стиск через 28 діб ( $f_{cm28}$ )
№ 4	2,0	26	36
№ 5	2,3	32	41
№ 6	1,7	19	29

Остаточно в якості номінального складу бетону з заданими показниками легкоукладальності бетонної суміші і міцністю приймаємо склад № 5:  $C_5 = 396 \text{ кг/м}^3$ ;

$B_5 = 172 \text{ л/м}^3$ ;  $P_5 = 630 \text{ кг/м}^3$ ;  $Щ_5 = 1247 \text{ кг/м}^3$ .



### 3. ПРИКЛАДИ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКЦІЙ ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД ТА СКЛАДІВ БЕТОНІВ

#### 3.1. Типові приклади

**Приклад 1.** За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт  $l_0=3$  м, висоту  $H=3$  м, товщину  $h=20$  см. Захисне покриття повинно витримувати пряме попадання від патрону кулемету ДШК, який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 12,7 мм, вагу  $m=48,2$  г, початкова швидкість  $v_c=840$  м/с, висота головної частини патрону  $H_z=33,43$  мм.

#### Необхідно:

А) Підібрати клас дрібнозернистого фібробетону та запроєктувати параметри його складу для захисного покриття блок посту. До фібробетону також пред'являються наступні вимоги: морозостійкість не нижче F100, водонепроникність W4, міцність на стиск після 12 год, повинна бути не менша 50% від проектної.

Б) Підібрати клас важкого бетону, за умови, що виробничі потужності заводу обмежені класом бетону C30. За необхідності планується армування арматурою класу A500, з межею текучості  $f_y=435$  МПа.

#### Розв'язок.

А) Конструктивний розрахунок

1. Попередньо визначаємо необхідний коефіцієнт піддатливості проникненню. Для цього попередньо визначимо допоміжні параметри, а також приймемо, що пуля проникає під прямим кутом до захисного покриття, за виразами (1.1), (1.2), (1.3)

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,4\sqrt{\left(\frac{H_z}{d}\right)^2} = 0,5 + 0,4\sqrt{\left(\frac{33,43}{12,7}\right)^2} = 1,263;$$

$$\lambda_2 = 2,8\sqrt[3]{d} - 1,3\sqrt{d} = 2,8\sqrt[3]{0,0127} - 1,3\sqrt{0,0127} = 0,507;$$

$$\lambda = \lambda_1\lambda_2 = 1,263 \times 0,507 = 0,640.$$

За формулою(1.4) визначаємо



$$k_{np} = \frac{h_{np} d^2}{\lambda m v_c} = \frac{0,15 \times 0,0127^2}{0,640 \times 0,0482 \times 840} = 9,34 \times 10^{-7}.$$

2. Визначаємо необхідну міцність дрібнозернистого сталевібробетону  $f_{fck,prism}$  за виразом (1.7)

$$f_{fck,prism} = \frac{11,55 - k_{np} \times 10^7}{0,05} = \frac{11,55 - 9,34 \times 10^{-7} \times 10^7}{0,05} = 44,2 \text{ МПа}.$$

3. За табл. А.1 встановлюємо, що дрібнозернистий вібробетон класу  $C70$  має призмову міцність на стиск  $f_{fck,prism} = 50 \text{ МПа}$ . При цьому міцність на пробій буде забезпечена навіть без поздовжнього армування.

4. Встановлюємо значення коефіцієнту піддатливості проникненню за виразом (1.10)

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (11,55 - 0,05 \times 50) \times 10^{-7} = 9,05 \times 10^{-7}.$$

5. Встановлюємо глибину проникнення пулі у захисне покриття за формулою (1.11)

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c = 0,640 \times 9,05 \times 10^{-7} \frac{0,0482}{0,0127^2} 840 = 0,145 \text{ м};$$

6. Визначимо динамічні характеристики. Час дії навантаження визначимо за виразом (1.12)

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_c} = \frac{2 \times 0,145}{840} = 3,45 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}.$$

7. Граничні деформації бетону попередньо прийемо за табл. А.1  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cul} = 300 \times 10^{-5}$ ;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau} = \frac{30 \times 10^{-4}}{3,45 \times 10^{-4}} = 8,7 \text{ с}^{-1};$$

8. Так як  $\dot{\varepsilon} = 8,7 \text{ с}^{-1}$ , то коефіцієнт динамічного зміщення, визначимо за другим виразом системи (1.14)

$$DEF_c = \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} = \left( \frac{8,7}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1,026 \times 0,02} = 1,29,$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9 f_{fck,prism} / f_{c0}} = \frac{1}{5 + 9 \times 50,0 / 10} = 0,02.$$





$$\varepsilon_{cul,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{300 \times 10^{-5}}{1,29} = 232,6 \times 10^{-5}.$$

Визначимо похибку

$$\Delta = \frac{300 - 232,6}{232,6} 100\% = 28,98\%.$$

Прийmemo значення  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cul,d} = 232,6 \times 10^{-5}$ , та встановимо нові динамічні параметри

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{23,26 \times 10^{-4}}{3,45 \times 10^{-4}} = 6,74 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left( \frac{6,74}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0205} = 1,29.$$

$$\varepsilon_{cul,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{300 \times 10^{-5}}{1,29} = 232,6 \times 10^{-5}.$$

$$\Delta = \frac{232,6 - 232,6}{232,6} 100\% = 0\%.$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

Визначимо динамічні характеристики дрібнозернистого фібробетону:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,29^{2/3} = 1,185;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,29 \times 37 = 47,73 \text{ МПа}.$$

Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. А.1 для С70  $f_{ct} = 3,8 \text{ МПа}$ ;

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,185 \times 3,8 = 4,5 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 41000 \times 1,29^2 = 68228 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c} = \frac{260 \times 10^{-5}}{1,29} = 202 \times 10^{-5}.$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{667 \times 10^{-5}}{1,185} = 563 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{1000 \times 10^{-5}}{1,185} = 844 \times 10^{-5}.$$

9. Розрахуємо граничну кривину та згинаючий момент на основі нелінійної деформаційної моделі у розробленому програмному комплексі (рис. 3.1).

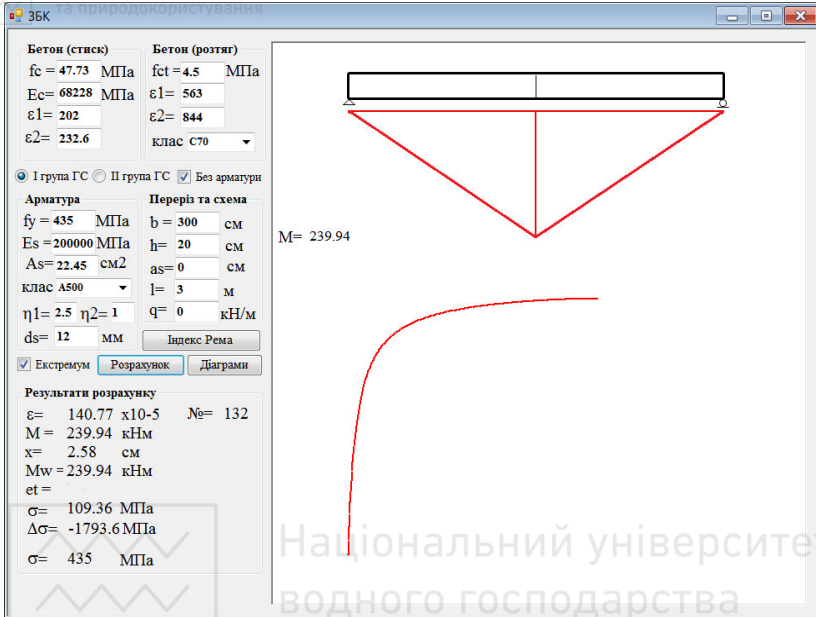


Рис. 3.1. Розрахунок плити із дрібнозернистого фібробетону на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 1

10. Обчислюємо кривизну при граничному значенні згинального моменту

$$\frac{1}{r_{ult}} = \frac{\epsilon_{cu}}{x} = \frac{140,77 \times 10^{-5}}{0,0258} = 0,0546 \text{ м}^{-1}.$$

11. Перевіримо умову міцності (1.23)

$$m v^2 = 0,0482 \times 840^2 = 34010 \text{ Дж} = 34,01 \text{ кНм};$$

$$\frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} l = \frac{1}{3} 239,94 \times 0,0546 \times 3 = 13,1 \text{ кНм};$$

$$\frac{4 M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 239,94}{3} \times 0,145 = 46,39 \text{ кНм}.$$

У даному випадку вплив внутрішньої потенційної енергії додаткового прогину складає 22%, завдяки великій довжині прольоту та незначній товщині плити. У багатьох



фортифікаційних спорудах призначених для захисту від більш потужної зброї ця енергія буде знаходитись у межах 10...15%.

Так як

$$mv^2 = 34,01 \text{ кНм} < \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = 46,39 + 13,1 = 59,49 \text{ кНм},$$

міцність плити забезпечена.

Таким чином, для забезпечення захисної надійності блок посту при дії на нього зброї заданих параметрів, необхідно використати дрібнозернистий фібробетон класу C70, з такими характеристиками:

$$f_{fck,prism} = 50 \text{ МПа}, f_{fc} = 37 \text{ МПа}, f_{ct} = 3,8 \text{ МПа}.$$

А) Підбір складу дрібнозернистого фібробетону

Для проектування складу сталеві фібробетону додатково приймаємо наступні умови:

- рухомість бетонної суміші: P4 (16...21 см);
- характеристики сировинних матеріалів:
- фібра: сталева хвилястого профілю (L = 60 мм, d = 1 мм);
- портландцемент з активністю 50 МПа;
- дрібний заповнювач з модулем крупності  $M_k = 3,5$  середньої якості та дійсною густиною  $\rho_n = 2,65$  кг/л.
- добавка Melflux 2651 f (0,5% від цементу).

1. Розраховуємо необхідну середню міцність бетону при стиску у віці 28 діб, що забезпечує клас бетону C70 (при нормативному коефіцієнті варіації 13,5%). З цією метою використовуємо відому формулу:

$$f_{cm}^{28} = B \left( 1 - 1,64 \cdot \frac{C_v}{100} \right),$$

де  $C_v$  – коефіцієнт варіації, %.

$$f_{cm}^{28} = 70 / (1 - 1,64 \cdot 0,135) = 89,9 \text{ МПа}.$$

2. За умовою прикладу міцність при стиску через 12 год повинна становити 50% від 28-ої:

$$f_{cm}^{12г} = \frac{50\%}{100} 89,9 = 45 \text{ МПа}.$$

3. Проводимо перевірку чи буде забезпечена задана морозостійкість бетону (F100). Для цього за формулою (2.10)



розрахуємо об'єм втягнутого повітря,  $V_{n.в}$ , що забезпечує при заданій міцності марку за морозостійкістю. За табл. Б.40 вибираємо коефіцієнти  $A_1, A_2$  з врахуванням рухомості бетонної суміші за (ОК=10...15 см):

$$V_{n.в} = \frac{\ln\left(\frac{F}{0,34 \cdot f_{cm}^{1,68}}\right)}{0,35} = \frac{\ln\left(\frac{100}{0,34 \cdot 89,9^{1,68}}\right)}{0,35} < 0.$$

Отриманий результат свідчить, що при даній міцності задана морозостійкість (F100) забезпечується без додаткового залучення повітря до бетонної суміші.

4. Для перевірки вимоги за водонепроникністю (W4) за формулою (10) табл. Б.19 розрахуємо міцність, що забезпечує необхідний розрахунковий коефіцієнт фільтрації ( $K_f$ ). З табл. 21 для W4 коефіцієнт фільтрації повинен становити не більше  $5 \cdot 10^{-10}$  см/с:

$$f_{cm} = \left(\frac{5 \cdot 10^{-10}}{126}\right)^{-0,13} = 30,3 \text{ МПа}.$$

Таким чином, при заданій міцності при стиску 89,9 МПа водонепроникність забезпечується.

5. За допомогою формули (2.5) при значенні коефіцієнта якості заповнювачів  $A=0,65$  і наведених вище значеннях знаходимо послідовно значення Ц/В, що забезпечують задану міцність при стиску:

- на 12 год

$$\text{Ц/В}_{12} = \frac{45}{0,9 \cdot 0,65 \cdot 50} + 1,92 = 3,46 \text{ (В/Ц}=0,29);$$

- на 28 діб

$$\text{Ц/В}_{28} = \frac{89,9}{0,73 \cdot 0,65 \cdot 50} - 0,22 = 3,56 \text{ (В/Ц}=0,28).$$

6. За табл. Б.39 встановлюємо орієнтовне значення витрати води ( $B_0$ ).  $B_0=270$  л/м<sup>3</sup>. Враховуючи поправку на використання добавки (табл. Б.27) знаходимо витрату води:

$$B' = B_0 \cdot K_d = 270 \cdot 0,64 = 173 \text{ л/м}^3.$$

7. Початкова витрата цементу (2.35):

$$\text{Ц}_o = 173 / 0,28 = 615 \text{ кг/м}^3.$$



8. Об'єм затисненого повітря (2.30):

$$V_{z,n} = -6,52 \cdot \ln(18+1) + 19,9 = 0,7 \text{ л.}$$

9. Витрата заповнювача (2.36):

$$z = (1000 - 0,7 - 615/3,1 - 173) \cdot 2,65 = 1664 \text{ кг/м}^3.$$

10. Для визначення кількості фібри, що забезпечить необхідну міцність сталеві фібробетону на розтяг за даними формули (1а) табл. Б.18 та з врахуванням коефіцієнту надійності  $\gamma_{fbt} = 1,5$  (для першої групи граничних станів за несучою здатністю) переходимо від міцності при осьовому розтязі до міцності при згині:

$$f_{ctf} = 1,74 \cdot \gamma_{fbt} \cdot f_{ct} = 1,74 \cdot 1,5 \cdot 3,8 = 9,9 \text{ МПа.}$$

11. За номограмою (рис. Б.7) знаходимо, що при значенні  $V/\Pi = 0,28$  міцність сталеві фібробетону на розтяг при згині буде забезпечена при витраті фібри  $\Phi = 70 \text{ кг/м}^3$ .

12. Враховуємо поправку, % на витрату води при введенні фібри (2.38):

$$V_{\Phi} = (-0,003 \cdot 70 - 0,0778) \cdot 18 + 0,0656 \cdot 70 + 0,6875 = 0,1\%.$$

Даним значенням поправки можна нехтувати, тому корегувати витрату води, цементу та заповнювача немає потреби.

Розрахунковий склад фібробетонної суміші,  $\text{кг/м}^3$ :

$$\text{Ц} = 615; \text{В} = 173; \text{П} = 1664; \text{Ф} = 70; \text{Melflux 2651f} = 3,08.$$

### Б) Конструктивний розрахунок

1. Як видно з попередніх розрахунків, для забезпечення міцності плити на пробій без армування можливо при використанні фібробетону класу не нижче  $C70$ . Визначимо необхідне армування для важкого бетону класу  $C30$ , так як виробничі потужності заводу обмежені саме ним.

Приймемо армування у три ряди із зміщенням  $\varnothing 16 A500$  ( $A_{s1} = 2,27 \text{ см}^2$ ) з кроком 150 мм.

4. Визначимо приведену міцність важкого бетону. Розрахунок виконаємо на  $l/m/n$  (див. рис. 3.2).

$$\mu_{xy} = \frac{n_x A_{sx} l_x + n_y A_{sy} l_y}{A_{ef} s} = \frac{20 \times 2,27 \times 300 + 20 \times 2,27 \times 300}{300 \times 300 \times 8} = 0,039;$$



$$\psi = \frac{\mu_{xy} f_{s,xy}}{f_{fck,prism} + 10} = \frac{0,039 \times 435}{22,0 + 10} = 0,53;$$

$$\varphi = \frac{1}{0,23 + \psi} = \frac{1}{0,23 + 0,53} = 1,316;$$

$$f_{c,red} = f_{fck,prism} + \varphi \mu_{xy} f_{s,xy} = 22,0 + 1,316 \times 0,039 \times 435 = 44,32 \text{ МПа.}$$

5. Встановлюємо значення коефіцієнту піддатливості проникненню за виразом (1.8)

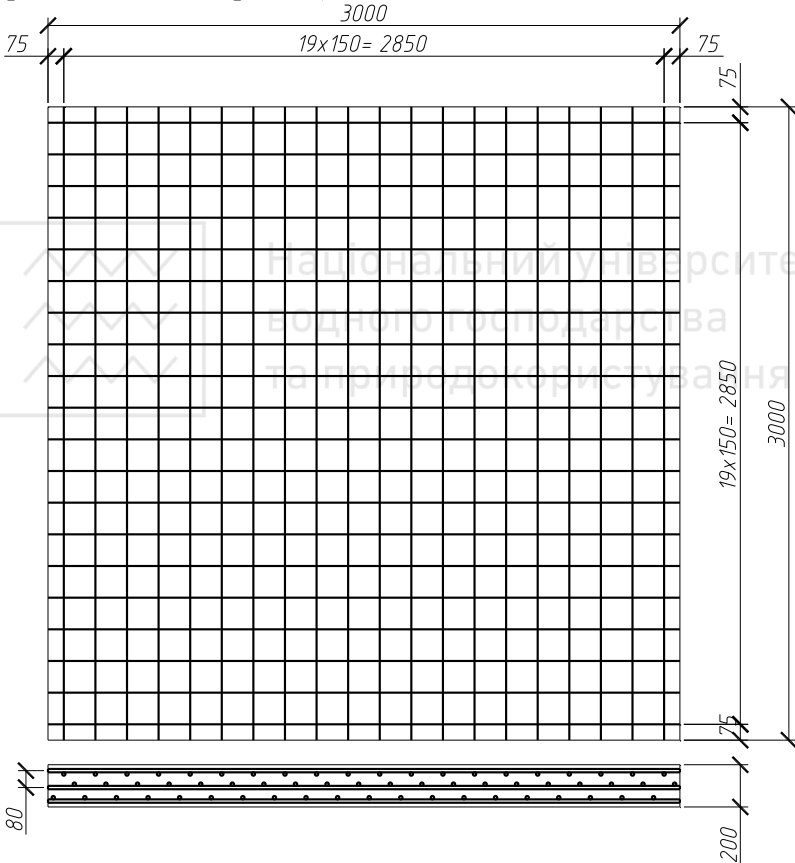


Рис. 3.2. До визначення коефіцієнту проникнення армованого важкого бетону до прикладу 1



$$k_{np} = (13,37 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (13,37 - 0,05 \times 44,32) \times 10^{-7} = 11,154 \times 10^{-7}.$$

6. Встановлюємо глибину проникнення пулі у захисне покриття

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c = 0,640 \times 11,154 \times 10^{-7} \frac{0,0482}{0,0127^2} 840 = 0,179 \text{ м.}$$

7. Визначимо динамічні характеристики. Прийємо лінійну залежність зміни швидкості від глибини проникнення, тоді час дії навантаження буде визначатися за виразом (1.12)

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_c} = \frac{2 \times 0,179}{840} = 4,26 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}.$$

8. Граничні деформації бетону попередньо прийємо за табл. А.1  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cul} = 350 \times 10^{-5}$ ;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau} = \frac{35 \times 10^{-4}}{4,26 \times 10^{-4}} = 8,22 \text{ с}^{-1}.$$

9. Так як  $\dot{\varepsilon} = 8,22 \text{ с}^{-1}$ , то коефіцієнт динамічного зміцнення, визначимо за другим виразом системи (1.14)

$$DEF_c = \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} = \left( \frac{8,22}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1,026 \times 0,04} = 1,68,$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9 f_{fck,prism} / f_{c0}} = \frac{1}{5 + 9 \times 22,0 / 10} = 0,040;$$

$$\varepsilon_{cul,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{1,68} = 208,3 \times 10^{-5}.$$

Визначимо похибку

$$\Delta = \frac{350 - 208,3}{208,3} 100\% = 68\%.$$

Прийємо значення  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cul,d} = 208,3 \times 10^{-5}$ , та встановимо нові динамічні параметри

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{20,83 \times 10^{-4}}{4,26 \times 10^{-4}} = 4,89 \text{ с}^{-1}; DEF_c = \left( \frac{4,89}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0414} = 1,64.$$



$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{1,64} = 213,4 \times 10^{-5}.$$

$$\text{Похибка } \Delta = \frac{213,4 - 208,83}{213,4} 100\% = 2,14\%.$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

Визначимо динамічні характеристики сталевібробетону:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,64^{2/3} = 1,39;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,64 \times 17 = 27,88 \text{ МПа}.$$

Приймемо значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. А.1 для С30  $f_{ct} = 1,15 \text{ МПа}$ ;

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,39 \times 1,15 = 1,60 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 32500 \times 1,64^2 = 87412 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{210 \times 10^{-5}}{1,64} = 128 \times 10^{-5}.$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{9,6 \times 10^{-5}}{1,39} = 6,91 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{13,87 \times 10^{-5}}{1,39} = 9,99 \times 10^{-5}.$$

10. Визначимо коефіцієнт зміцнення арматурної сталі для А500

$DEF_s = 1 + 0,75 \varepsilon = 1 + 0,75 \times 4,89 = 4,67 \leq 1,15$  (за графіком рис. 1).

Остаточно приймаємо  $DEF_s = 1,15$ .

11. Динамічний опір арматури  $f_{y,d} = f_y \times DEF_s = 435 \times 1,15 = 500,25 \text{ МПа}$ .

12. Розрахуємо граничну кривину та згинаючий момент на основі нелінійної деформаційної моделі у розробленому програмному комплексі (рис. 3.3).

13. Обчислюємо кривизну при граничному значенні згинального моменту

$$\frac{1}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{178 \times 10^{-5}}{0,0328} = 0,0542 \text{ м}^{-1}.$$



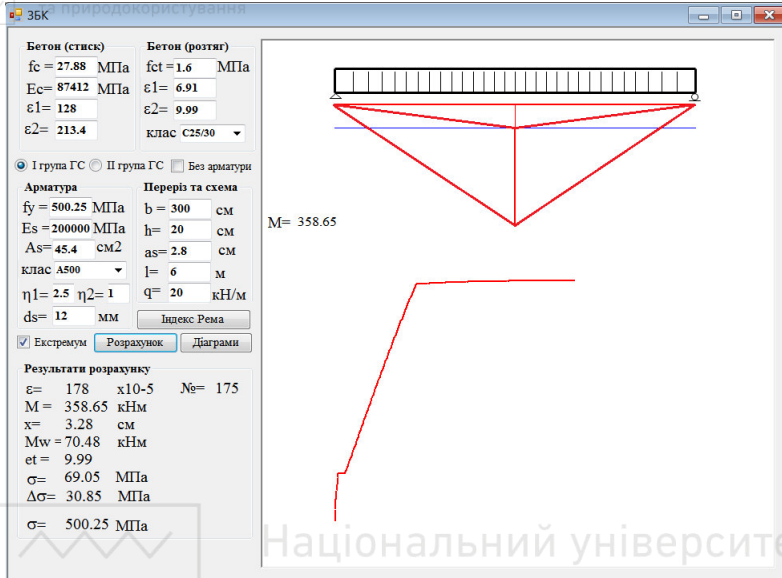


Рис. 3.3. Розрахунок залізобетонної плити із важкого бетону на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 1

14. Перевіримо умову міцності (1.23)

$$m_v^2 = 0,0482 \times 840^2 = 34010 \text{ Дж} = 34,01 \text{ кНм};$$

$$\frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = \frac{1}{3} 358,65 \times 0,0542 \times 3 = 19,44 \text{ кНм};$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 358,65}{3} \times 0,179 = 85,6 \text{ кНм}.$$

У даному випадку вплив внутрішньої потенційної енергії додаткового прогину складає 22,7%, також завдяки великій довжині прольоту та незначній товщині плити.

Так як

$$m_v^2 = 34,01 \text{ кНм} < \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = 34,01 + 85,6 = 119,61 \text{ кНм},$$

міцність плити забезпечена.

Таким чином, для забезпечення захисної надійності блоку посту при дії на нього зброї заданих параметрів, необхідно



використати важкий бетон класу  $C30$ , з такими характеристиками:

$$f_{fck,prism} = 22 \text{ МПа}, f_{fc} = 17 \text{ МПа}, f_{ct} = 1,2 \text{ МПа}.$$

Провівши розрахунки плит на заданий тип зброї отримали такі результати:

- блок пост можна виготовити із фібробетону класу  $C70$  без поздовжнього армування, або з важкого бетону  $C30$  з поздовжнім армуванням у три ряди із зміщенням  $\varnothing 16 A500$  ( $A_{st}=2,27 \text{ см}^2$ ) з кроком 150 мм

- глибина проникнення у захисну плиту при фібробетоні  $C70$  складає 145 мм, при важкому бетоні  $C30$  із визначеним поздовжнім армуванням у три ряди із зміщенням  $\varnothing 16 A500$  ( $A_{st}=2,27 \text{ см}^2$ ) з кроком 150 мм складає 179 мм, при цьому міцність на згин для фібробетону складає 59,49 кНм, для важкого бетону  $C30$  з армуванням 119,61 кНм.

#### Б) Підбір складу важкого бетону

Вихідні матеріали: портландцемент із активністю  $R_c = 50$  МПа, його густина  $\rho_c = 3,1$  кг/л. Густина кварцового піску  $\rho_n = 2,65$  кг/л, модуль крупності дорівнює  $M_k = 2$ , густина гранітного щебеню  $\rho_{ш} = 2,68$  кг/л. Рухомість бетонної суміші ОК=10-15 см (марка за легкоукладальністю Р3). Найбільша крупність заповнювача становить 20 мм, насипна густина  $\rho_{нас} = 1,48$  кг/л.

1. Встановлюємо необхідну середню міцність бетону за формулою (2.3):

$$f_{cm} = \frac{30}{0,778} = 38,6 \text{ МПа}. \text{ Приймаємо } f_{cm} = 40 \text{ МПа}.$$

2. Водоцементне відношення визначаємо за формулою (2.6) для рядових заповнювачів ( $A=0,6$ ).

$$\frac{B}{C} = \frac{0,6 \cdot 50}{40 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 50} = 0,55.$$

3. Витрата води –  $B = 220$  л/м<sup>3</sup> (за табл. Б.25).

4. Визначаємо витрату цементу, кг/м<sup>3</sup>:

$$C = \frac{220}{0,55} = 400.$$

5. Вираховуємо пустотність крупного заповнювача:



$$P_{ц} = 1 - \frac{1,48}{2,68} = 0,45.$$

6. Коefіцієнт розсунення зерен  $\alpha = 1,455$  (за табл. Б.30).  
Визначаємо витрату щебеню за формулою (2.23),  $\text{кг/м}^3$ :

$$Щ = \frac{1000}{\frac{0,45 \cdot 1,455}{1,48} + \frac{1}{2,68}} = 1226.$$

7. Визначаємо витрату піску,  $\text{кг/м}^3$ :

$$П = \left[ 1000 - \left( \frac{400}{3,1} + \frac{1226}{2,68} + 220 \right) \right] \cdot 2,65 = 513.$$

Розрахунковий номінальний склад бетону,  $\text{кг/м}^3$ :  $Ц = 400$ ;  
 $П = 513$ ;  $Щ = 1226$ ;  $В = 220$ .

**Приклад 2.** За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт  $l_0 = 2,0$  м, висота  $H = 2,0$  м. За захисними властивостями блокпост повинен витримувати пряме попадання від снаряду БМП-2 (ОФЗ), який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 30 мм, вагу  $m = 390$  г, початкова швидкість  $v_c = 960$  м/с, висота головної частини патрону  $H_z = 45,4$  мм.

**Необхідно:**

А). Визначити товщину неармованого захисного покриття блокпосту з дрібнозернистого фібробетону класу на стиск С80.

Б) Підібрати склад дрібнозернистого фібробетону С80 із визначеними характеристиками. До бетону також пред'являються наступні вимоги: водонепроникність W6, морозостійкість не нижче F150.

**Розв'язок.**

А) Конструктивний розрахунок.

1. За табл. А.1 встановлюємо, що дрібнозернистий фібробетон класу С80 має призмову міцність на стиск  $f_{fck, prism} = 57$  МПа.

2. Визначаємо необхідний коефіцієнт піддатливості проникненню, за формулою (1.10).



$$k_{np} = (11,55 - 0,05f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (11,55 - 0,05 \times 57) \times 10^{-7} = 8,7 \times 10^{-7}.$$

3. Знаходимо допоміжні параметри, за виразами (1.1), (1.2), (1.3)

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,4\sqrt[3]{\left(\frac{H_e}{d}\right)^2} = 0,5 + 0,4\sqrt[3]{\left(\frac{45,4}{30}\right)^2} = 1,027;$$

$$\lambda_2 = 2,8\sqrt[3]{d} - 1,3\sqrt{d} = 2,8\sqrt[3]{0,030} - 1,3\sqrt{0,030} = 0,645;$$

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 = 1,027 \times 0,645 = 0,662.$$

4. Визначаємо необхідно товщину захисного покриття з умови проникнення снаряду на всю її глибину (1.11)

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c = 0,662 \times 8,7 \times 10^{-7} \frac{0,390}{0,030^2} 960 = 0,240 \text{ м.}$$

5. Встановлюємо час дії навантаження за формулою (1.12)

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_c} = \frac{2 \times 0,240}{960} = 5,0 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}.$$

6. Граничні деформації бетону попередньо прийемо за табл. А.1  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1} = 280 \times 10^{-5}$ ;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau} = \frac{28 \times 10^{-4}}{5,0 \times 10^{-4}} = 5,6 \text{ с}^{-1}.$$

7. Так як  $\dot{\varepsilon} = 5,6 \text{ с}^{-1}$ , то коефіцієнт динамічного зміцнення, визначимо за другим виразом системи (1.14)

$$DEF_c = \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} = \left( \frac{5,6}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1,026 \times 0,0178} = 1,25,$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_{fck,prism} / f_{c0}} = \frac{1}{5 + 9 \times 57 / 10} = 0,0178;$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{280 \times 10^{-5}}{1,25} = 224 \times 10^{-5}.$$

Визначимо похибку:

$$\Delta = \frac{280 - 224}{224} 100\% = 25\%.$$



Прийmemo значення  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1,d} = 224 \times 10^{-5}$ , та встановимо нові динамічні параметри:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{22,4 \times 10^{-4}}{5,0 \times 10^{-4}} = 4,48 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left( \frac{4,48}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0183} = 1,24;$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{280 \times 10^{-5}}{1,24} = 226 \times 10^{-5};$$

$$\Delta = \frac{226 - 224}{224} 100\% = 0,89\%.$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

Визначимо динамічні характеристики фібробетону:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,24^{2/3} = 1,15;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,24 \times 41 = 50,84 \text{ МПа}.$$

Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг, згідно табл. А.1 для С80  $f_{ct} = 4,2 \text{ МПа}$ ;

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,15 \times 4,2 = 4,83 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 42000 \times 1,24^2 = 52080 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF_c} = \frac{270 \times 10^{-5}}{1,24} = 218 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{667 \times 10^{-5}}{1,15} = 580 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{1000 \times 10^{-5}}{1,15} = 870 \times 10^{-5}.$$

8. Розрахуємо граничну кривину та згинаючий момент на основі нелінійної деформаційної моделі у розробленому програмному комплексі (рис. 3.4).

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{155,2 \times 10^{-5}}{0,0329} = 0,047 \text{ м}^{-1}.$$

$$M_{ult} = 245,42 \text{ кНм}.$$

9. Перевіримо умову міцності (1.23):

$$mv^2 = 0,390 \times 960^2 = 359424 \text{ Дж} = 359,4 \text{ кНм};$$

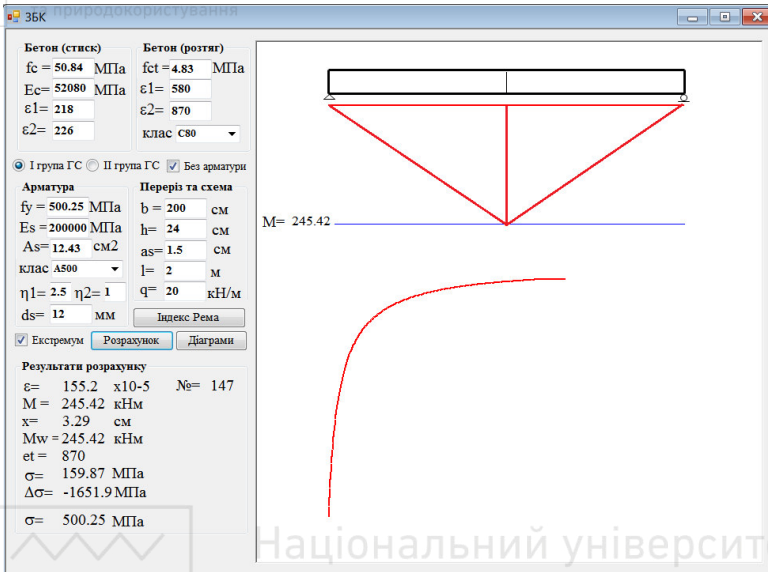


Рис. 3.4. Розрахунок залізобетонної плити товщиною 24 см із фібробетону С80 з урахуванням коефіцієнтів динамічного зміцнення на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 2

$$\frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} \quad l = \frac{1}{3} 245,42 \times 0,0542 \times 2 = 8,87 \text{ кНм};$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 245,42}{2} \times 0,240 = 117,8 \text{ кНм}.$$

Так як

$$mv^2 = 359,4 \text{ кНм} > \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} = 8,87 + 117,8 = 126,7 \text{ кНм},$$

міцність плити незабезпечена.

Із умови пропорційності знайдемо наближене значення товщини плити:

$$h_{np2} = \sqrt{\frac{mv^2}{\frac{4M_{ult}}{l} h_{np}}} h_{np1} = \sqrt{\frac{359,4}{117,8} \times 0,240^2} = 0,42 \text{ м}.$$



10. Розрахуємо граничну кривину та згинаючий момент на основі нелінійної деформаційної моделі у розробленому програмному комплексі (рис. 3.5):

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{155,2 \times 10^{-5}}{0,0576} = 0,027 \text{ м}^{-1}.$$

$$M_{ult} = 751,61 \text{ кНм}.$$

11. Перевіримо умову міцності (1.23):

$$\frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = \frac{1}{3} 751,61 \times 0,027 \times 2 = 13,53 \text{ кНм};$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 751,61}{2} \times 0,240 = 360,77 \text{ кНм}.$$

Так як

$$mv^2 = 359,4 \text{ кНм} < \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = 360,77 + 13,53 = 374,3 \text{ кНм},$$

то міцність плити забезпечена, при товщині плити 42 см.

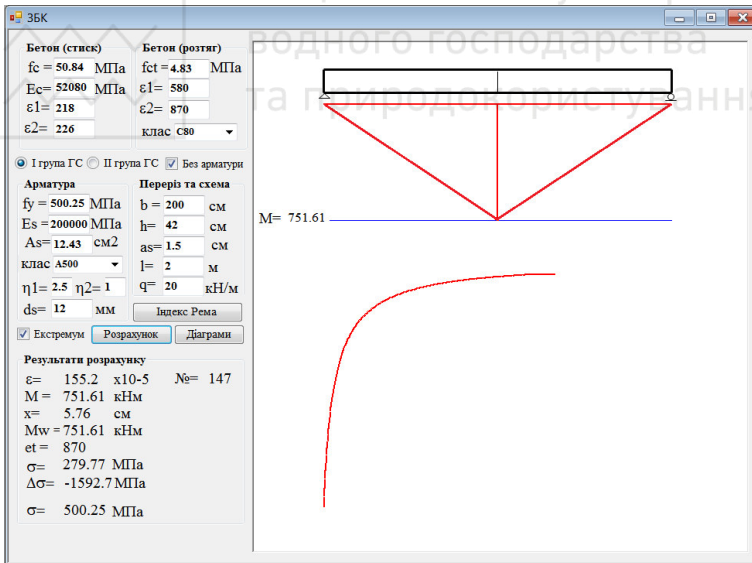


Рис. 3.5. Розрахунок залізобетонної плити товщиною 42 см із важкого бетону з урахуванням коефіцієнтів динамічного зміцнення на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 2



Для забезпечення захисної надійності блокпосту при дії на нього зброї заданих параметрів, необхідно використати дрібнозернистий фібробетон класу С80, з такими характеристиками:

$$f_{fck,prism} = 57 \text{ МПа}, f_{fc} = 41 \text{ МПа}, f_{ct} = 4,2 \text{ МПа}.$$

Б). Підбір складу дрібнозернистого фібробетону

Для проектування складу складу дрібнозернистого сталевібробетону додатково приймаємо наступні умови:

- рухомість бетонної суміші 15 см;
- характеристики сировинних матеріалів:
- фібра: сталева хвилястого профілю ( $L = 60$  мм,  $d = 1$  мм);
- портландцемент з активністю 50 МПа;
- дрібний заповнювач з модулем крупності  $M_k = 3,5$  високої якості та дійсною густиною  $\rho_n = 2,65$  кг/л;
- добавка Melflux 2651 f (0,6% від цементу).

1. Розраховуємо необхідну середню міцність бетону при стиску у віці 28 діб, що забезпечує клас бетону С80 (при нормативному коефіцієнті варіації 13,5%). З цією метою використовуємо відому формулу:

$$f_{cm}^{28} = C / \left( 1 - 1,64 \cdot \frac{C_v}{100} \right),$$

де  $C_v$  – коефіцієнт варіації, %.

$$f_{cm}^{28} = 80 / (1 - 1,64 \cdot 0,135) = 102,8 \text{ МПа}.$$

2. Проводимо перевірку чи буде забезпечена задана морозостійкість бетону (F150). Для цього за формулою (2.10) розраховуємо об'єм втягнутого повітря,  $V_{n.g}$ , що забезпечує при заданій міцності марку за морозостійкістю. За табл. Б.40 вибираємо коефіцієнти  $A_1$ ,  $A_2$  з врахуванням рухомості бетонної суміші (ОК=15 см):

$$V_{n.g} = \frac{\ln\left(\frac{F}{0,34 \cdot f_{cm}^{1,68}}\right)}{0,35} = \frac{\ln\left(\frac{150}{0,34 \cdot 102,8^{1,68}}\right)}{0,35} = 0.$$





Отриманий результат свідчить, що при даній міцності задана морозостійкість (F150) забезпечується без додаткового залучення повітря до бетонної суміші.

3. Для перевірки вимоги за водонепроникністю ( $W_6$ ) за табл. Б.21 знаходимо необхідний розрахунковий коефіцієнт фільтрації ( $K_{\phi}$ ). Він становить  $5 \cdot 10^{-11}$  см/с. За табл. Б.19, формула (10) знаходимо міцність якій має відповідати розрахунковий коефіцієнт фільтрації ( $K_{\phi}$ ).

$$f_{cm} = \left( \frac{5 \cdot 10^{-11}}{126} \right)^{-0,13} = 40,9 \text{ МПа.}$$

Таким чином, при заданій міцності при стиску 102,8 МПа необхідна водонепроникність забезпечується.

4. За формулою (2.25) з врахуванням коефіцієнтів  $A = 0,52$  і  $b = 0,65$  (табл. Б.31) та  $k=1,2$  (для добавки Melflux 2651 f при витраті 0,6%):

$$B/C = 1,2 \cdot 0,52 \cdot 50 / (102,8 + 0,65 \cdot 0,52 \cdot 50) = 0,26.$$

5. За табл. Б.39 встановлюємо орієнтовне значення витрати води ( $B_0$ ).  $B_0 = 260$  л/м<sup>3</sup>. Враховуючи поправку на використання добавки (табл. Б.27) знаходимо витрату води:

$$B' = B_0 \cdot K_d = 260 \cdot 0,64 = 166,4 \text{ л/м}^3.$$

6. Початкова витрата цементу (2.35):

$$C_o = 166,4 / 0,26 = 639 \text{ кг/м}^3.$$

6. Об'єм затисненого повітря (2.30):

$$V_{z,n} = -6,52 \cdot \ln(15+1) + 19,9 = 1,8 \text{ л.}$$

7. Витрата заповнювача (2.36):

$$Z = (1000 - 1,8 - 639 / 3,1 - 166,4) \cdot 2,65 = 1658 \text{ кг/м}^3.$$

8. Для визначення кількості фібри, що забезпечить необхідну міцність сталевібробетону на розтяг за даними формули (1а) табл. Б.18 та з врахуванням коефіцієнту надійності  $\gamma_{fbt} = 1,5$  (для першої групи граничних станів за несучою здатністю) переходимо від міцності при осьовому розтязі до міцності при згині:

$$f_{ctf} = 1,74 \cdot \gamma_{fbt} \cdot f_{ct} = 1,74 \cdot 1,5 \cdot 4,2 = 11 \text{ МПа.}$$



9. За номограмою (рис. Б.7) знаходимо, що при значенні  $V/C=0,26$  міцність сталевібробетону на розтяг при згині буде забезпечена при витраті фібри  $\Phi=70 \text{ кг/м}^3$ .

10. Враховуємо поправку, % на витрату води при введенні фібри (2.38):

$$V_{\Phi} = (-0,003 \cdot 70 - 0,0778) \cdot 15 + 0,0656 \cdot 70 + 0,6875 = 1,0\%.$$

11. Уточнене значення витрати води:  $V = V' + V' \cdot V_{\Phi}/100 = 166,4 + 166,4 \cdot 1,0/100 = 168 \text{ л}$ .

8. Уточнене значення витрати цементу:

$$C = \frac{V}{V/C} = \frac{168}{0,26} = 645 \text{ кг}.$$

9. Уточнене значення витрати дрібного заповнювача визначаємо за методом абсолютних об'ємів (2.36):

$$P = \left( 1000 - 1,8 - \left( \frac{645}{3,1} + \frac{70}{7,85} + \frac{168}{1} \right) \right) \cdot 2,65 = 1625 \text{ кг}.$$

Даним значенням поправки можна нехтувати, тому корегувати витрату води, цементу та заповнювача немає потреби.

Розрахунковий склад фібробетонної суміші,  $\text{кг/м}^3$ :

$$C = 645; V = 168; P = 1625; \Phi = 70; \text{Melflux 2651f} = 3,87.$$

**Приклад 3.** За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт  $l_0=3,2 \text{ м}$ , висота  $H=2,0 \text{ м}$ . Блокпост виконаний із блоків марки M200 (C15) на розчині M200 (C15) товщиною 400 мм. За захисними властивостями блокпост повинен витримувати пряме попадання від снаряду БМП-2 (ОФЗ), який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 30 мм, вагу  $m=390 \text{ г}$ , початкова швидкість  $v_c=960 \text{ м/с}$ , висота головної частини патрону  $H_c=45,4 \text{ мм}$ .

**Необхідно:**

А). Визначити товщину неармованого фібробетону С60, необхідну для посилення блокпосту з метою забезпечення його захисних функцій.

Б). Підібрати склад фібробетону із визначеними характеристиками. До фібробетону також пред'являються наступні вимоги: морозостійкість не нижче F150.



### Розв'язок.

А) Конструктивний розрахунок.

1. За табл. А.1 встановлюємо, що важкий бетон класу C15 має призмову міцність на стиск  $f_{fck,prism} = 11 \text{ МПа}$ .

2. Визначаємо необхідний коефіцієнт піддатливості проникненню, за формулою (1.8).

$$k_{np} = (13,37 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (13,37 - 0,05 \times 11) \times 10^{-7} = 12,82 \times 10^{-7};$$

3. Визначимо швидкість снаряду при з умови проникнення його на глибину захисної товщі фундаментного блоку із виразу (1.49)

$$v_{chl} = \frac{h_1 d^2}{\lambda k_{np} m} = \frac{0,400 \times 0,030^2}{0,662 \times 12,82 \times 10^{-7} \times 0,390} = 1088 \text{ м/с} > 960 \text{ м/с};$$

де

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,43 \sqrt{\left(\frac{H_c}{d}\right)^2} = 0,5 + 0,43 \sqrt{\left(\frac{45,4}{30}\right)^2} = 1,027;$$

$$\lambda_2 = 2,83\sqrt{d} - 1,3\sqrt{d} = 2,83\sqrt{0,030} - 1,3\sqrt{0,030} = 0,645;$$

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 = 1,027 \times 0,645 = 0,662.$$

4. Перевіримо загальну міцність захисної товщі. Для цього встановимо глибину проникнення снаряду за виразом (1.11)

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c = 0,662 \times 12,82 \times 10^{-7} \frac{0,390}{0,030^2} 960 = 0,353 \text{ м}.$$

5. Встановлюємо час дії навантаження (1.12)

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_c} = \frac{2 \times 0,353}{960} = 7,35 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}.$$

6. Граничні деформації бетону попередньо прийемо за табл. А.1  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1} = 350 \times 10^{-5}$ ;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau} = \frac{35 \times 10^{-4}}{7,35 \times 10^{-4}} = 4,76 \text{ с}^{-1}.$$

7. Так як  $\dot{\varepsilon} = 4,76 \text{ с}^{-1}$ , то коефіцієнт динамічного зміцнення, визначимо за другим виразом системи (1.14)



$$DEF_c = \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} = \left( \frac{4,76}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1,026 \times 0,067} = 2,28,$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_{fck,prism} / f_{c0}} = \frac{1}{5 + 9 \times 11 / 10} = 0,067;$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{2,28} = 154 \times 10^{-5}.$$

Визначимо похибку

$$\Delta = \frac{350 - 154}{154} 100\% = 127\%.$$

Прийmemo значення  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1,d} = 154 \times 10^{-5}$ , та встановимо нові динамічні параметри

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{15,4 \times 10^{-4}}{7,35 \times 10^{-4}} = 2,1 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left( \frac{2,1}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0687} = 2,15.$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{2,15} = 163 \times 10^{-5}.$$

$$\Delta = \frac{163 - 154}{163} 100\% = 5,52\%.$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

8. Визначимо динамічні характеристики важкого бетону:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 2,15^{2/3} = 1,67;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 2,15 \times 8,5 = 18,3 \text{ МПа}.$$

Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. А.1 для C15  $f_{ct} = 1,1 \text{ МПа}$ ;

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,67 \times 1,1 = 1,84 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 23000 \times 2,15^2 = 106318 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF_c} = \frac{180 \times 10^{-5}}{2,15} = 84 \times 10^{-5}.$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{9 \times 10^{-5}}{1,67} = 5,4 \times 10^{-5};$$

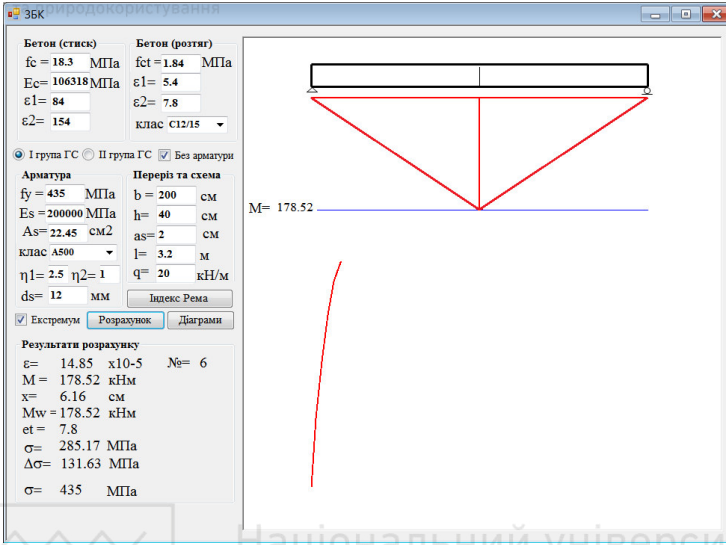


Рис. 3.6. Розрахунок стіни із блоків виконаних з важкого бетону товщиною 40 см з урахуванням коефіцієнтів динамічного зміцнення на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 3

$$\epsilon_{ctu} = \frac{\epsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{13 \times 10^{-5}}{1,67} = 7,8 \times 10^{-5}.$$

9. Розрахуємо граничну кривину та згинаючий момент на основі нелінійної деформаційної моделі у розробленому програмному комплексі (рис. 3.6).

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\epsilon_{cu}}{x} = \frac{14,85 \times 10^{-5}}{0,0616} = 0,0024 \text{ м}^{-1}.$$

$$M_{ult} = 178,52 \text{ кНм}.$$

10. Перевіримо умову міцності (1.23)

$$m v^2 = 0,390 \times 960^2 = 359424 \text{ Дж} = 359,4 \text{ кНм};$$

$$\frac{l}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = \frac{l}{3} 178,52 \times 0,0024 \times 3,2 = 0,46 \text{ кНм};$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 178,52}{3,2} \times 0,353 = 78,77 \text{ кНм}.$$



Так як

$$mv^2 = 359,4 \text{ кНм} > \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} = 78,77 + 0,46 = 79,23 \text{ кНм},$$

міцність плити не забезпечена.

11. За табл. А.1 встановлюємо, що дрібнозернистий фібробетон класу С60 має призмову міцність на стиск  $f_{fck,prism} = 43 \text{ МПа}$ .

12. Визначаємо необхідний коефіцієнт піддатливості проникненню, за формулою (1.10).

$$k_{np} = (11,55 - 0,05f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (11,55 - 0,05 \times 43) \times 10^{-7} = 9,4 \times 10^{-7}.$$

13. Визначаємо необхідно товщину захисного покриття з умови проникнення снаряду на всю її глибину (1.11)

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c = 0,662 \times 9,4 \times 10^{-7} \frac{0,390}{0,030^2} 960 = 0,259 \text{ м}.$$

14. Встановлюємо час дії навантаження за виразом (1.12)

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_c} = \frac{2 \times 0,259}{960} = 5,4 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}.$$

15. Граничні деформації бетону попередньо прийемо за табл. А.1  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1} = 320 \times 10^{-5}$ ;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau} = \frac{32 \times 10^{-4}}{5,4 \times 10^{-4}} = 5,93 \text{ с}^{-1}.$$

16. Так як  $\dot{\varepsilon} = 5,93 \text{ с}^{-1}$ , то коефіцієнт динамічного зміцнення, визначимо за другим виразом системи (1.14)

$$DEF_c = \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} = \left( \frac{5,93}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1,026 \times 0,0229} = 1,33,$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_{fck,prism} / f_{c0}} = \frac{1}{5 + 9 \times 43 / 10} = 0,0229;$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{320 \times 10^{-5}}{1,33} = 241 \times 10^{-5}.$$

Визначимо похибку



$$\Delta = \frac{320 - 241}{241} 100\% = 32,8\%.$$

Прийmemo значення  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cul,d} = 241 \times 10^{-5}$ , та встановимо нові динамічні параметри

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{24,1 \times 10^{-4}}{5,4 \times 10^{-4}} = 4,46 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left( \frac{4,46}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0235} = 1,32.$$

$$\varepsilon_{cul,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{320 \times 10^{-5}}{1,32} = 242 \times 10^{-5}.$$

$$\Delta = \frac{242 - 241}{242} 100\% = 0,41\%.$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

17. Визначимо динамічні характеристики фібробетону:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,32^{2/3} = 1,20;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,20 \times 33 = 39,6 \text{ МПа}.$$

Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. А.1 для С60  $f_{ct} = 2,75 \text{ МПа}$ ;

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,20 \times 2,75 = 3,3 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 40000 \times 1,20^2 = 57600 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c} = \frac{250 \times 10^{-5}}{1,32} = 189 \times 10^{-5}.$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{667 \times 10^{-5}}{1,20} = 556 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{1000 \times 10^{-5}}{1,20} = 833 \times 10^{-5}.$$

18. Визначимо нові динамічні параметри для бетону C15

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{35 \times 10^{-4}}{5,4 \times 10^{-4}} = 6,48 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left( \frac{6,48}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0687} = 2,33.$$

$$\varepsilon_{cul,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{2,33} = 150 \times 10^{-5}. \Delta = \frac{350 - 150}{150} 100\% = 133,3\%.$$

Уточнимо значення коефіцієнта динамічного зміцнення



$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{15 \times 10^{-4}}{5,4 \times 10^{-4}} = 2,78 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left( \frac{2,78}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0687} = 2,19.$$

$$\varepsilon_{cul,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{2,19} = 160 \times 10^{-5}. \Delta = \frac{160 - 150}{160} 100\% = 6,25 \%$$

Знову уточнимо коефіцієнт динамічного змiцнення

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{16 \times 10^{-4}}{5,4 \times 10^{-4}} = 2,96 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left( \frac{2,96}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0687} = 2,20.$$

$$\varepsilon_{cul,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{2,2} = 159 \times 10^{-5}. \Delta = \frac{160 - 159}{159} 100\% = 0,63 \%$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

19. Визначимо динамічні характеристики важкого бетону класу C15:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 2,20^{2/3} = 1,69;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 2,2 \times 8,5 = 18,7 \text{ МПа}.$$

Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. А.1 для C15  $f_{ct} = 1,1 \text{ МПа}$ ;

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,69 \times 1,1 = 1,86 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 23000 \times 2,20^2 = 111320 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c} = \frac{180 \times 10^{-5}}{2,20} = 82 \times 10^{-5}.$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{9 \times 10^{-5}}{1,69} = 5,3 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{13 \times 10^{-5}}{1,69} = 7,7 \times 10^{-5}.$$

20. Розрахуємо граничну кривину та згинаючий момент на основі нелінійної деформаційної моделі у розробленому програмному комплексі (рис. 3.7, рис. 3.8):

- для фібробетону C60

$$\frac{l}{r_{ultC60}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{128 \times 10^{-5}}{0,0309} = 0,041 \text{ м}^{-1}.$$

$$M_{ultC60} = 200,34 \text{ кНм}.$$



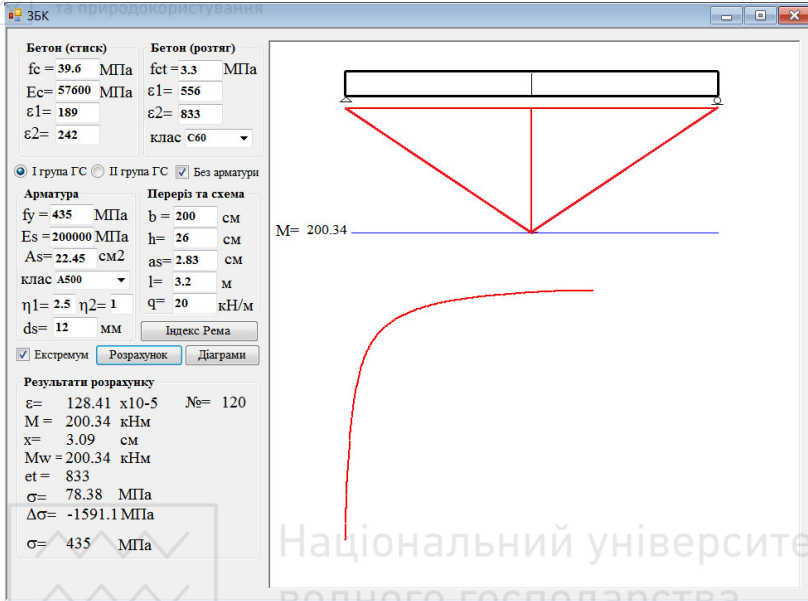


Рис. 3.7. Розрахунок граничної кривини та згинаючого моменту плити з фібробетону C60 на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 3

- для важкого бетону C15

$$M_{ultC15} = 181,4 \text{ кНм.}$$

Будемо вважати, що зчеплення між фібробетоном посилення та блоками відсутнє. Тоді загальна міцність конструкції захисної стіни буде складатись із суми

$$M_{ult} = M_{ultC60} + M_{ultC15} = 200,34 + 181,4 = 381,74 \text{ кНм.}$$

21. Перевіримо умову міцності (1.56)

$$\frac{1}{3} M_{ultC60} \frac{1}{r_{ultC60}} \quad l = \frac{1}{3} 200,34 \times 0,041 \times 3,2 = 8,76 \text{ кНм;}$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 381,74}{3,2} \times 0,259 = 123,6 \text{ кНм.}$$

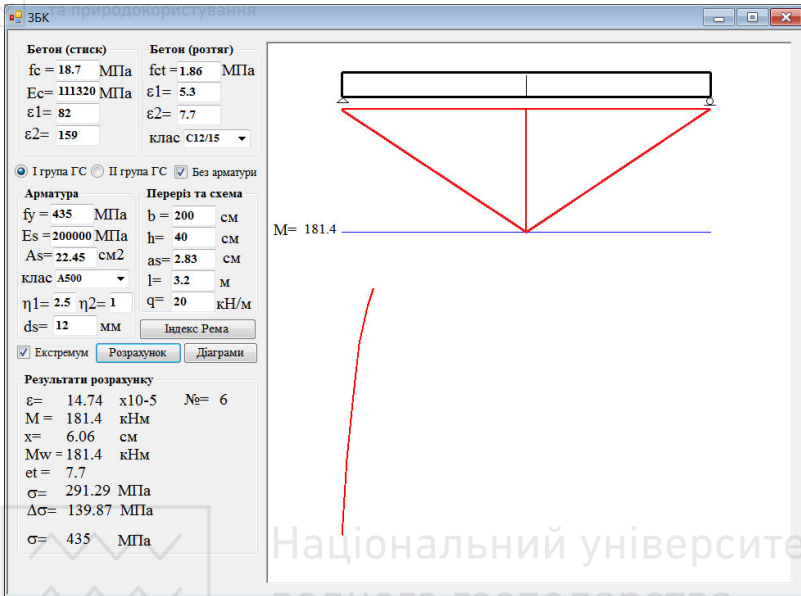


Рис. 3.8. Розрахунок згинаючого моменту стіни з блоків із важкого бетону C15 на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 3

Так як

$$mv^2 = 359,4 \text{ кНм} > \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ultC60} \frac{l}{r_{ultC60}} = 123,6 + 8,76 = 132,36 \text{ кНм},$$

міцність плити не забезпечена.

Встановимо наближено необхідну несучу здатність конструкції захисного покриття, знехтувавши додатковим потенціальною енергією прогину

$$M_{ult} = \frac{mv^2}{4h_{np}} l = \frac{359,4}{4 \times 0,259} 3,2 = 1110 \text{ кНм}.$$

Тоді необхідна несуча здатність

$$M_{ultC60,2} = M_{ult} - M_{ultC15} = 1110 - 181,4 = 928,6 \text{ кНм}.$$

Із умови пропорційності знайдемо наближене значення товщини плити



$$h_{np2} = \sqrt{\frac{M_{ultC60,2}}{M_{ultC60}}} h_{np1} = \sqrt{\frac{928,6}{200,34}} \times 0,260 = 0,56 \text{ м.}$$

22. Знову визначимо граничну кривину та згинаючий момент на основі нелінійної деформаційної моделі для фібробетону C60 (рис. 3.9)

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{128,41 \times 10^{-5}}{0,0665} = 0,0193 \text{ м}^{-1}.$$

$$M_{ultC60,2} = 929,39 \text{ кНм.}$$

$$M_{ult} = M_{ultC60,2} + M_{ultC15} = 929,39 + 181,4 = 1110,79 \text{ кНм.}$$

Перевіримо умову міцності (1.56)

$$\frac{1}{3} M_{ultC60} \frac{l}{r_{ultC60}} = \frac{1}{3} 929,39 \times 0,0193 \times 3,2 = 19,13 \text{ кНм;}$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 1110,79}{3,2} \times 0,259 = 359,6 \text{ кНм.}$$

Так як

$$mv^2 = 359,6 \text{ кНм} < \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ultC60} \frac{l}{r_{ultC60}} = 359,6 + 19,13 = 378,73 \text{ кНм,}$$

міцність плити забезпечена.

Для забезпечення захисної надійності блок посту при дії на нього зброї заданих параметрів, необхідно використати посилення стіни дрібнозернистим фібробетоном класу C60 товщиною 56 см, з такими характеристиками:

$$f_{fck,prism} = 43 \text{ МПа}, f_{fc} = 33 \text{ МПа}, f_{ct} = 2,75 \text{ МПа.}$$

Б). Підбір складу дрібнозернистого фібробетону

Для проектування складу складу сталеві фібробетону приймаємо наступні умови:

- Фібробетон класу C60;  $f_{ct} = 2,75 \text{ МПа}$ .
- Рухомість бетонної суміші 15 см;
- Морозостійкість F150;
- Характеристики сировинних матеріалів:
  - фібра: сталева хвиляста (L = 60 мм, d = 1 мм),
  - портландцемент ПЦ-ІІ/А-ІІІ-500,  $R_{II} = 50 \text{ МПа}$ ,
  - дрібний заповнювач з модулем крупності  $M_k = 3,5$ , середньої якості та дійсною густиною  $\rho_p = 2,65 \text{ кг/л}$ ;
  - добавка Melflux 2651 f (0,5%).

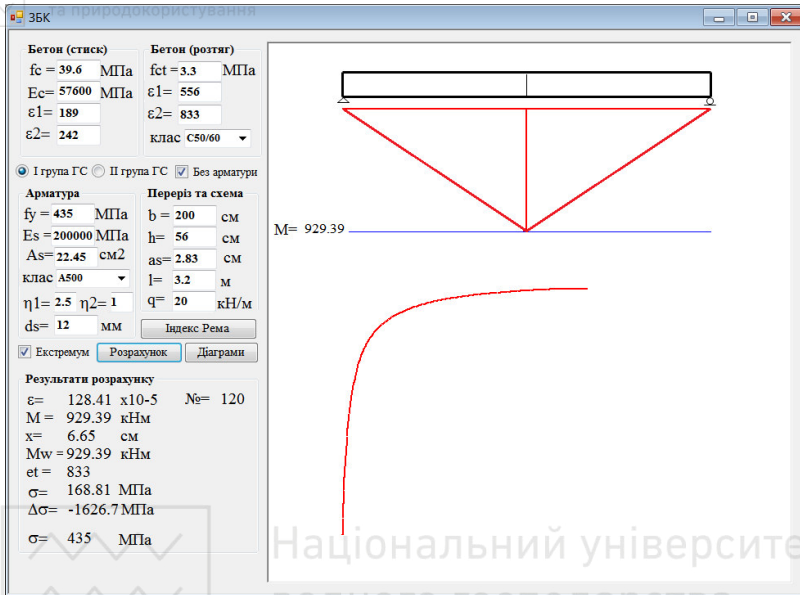


Рис. 3.9. Розрахунок граничної кривини та згинаючого моменту плити при товщині 56 см з фібробетону C60 на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 3

1. Розраховуємо необхідну середню міцність бетону при стиску у віці 28 діб, що забезпечує клас бетону C60 (при нормативному коефіцієнті варіації 13,5%). З цією метою використовуємо відому формулу:

$$f_{cm}^{28} = B / \left( 1 - 1,64 \cdot \frac{C_v}{100} \right),$$

де  $C_v$  – коефіцієнт варіації, %.

$$f_{cm}^{28} = 60 / (1 - 1,64 \cdot 0,135) = 77,1 \text{ МПа.}$$

2. Проводимо перевірку чи буде забезпечена задана морозостійкість бетону (F150). Для цього за формулою (2.10) розраховуємо об'єм втягнутого повітря,  $V_{n,e}$ , що забезпечує при заданій міцності марку за морозостійкістю. За табл. Б.40 Додаток Б вибираємо коефіцієнти  $A_1$ ,  $A_2$  з врахуванням рухомості бетонної суміші (OK=15 см):



$$V_{n.в} = \frac{\ln\left(\frac{F}{0,34 \cdot f_{cm}^{1,68}}\right)}{0,35} = \frac{\ln\left(\frac{150}{0,34 \cdot 77,1^{1,68}}\right)}{0,35} = 0.$$

Отриманий результат свідчить, що при даній міцності задана морозостійкість (F150) забезпечується без додаткового залучення повітря до бетонної суміші.

3. За формулою (2.25) з врахуванням коефіцієнтів  $A = 0,48$  і  $b = 0,65$  (табл. Б.31) та  $k=1,15$  (для добавки Melflux 2651f при витраті 0,5%):

$$B/C = 1,15 \cdot 0,48 \cdot 50 / (77,12 + 0,65 \cdot 0,48 \cdot 50) = 0,298.$$

4. За табл. Б.39 встановлюємо орієнтовне значення витрати води ( $V_0$ ).  $V_0=260$  л/м<sup>3</sup>. Знаходимо витрату води з врахуванням поправки на використання добавки суперпластифікатора (табл. Б.27):

$$V^1 = V_0 \cdot K_d = 260 \cdot 0,64 = 166,4 \text{ л/м}^3.$$

6. Початкова витрата цементу (2.35):

$$C_0 = 166,4 / 0,298 = 559 \text{ кг/м}^3.$$

5. Об'єм затисненого повітря (2.30):

$$V_{з.п} = -6,52 \cdot \ln(15+1) + 19,9 = 1,8 \text{ л.}$$

6. Витрата заповнювача (2.36):

$$S = (1000 - 1,8 - 559 / 3,1 - 166,4) \cdot 2,65 = 1726 \text{ кг/м}^3.$$

7. Для визначення кількості фібри, що забезпечить необхідну міцність сталевібробетону на розтяг за даними формули (1а) табл. Б.18 та з врахуванням коефіцієнту надійності  $\gamma_{fbt} = 1,5$  (для першої групи граничних станів за несучою здатністю) переходимо від міцності при осьовому розтязі до міцності на розтяг при згині:

$$f_{cf} = 1,74 \cdot \gamma_{fbt} \cdot f_{ct} = 1,74 \cdot 1,5 \cdot 2,75 = 7,2 \text{ МПа.}$$

8. За номограмою (рис. Б.7) знаходимо, що при значенні  $B/C=0,298$  міцність сталевібробетону на розтяг при згині буде забезпечена при витраті фібри  $\Phi=65$  кг/м<sup>3</sup>.

9. Враховуємо поправку, % на витрату води при введенні фібри (2.38):

$$V_{\Phi} = (-0,003 \cdot \Phi - 0,0778) \cdot OK + 0,0656 \cdot \Phi + 0,6875 = 0,9\%.$$

10. Уточнене значення витрати води:



$$B = B' + B' \cdot B_{\Phi}/100 = 166,4 + 166,4 \cdot 0,9/100 = 168 \text{ л.}$$

8. Уточнене значення витрати цементу:

$$Ц = \frac{B}{B/Ц} = \frac{168}{0,298} = 564 \text{ кг.}$$

9. Уточнене значення витрати дрібного заповнювача визначаємо за методом абсолютних об'ємів (2.36):

$$П = \left( 1000 - 1,8 - \left( \frac{564}{3,1} + \frac{65}{7,85} + \frac{168}{1} \right) \right) \cdot 2,65 = 1697 \text{ кг.}$$

Остаточний склад фібробетонної суміші, кг/м<sup>3</sup>:

$$Ц = 564; B = 168; П = 1697; \Phi = 65; \text{Melflux } 2651f = 3,38.$$

**Приклад 4.** За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт  $l_0=2,0$  м, висоту  $H=2,0$  м. Блокпост виконаний із важкого бетону С25 товщиною 300 мм. За захисними властивостями блокпост повинен витримувати пряме попадання від снаряду БМП-2 (ОФЗ), який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 30 мм, вагу  $m=390$  г, початкова швидкість  $v_c=960$  м/с, висота головної частини патрону  $H_z=45,4$  мм.

#### **Необхідно:**

Визначити параметри демпферу для посилення блокпосту, якщо захисна плита перед ним планується з дрібнозернистого фібробетону класу С80, товщиною 400 мм.

#### **Розв'язок.**

1. Прийемо демпфер П-5 за табл. А.6, опорна плита якого має розміри  $210 \times 210$  мм. У розрахунку будемо враховувати демпфери, які знаходяться у зоні продавлювання при динамічних впливах (рис. 3.10).



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

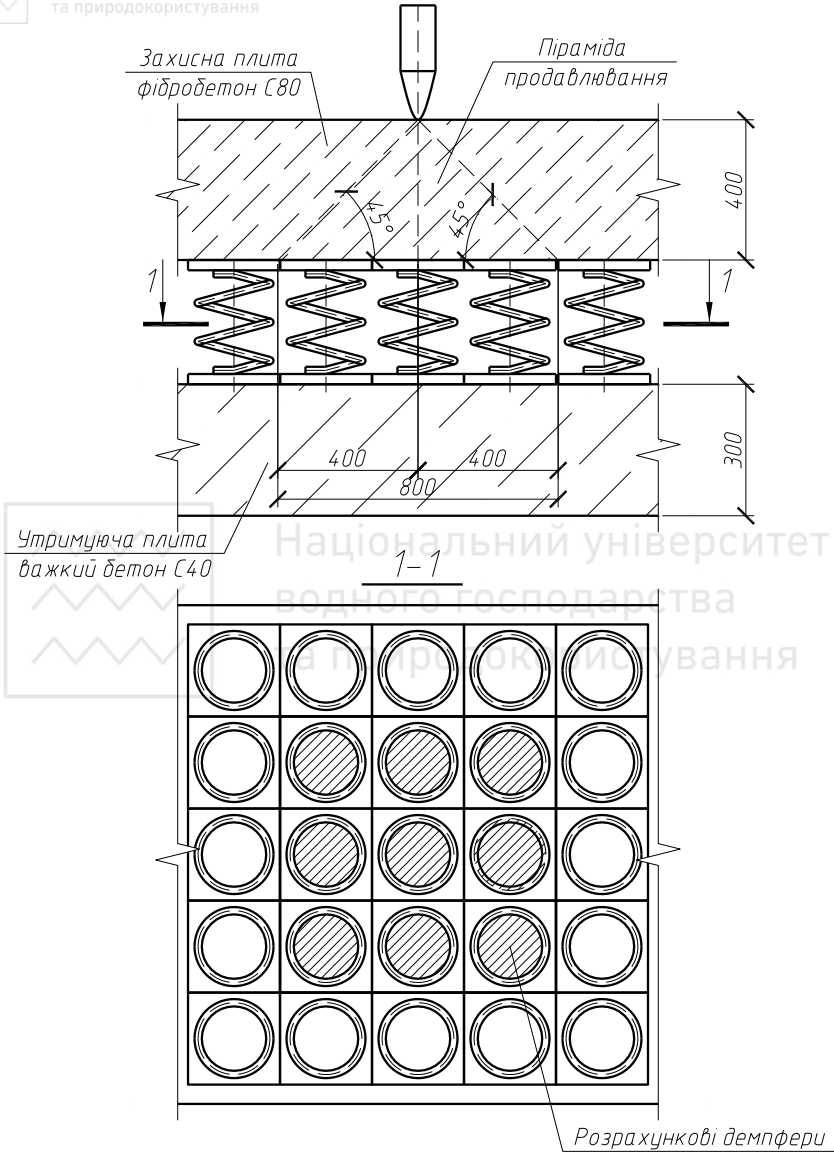


Рис. 3.10. До прикладу 4



Основа піраміди продавлювання у відповідності з рис. 3.10 складає  $640 \times 640$  мм. У такому випадку кількість демпферів, які будемо враховувати у розрахунку

$$n = \left( \frac{800}{240} \right)^2 \approx (3)^2 = 9 \text{ шт.};$$

2. Загальна потенціальна енергія, яку зможуть сприйняти демпфери

$$W_d = nW_{П-5} = 9 \times 4,61 = 41,49 \text{ кНм},$$

де  $W_{П-5} = 4,61 \text{ кНм}$  – потенціальна енергія демпфера П-5 (див. табл. А.6).

3. Визначимо енергію снаряду з урахуванням роботи демпферів:

$$mv^2 - 2W_d = 0,390 \times 960^2 / 1000 - 2 \times 41,49 = 276,44 \text{ кНм}.$$

4. Знаходимо нове значення швидкості снаряду при роботі демпферу:

$$v_1 = \sqrt{\frac{mv^2 - 2W_d}{m}} = \sqrt{\frac{276,44 \times 1000}{0,390}} = 842 \text{ м/с}.$$

5. За табл. А.1 встановлюємо, що дрібнозернистий фібробетон класу С80 має призмову міцність на стиск  $f_{fck,prism} = 57 \text{ МПа}$ .

6. Визначаємо необхідний коефіцієнт піддатливості проникненню, за формулою (1.10):

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (11,55 - 0,05 \times 57) \times 10^{-7} = 8,7 \times 10^{-7}.$$

7. Знаходимо допоміжні параметри, за виразами (1.1), (1.2), (1.3):

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,4 \sqrt[3]{\left( \frac{H_z}{d} \right)^2} = 0,5 + 0,4 \sqrt[3]{\left( \frac{45,4}{30} \right)^2} = 1,027;$$

$$\lambda_2 = 2,8 \sqrt[3]{d} - 1,3 \sqrt{d} = 2,8 \sqrt[3]{0,030} - 1,3 \sqrt{0,030} = 0,645;$$

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 = 1,027 \times 0,645 = 0,662.$$

8. Визначаємо необхідну товщину захисного покриття з умови проникнення снаряду на всю її глибину (1.11):

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_1 = 0,662 \times 8,7 \times 10^{-7} \frac{0,390}{0,030^2} 842 = 0,210 \text{ м}.$$





9. Встановлюємо час дії навантаження за формулою (1.12):

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_1} = \frac{2 \times 0,210}{842} = 5,0 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}.$$

10. Граничні деформації бетону попередньо прийемо за табл. А.1  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cul} = 280 \times 10^{-5}$ . Тоді:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau} = \frac{28 \times 10^{-4}}{5,0 \times 10^{-4}} = 5,6 \text{ c}^{-1}.$$

11. Так як  $\dot{\varepsilon} = 5,6 \text{ c}^{-1}$ , то коефіцієнт динамічного зміцнення, визначимо за другим виразом системи (1.14):

$$DEF_c = \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} = \left( \frac{5,6}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1,026 \times 0,0178} = 1,25,$$

де  $\alpha_s = \frac{1}{5 + 9 f_{fck,prism} / f_{c0}} = \frac{1}{5 + 9 \times 57 / 10} = 0,0178;$

$$\varepsilon_{cul,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{280 \times 10^{-5}}{1,25} = 224 \times 10^{-5}.$$

Визначимо похибку:

$$\Delta = \frac{280 - 224}{224} 100\% = 25\%.$$

Прийемо значення  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cul,d} = 224 \times 10^{-5}$  та встановимо нові динамічні параметри:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{22,4 \times 10^{-4}}{5,0 \times 10^{-4}} = 4,48 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left( \frac{4,48}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0183} = 1,24.$$

$$\varepsilon_{cul,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{280 \times 10^{-5}}{1,24} = 226 \times 10^{-5}. \Delta = \frac{226 - 224}{224} 100\% = 0,89\%.$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

Визначимо динамічні характеристики фібробетону:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,24^{2/3} = 1,15;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,24 \times 41 = 50,84 \text{ МПа};$$



Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. А.1 для С80  $f_{ct} = 4,2 \text{ МПа}$ .

$$\text{Тоді: } f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,15 \times 4,2 = 4,83 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 42000 \times 1,24^2 = 52080 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c} = \frac{270 \times 10^{-5}}{1,24} = 218 \times 10^{-5}.$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{667 \times 10^{-5}}{1,15} = 580 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{1000 \times 10^{-5}}{1,15} = 870 \times 10^{-5}.$$

12. Розрахуємо несучу здатність плити на основі нелінійної деформаційної моделі у розробленому програмному комплексі (рис. 3.11).

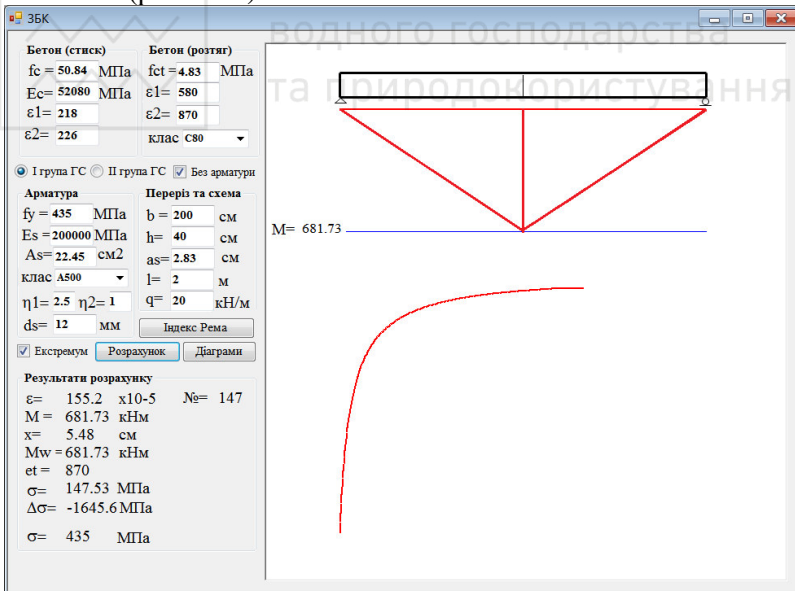


Рис. 3.11. Розрахунок несучої здатності плити з фібробетону С80 на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 4



$$M_{ult} = 681,73 \text{ кНм.}$$

Перевіримо умову міцності (1.23), при цьому потенціальною енергією прогину несучої плити знехтуємо:

$$mv^2 - 2W_d = 276,44 \text{ кНм};$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 681,73}{2} \times 0,210 = 286,3 \text{ кНм.}$$

Так як

$$mv^2 - 2W_d = 276,44 \text{ кНм} < \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = 286,3 \text{ кНм,}$$

міцність плити забезпечена.

Для забезпечення захисних функцій без демпферів товщина стіни із дрібнозернистого фібробетону класу С80 повинна бути 45 см.

**Приклад 5.** За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт  $l_0=3,2$  м, висоту  $H=2,0$  м. Блокпост виконаний із важкого бетону С40 товщиною 150 мм. За захисними властивостями блокпост повинен витримувати пряме попадання від снаряду БМП-2(БП), який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 30 мм, вагу  $m=0,304$  кг, початкова швидкість  $v_c=1120$  м/с, висота головної частини патрону  $H_2=78,4$  мм. Плита блокпосту має армування  $\varnothing 12$  А500( $A_{s1}=1,13$  см<sup>2</sup>) з кроком 200 мм в обох напрямках, сітки виконані із зміцненням.

#### **Необхідно:**

Визначити яку засипку ґрунтом необхідно виконати для посилення блокпосту. Встановити мінімально можливу товщину ґрунту засипки та товщину при, який не відбудеться пошкодження плити від боеприпасу. В якості ґрунту засипки планується використати суглинок.

#### **Розв'язок.**

Визначення мінімально можливої товщини ґрунту засипки.

1. За табл. А.1 встановлюємо, що важкий класу С40 має призмову міцність на стиск  $f_{fck,prism} = 25,5$  МПа.



2. Армування не буде впливати на міцність бетону так як недотримані конструктивні вимоги. Тому визначимо коефіцієнт піддатливості проникненню без врахування впливу армування.

Коефіцієнт піддатливості проникненню визначаємо для важкого бетону за виразом (1.8):

$$k_{np1} = (13,37 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (13,37 - 0,05 \times 25,5) \times 10^{-7} = 12,1 \times 10^{-7}.$$

3. Визначимо швидкість снаряду при з умови проникнення його на глибину захисної товщі блокпосту із виразу (1.49)

$$v_{chl} = \frac{h_i d^2}{\lambda k_{np1} m} = \frac{0,150 \times 0,030^2}{0,812 \times 12,1 \times 10^{-7} \times 0,304} = 452 \text{ м/с}$$

де

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,4 \sqrt[3]{\left(\frac{H_c}{d}\right)^2} = 0,5 + 0,4 \sqrt[3]{\left(\frac{78,4}{30}\right)^2} = 1,259;$$

$$\lambda_2 = 2,8 \sqrt[3]{d} - 1,3 \sqrt{d} = 2,8 \sqrt[3]{0,030} - 1,3 \sqrt{0,030} = 0,645;$$

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 = 1,259 \times 0,645 = 0,812.$$

4. Таким чином, для того, щоб снаряд із заданими характеристиками не пробив плити блокпосту необхідно, мати швидкість його на підході меншу за 452 м/с.

Визначимо швидкість, яку має погасити захисна товща ґрунту (1.51):

$$v_{cin} = v_{c0} - \sum_{i=1}^n v_{chi} = 1120 - 452 = 668 \text{ м/с}.$$

5. Визначимо необхідну захисну товщу ґрунту за (1.52):

$$h_{in} = \lambda k_{np2} \frac{m}{d^2} v_{cin} = 0,812 \times 70 \times 10^{-7} \frac{0,304}{0,030^2} 668 = 1,28 \text{ м} \approx 1,3 \text{ м},$$

де  $k_{np2} = 70 \times 10^{-7}$  – коефіцієнт піддатливості проникненню для суглинків, за табл. А.7 додатка.

6. Для перевірки міцності плити попередньо знайдемо:

- швидкість після проходження снаряду товщі ґрунту

$$v_{c2} = v_{c0} - v_{c1} = 1120 - 677 = 443 \text{ м/с};$$

$$v_{c1} = \frac{h_m d^2}{\lambda k_{np2} m} = \frac{1,3 \times 0,030^2}{0,812 \times 70 \times 10^{-7} \times 0,304} = 677 \text{ м/с}.$$



- глибину проникнення снаряду у захисну товщу бетону

$$h_{in} = \lambda k_{np1} \frac{m}{d^2} v_{cin} = 0,812 \times 12,1 \times 10^{-7} \frac{0,304}{0,030^2} 443 = 0,147 \text{ м.}$$

7. Визначасмо граничну кривину та згинаючий момент на основі нелінійної деформаційної моделі у розробленому програмному комплексі (рис. 3.12). На даному етапі зміною характеристик матеріалів при динамічних впливах знехтуємо.

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{229,64 \times 10^{-5}}{0,0162} = 0,142 \text{ м}^{-1}.$$

$$M_{ult} = 69,47 \text{ кНм.}$$

8. Виконаємо перевірку міцності за виразом (1.23):

$$mv^2 = 0,304 \times 443^2 = 59660 \text{ Дж} = 59,66 \text{ кНм};$$

$$\frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = \frac{1}{3} 69,47 \times 0,142 \times 3,2 = 10,52 \text{ кНм};$$

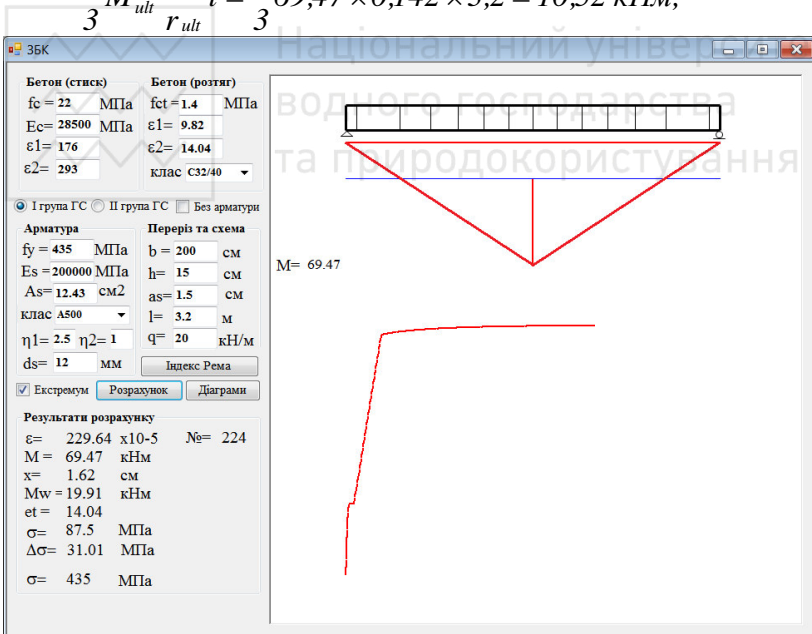


Рис. 3.12. Розрахунок залізобетонної плити із важкого бетону без коефіцієнтів динамічного зміцнення на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 5



$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 69,47}{3} \times 0,147 = 13,62 \text{ кНм.}$$

Так як

$$mv^2 = 59,66 \text{ кНм} > \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = 13,62 + 10,52 = 24,14 \text{ кНм,}$$

міцність плити незабезпечена.

9. Встановимо швидкість за якої буде забезпечена міцність плити

$$v = \sqrt{\frac{\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}}}{m}} = \sqrt{\frac{24140}{0,304}} = 282 \text{ м/с.}$$

10. Тоді остаточно визначимо:

- швидкість, яку має погасити захисна товща ґрунту (1.51)

$$v_{cin} = v_{c0} - \sum_{i=1}^{i_n} v_{chi} = 1120 - 282 = 838 \text{ м/с;}$$

- необхідна захисна товща ґрунту (1.52)

$$h_{in} = \lambda k_{np2} \frac{m}{d^2} v_{cin} = 0,812 \times 70 \times 10^{-7} \frac{0,304}{0,030^2} 838 = 1,61 \text{ м.}$$

- швидкість після проходження снаряду товщі ґрунту

$$v_{c2} = v_{c0} - v_{c1} = 1120 - 838,6 = 281,4 \text{ м/с;}$$

$$v_{c1} = \frac{h_{in} d^2}{\lambda k_{np2} m} = \frac{1,61 \times 0,030^2}{0,812 \times 70 \times 10^{-7} \times 0,304} = 838,6 \text{ м/с.}$$

- глибина проникнення снаряду у захисну товщу бетону

$$h_{in} = \lambda k_{np1} \frac{m}{d^2} v_{cin} = 0,812 \times 12,1 \times 10^{-7} \frac{0,304}{0,030^2} 281,4 = 0,093 \text{ м.}$$

11. Встановлюємо час дії навантаження за формулою (1.12)

$$\tau = \frac{2h_{in}}{v_c} = \frac{2 \times 0,093}{281,4} = 6,61 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}.$$

12. Граничні деформації бетону попередньо прийемо за табл. А.1  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cul} = 350 \times 10^{-5}$ . Тоді:



$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau} = \frac{35 \times 10^{-4}}{6,61 \times 10^{-4}} = 5,3 \text{ c}^{-1}.$$

13. Так як  $\dot{\varepsilon} = 5,3 \text{ c}^{-1}$ , то коефіцієнт динамічного зміцнення, визначимо за другим виразом системи (1.14):

$$DEF_c = \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} = \left( \frac{5,3}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1,026 \times 0,0358} = 1,56,$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_{fck,prism}/f_{c0}} = \frac{1}{5 + 9 \times 25,5/10} = 0,0358;$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{1,56} = 224 \times 10^{-5}.$$

Визначимо похибку:

$$\Delta = \frac{350 - 224}{224} 100\% = 56,25\%.$$

Прийmemo значення  $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1,d} = 224 \times 10^{-5}$ , та встановимо нові динамічні параметри

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{22,4 \times 10^{-4}}{6,61 \times 10^{-4}} = 3,39 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left( \frac{3,39}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0367} = 1,53.$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{1,53} = 229 \times 10^{-5}.$$

$$\Delta = \frac{229 - 224}{224} 100\% = 2,14\%.$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

14. Визначимо динамічні характеристики сталевібробетону:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,53^{2/3} = 1,328;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,53 \times 22 = 33,66 \text{ МПа}.$$

Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. А.1 для С40  $f_{ct} = 2,1 \text{ МПа}$ ;

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,328 \times 2,1 = 2,79 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 36000 \times 1,328^2 = 63489 \text{ МПа};$$



$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c} = \frac{225 \times 10^{-5}}{1,53} = 147 \times 10^{-5}.$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{9,82 \times 10^{-5}}{1,328} = 7,39 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{14,04 \times 10^{-5}}{1,328} = 10,57 \times 10^{-5}.$$

15. Визначимо коефіцієнт зміцнення арматурної сталі для *A500*

$DEF_s = 1 + 0,75 \varepsilon = 1 + 0,75 \times 3,39 = 3,54 \leq 1,15$  (за графіком рис. 1).

Остаточно приймаємо  $DEF_s = 1,15$ .

16. Динамічний опір арматури  $f_{y,d} = f_y \times DEF_s = 435 \times 1,15 = 500,25 \text{ МПа}$ .

17. Визначаємо граничну кривину та згинаючий момент на основі нелінійної деформаційної моделі у розробленому програмному комплексі (рис. 3.13).

$$\frac{1}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{196,13 \times 10^{-5}}{0,0118} = 0,166 \text{ м}^{-1}.$$

$$M_{ult} = 80,93 \text{ кНм}.$$

18. Остаточно перевіримо міцність за виразом (1.23):

$$mv^2 = 0,304 \times 281,4^2 = 24073 \text{ Дж} = 24,07 \text{ кНм};$$

$$\frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} l = \frac{1}{3} 80,93 \times 0,166 \times 3,2 = 14,33 \text{ кНм};$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 80,93}{3} \times 0,093 = 10,03 \text{ кНм}.$$

Так як

$$mv^2 = 24,07 \text{ кНм} < \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} = 14,33 + 10,03 = 24,36 \text{ кНм},$$

міцність плити забезпечена.

Таким чином мінімально необхідна товщина ґрунту засипки  $1,61 \text{ м}$ .



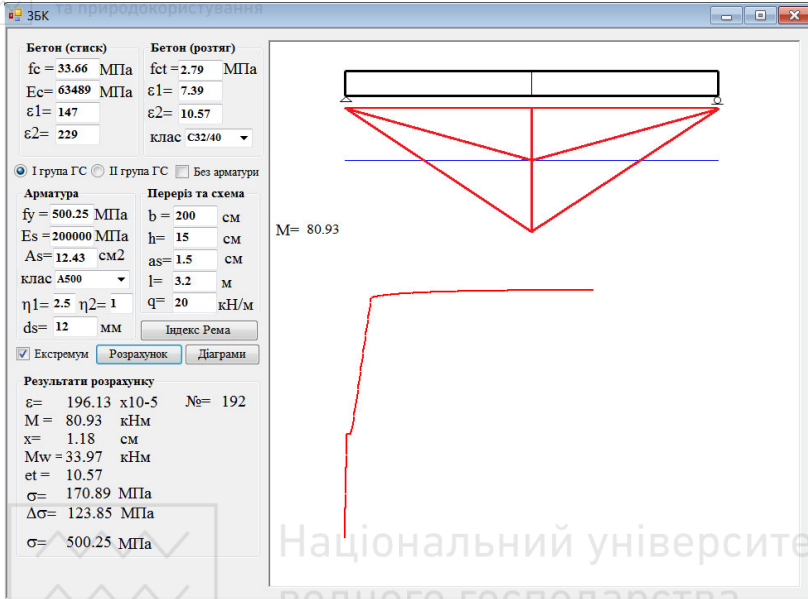


Рис. 3.13. Розрахунок залізобетонної плити із важкого бетону з урахуванням коефіцієнтів динамічного зміцнення на основі нелінійної деформаційної моделі до прикладу 5

Визначення товщини ґрунту засипки при, який не відбудеться пошкодження плити від боєприпасу

1. Визначимо необхідну захисну товщу ґрунту за (1.52)

$$h_{in} = \lambda k_{np2} \frac{m}{d^2} v_{cin} = 0,812 \times 70 \times 10^{-7} \frac{0,304}{0,030^2} 1120 = 2,15 \text{ м.}$$

де  $k_{np2} = 70 \times 10^{-7}$  – коефіцієнт піддатливості проникненню для суглинків, за табл. А.7.

### 3.2 Варифікаційні приклади

Розглянемо варифікаційні тестові приклади розрахунку фортифікаційних споруд. Розв'яжемо задачі за допомогою розробленого програмного комплексу, які були вирішені у п. 3.1.

**Приклад 1.** За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт  $l_0=3$  м, висоту  $H=3$  м, товщину



$h=20$  см. Захисне покриття повинно витримувати пряме попадання від патрону кулемету ДШК, який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 12,7 мм, вагу  $m=48,2$  г, початкова швидкість  $v_c=840$  м/с, висота головної частини патрону  $H_2=33,43$  мм.

### **Необхідно:**

Підібрати клас дрібнозернистого фібробетону для захисного покриття блок посту.

### **Розв'язок.**

У результаті розрахунку у п.3.1 ми отримали, що для забезпечення захисної надійності блокпосту при дії на нього зброї заданих параметрів, необхідно використати дрібнозернистий фібробетон класу C70:  $f_{fck,prism} = 50$  МПа,  $f_{fc} = 37$  МПа,  $f_{ct} = 3,8$  МПа.

Виконаємо розрахунок у розробленому програмному комплексі (див. рис. 3.14, рис. 3.15).

Порівняємо розрахунки:

- глибина пробою визначена: в прикладі  $h_{np} = 14,5$  см, за програмним комплексом  $h_{np} = 14,54$  см, похибка складає 0,28%;

- коефіцієнт динамічного зміцнення при стиску: в прикладі  $DEF_c = 1,29$  см, за програмним комплексом  $DEF_c = 1,29$  см, похибка складає 0,0%;

- несуча здатність: в прикладі  $M_{ult} = 239,94$  кНм, за програмним комплексом  $M_{ult} = 239,7$  кНм, похибка складає 0,1%;

- значення енергії, яку здатна сприйняти плита: в прикладі  $W_i = 59,49$  кНм, за програмним комплексом  $W_i = 58,6$  кНм, похибка складає 1,52%.

Отримані похибки спричинені округленням певних значень при ручних розрахунках.

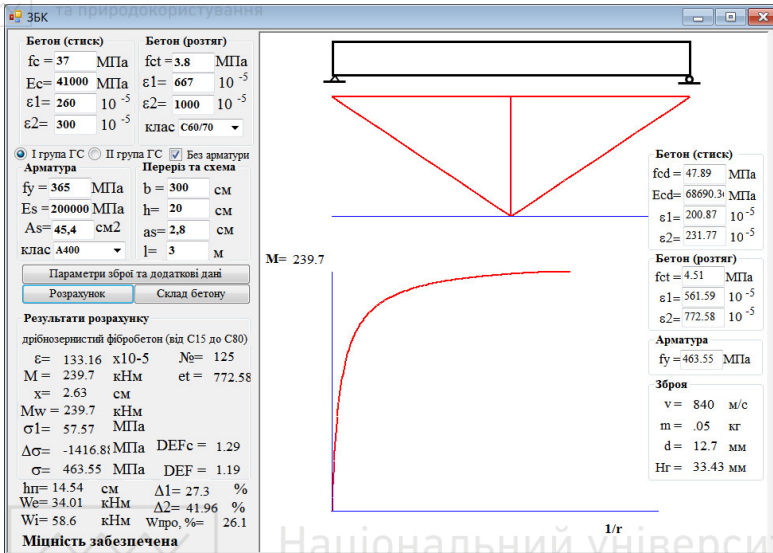


Рис. 3.14. До автоматизованого розрахунку верифікаційного прикладу 1

- 1 -РОЗРАХУНОК ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД-
- 2 Дата -12.10.2017
- 3 1.ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНУ:
- 4 -Вид бетону - дрібнозернистий фібробетон (від C15 до C80)
- 5 -Міцність бетону на стиск  $f_c = 37$  МПа;
- 6 -Міцність бетону на розтяг  $f_{ct} = 3.8$  МПа;
- 7 -Модуль пружності  $E_c = 41000$  МПа;
- 8 2.ХАРАКТЕРИСТИКИ АРМАТУРИ:
- 9 -Споруда без робочої арматури
- 10 3.ХАРАКТЕРИСТИКА ЗБРОЇ:
- 11 -Швидкість боєприпасу  $v = 840$  м/с;
- 12 -Маса боєприпасу  $m = .05$  кг;
- 13 -Калібр боєприпасу  $d = 12.7$  мм;
- 14 -Висота головної частини боєприпасу  $H_g = .05$  мм;
- 15 4.ПАРАМЕТРИ ФОРТИФІКАЦІЙНОЇ СПОРУДИ:
- 16 -Ширина захисної стіни  $b = 300$  см;
- 17 -Розрахунковий проліт  $l = 3$  м;
- 18 -Необхідна товщина захисної стіни  $h = 20$  см;
- 19 5.РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ:
- 20 -Глибина пробивання  $h_p = 14.54$  см;
- 21 -Запас міцності на пробивання  $27.3$  %;
- 22 -Запас загальної міцності  $41.96$  %.

Рис. 3.15. Звіт до верифікаційного прикладу 1



**Приклад 2.** За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт  $l_0=2,0$  м, висота  $H=2,0$  м. За захисними властивостями блокпост повинен витримувати пряме попадання від снаряду БМП-2 (ОФ3), який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 30 мм, вагу  $m=390$  г, початкова швидкість  $v_c=960$  м/с, висота головної частини патрону  $H_c=45,4$  мм.

**Необхідно:**

Визначити товщину неармованого захисного покриття блокпосту з дрібнозернистого фібробетону класу на стиск С80.

**Розв'язок.**

Розрахунком у п.3.1 встановлено, що для забезпечення захисної надійності блокпосту при дії на нього зброї заданих параметрів, міцність буде забезпечена при товщині плити 42 см. При цьому необхідно використати дрібнозернистий фібробетон класу С80, з такими характеристиками:  $f_{fck, prism} = 57$  МПа,  $f_{fc} = 41$  МПа,  $f_{ct} = 4,2$  МПа.

Задамо всі необхідні параметри та виконаємо розрахунок у розробленому програмному комплексі (див. рис. 3.16, рис. 3.17).

Порівняємо результати розрахунків:

- глибина пробою визначена: в прикладі  $h_{np} = 24,0$  см, за програмним комплексом  $h_{np} = 23,97$  см, похибка складає 0,125%;

- коефіцієнт динамічного зміцнення при стиску: в прикладі  $DEF_c = 1,24$  см, за програмним комплексом  $DEF_c = 1,25$  см, похибка складає 0,8%;

- необхідна товщина плити: в прикладі  $h = 42$  см, за програмним комплексом  $h = 41,04$  см, похибка складає 2,3%.  
За конструктивними вимогами товщина плити буде повністю відповідати розрахунку виконаному вручну.

Виконані приклади підтверджують можливість використання розробленого комплексу до розрахунку фортифікаційних споруд.

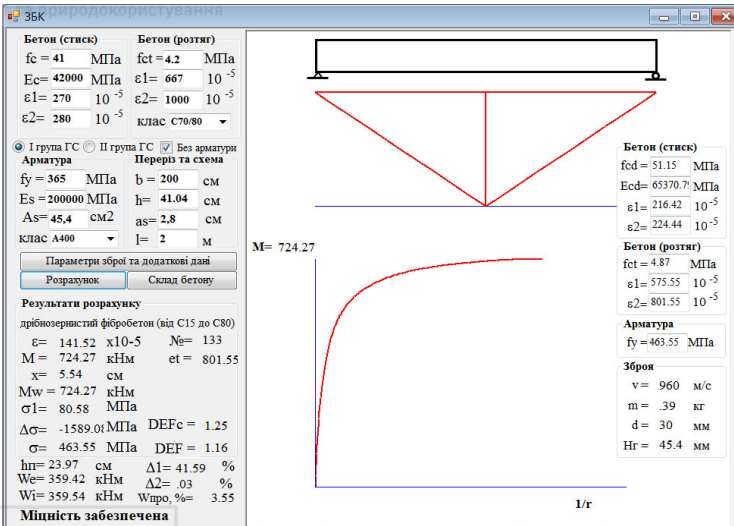


Рис. 3.16. До автоматизованого розрахунку верифікаційного прикладу 2

- 1 | РОЗРАХУНОК ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД
- 2 | Дата - 12.10.2017
- 3 | 1.ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНУ:
- 4 | -Вид бетону - дрібнозернистий фібробетон (від C15 до C80)
- 5 | -Міцність бетону на стиск  $f_c = 41$  МПа;
- 6 | -Міцність бетону на розтяг  $f_{ct} = 4.2$  МПа;
- 7 | -Модуль пружності  $E_c = 42000$  МПа;
- 8 | 2.ХАРАКТЕРИСТИКИ АРМАТУРИ:
- 9 | -Споруда без робочої арматури
- 10 | 3.ХАРАКТЕРИСТИКА ЗБРОЇ:
- 11 | -Швидкість боєприпасу  $v = 960$  м/с;
- 12 | -Маса боєприпасу  $m = .39$  кг;
- 13 | -Калібр боєприпасу  $d = 30$  мм;
- 14 | -Висота головної частини боєприпасу  $H_g = .39$  мм;
- 15 | 4.ПАРАМЕТРИ ФОРТИФІКАЦІЙНОЇ СПОРУДИ:
- 16 | -Ширина захисної стіни  $b = 200$  см;
- 17 | -Розрахунковий проліт  $l = 2$  м;
- 18 | -Необхідна товщина захисної стіни  $h = 41.04$  см;
- 19 | 5.РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ:
- 20 | -Глибина пробивання  $h_p = 23.97$  см;
- 21 | -Запас міцності на пробивання  $41.59$  %;
- 22 | -Запас загальної міцності  $.03$  %.

Рис. 3.17. Звіт до верифікаційного прикладу 2



### 3.3. Приклади розрахунку за спрощеною методикою

Розв'яжемо задачі за спрощеною методикою, які були вирішені нами у п. 3.1.

**Приклад 1.** За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт  $l_0=3$  м, висоту  $H=3$  м, товщину  $h=20$  см. Захисне покриття повинно витримувати пряме попадання від патрону кулемету ДШК, який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 12,7 мм, вагу  $m=48,2$  г, початкова швидкість  $v_c=840$  м/с, висота головної частини патрону  $H_z=33,43$  мм. Матеріал захисного покриття дрібнозернистий фібробетон класу C70 з такими характеристиками:  $f_{fck,prism} = 50$  МПа,  $f_{fc} = 37$  МПа,  $f_{ct} = 3,8$  МПа.

**Необхідно:**

Перевірити міцність захисного покриття блок посту.

**Розв'язок.**

1. За табл. А.1 встановлюємо, що дрібнозернистий фібробетон класу C70 має призмову міцність на стиск  $f_{fck,prism} = 50$  МПа.

2. Встановлюємо значення коефіцієнту піддатливості проникненню за виразом (1.10):

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (11,55 - 0,05 \times 50) \times 10^{-7} = 9,05 \times 10^{-7}.$$

3. Встановлюємо глибину проникнення пулі у захисне покриття за формулою (1.11):

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c = 0,640 \times 9,05 \times 10^{-7} \frac{0,0482}{0,0127^2} 840 = 0,145 \text{ м.}$$

4. Перевіряємо умову (1.85):

$$h = 0,20 \text{ м} \geq h_{np} = 0,145 \text{ м.} \quad \text{Перша умова міцності}$$

задовольняється.

5. Визначимо динамічні характеристики фібробетону класу C70, прийняв  $DEF_c = 1,2$ :

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,2^{2/3} = 1,13;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,2 \times 37 = 44,4 \text{ МПа.}$$

Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. А.1 для C70  $f_{ct} = 3,8$  МПа;



$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,13 \times 3,8 = 4,29 \text{ МПа.}$$

6. Визначимо значення розрахункового опору бетону на розтяг за умови прямокутної епюри напружень

$$f_{ct,dp} = k\eta_t f_{ct,d} = 0,56 \times 0,75 \times 4,29 = 1,80 \text{ МПа.}$$

7. Визначаємо механічний процент армування для фібробетону

$$\omega = \frac{f_{ct,dp}}{f_{c,d} + f_{ct,dp}} = \frac{1,80}{44,4 + 1,80} = 0,039;$$

8. Визначимо параметр  $k_z$ , за табл. А.5

$$k_z = \alpha + \beta \times \omega = 0 + 5,678 \times 0,039 = 0,221.$$

9. Встановимо загальний розрахунковий опір фібробетону:  $f_{zM} = k f_{c,d} = 0,221 \times 44,4 = 9,81 \text{ МПа};$

10. Визначимо максимальний згинаючий момент, який може сприйняти плита:

$$M_{ult} = \frac{bh^2}{6} f_{zM} = \frac{300 \times 20^2}{6} \times 9,81 \times 10^{-3} = 196,2 \text{ кНм.}$$

11. Перевіряємо умову (1.86):

$$v_c = 840 \text{ м/с} \leq \frac{4M_{ult}}{l} \frac{\lambda k_{np}}{d^2} = \frac{4 \times 196,2}{3} \frac{0,640 \times 9,05 \times 10^{-7}}{0,0127^2} \times 10^3 =$$

$$= 939,4 \text{ м/с.}$$

умова виконана, міцність плити забезпечена.

12. Зробимо порівняння основних параметрів із точним методом виконаним з використанням ЕОМ:

- несуча здатність: в прикладі  $M_{ult} = 196,2 \text{ кНм}$ , за програмним комплексом  $M_{ult} = 239,7 \text{ кНм}$ , похибка складає 18,15%;

- запас міцності: в прикладі 11,83%, за програмним комплексом 41,96 %.

Значна похибка у запасах міцності пояснюється значним впливом енергії прогину, яка складає у даному випадку 26,1% від загальної внутрішньої енергії, в наслідок відносно великого прольоту  $l=3 \text{ м}$ .



**Приклад 2.** За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт  $l_0=2,0$  м, висота  $H=2,0$  м. За захисними властивостями блокост повинен витримувати пряме попадання від снаряду БМП-2 (ОФЗ), який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 30 мм, вагу  $m=390$  г, початкова швидкість  $v_c=960$  м/с, висота головної частини патрону  $H_c=45,4$  мм.

**Необхідно:**

Визначити товщину неармованого захисного покриття блокосту з дрібнозернистого фібробетону класу на стиск С80.

**Розв'язок.**

1. За табл. А.1 встановлюємо, що дрібнозернистий фібробетон класу С80 має призмову міцність на стиск  $f_{fck,prism} = 57$  МПа.

2. Визначаємо необхідний коефіцієнт піддатливості проникненню за формулою (1.10):

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (11,55 - 0,05 \times 57) \times 10^{-7} = 8,7 \times 10^{-7}.$$

3. Знаходимо допоміжні параметри, за виразами (1.1), (1.2), (1.3):

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,4 \sqrt[3]{\left(\frac{H_c}{d}\right)^2} = 0,5 + 0,4 \sqrt[3]{\left(\frac{45,4}{30}\right)^2} = 1,027;$$

$$\lambda_2 = 2,8 \sqrt[3]{d} - 1,3 \sqrt{d} = 2,8 \sqrt[3]{0,030} - 1,3 \sqrt{0,030} = 0,645;$$

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 = 1,027 \times 0,645 = 0,662.$$

4. Визначаємо необхідну товщину захисного покриття з умови проникнення снаряду на всю її глибину (1.11):

$$h_{np1} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c = 0,662 \times 8,7 \times 10^{-7} \frac{0,390}{0,030^2} 960 = 0,240 \text{ м.}$$

5. Визначимо динамічні характеристики фібробетону, прийняв  $DEF_c = 1,2$ :

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,2^{2/3} = 1,13;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,2 \times 41 = 49,2 \text{ МПа.}$$

Приймемо значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. А.1 для С80  $f_{ct} = 4,2$  МПа.





Тоді:

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,13 \times 4,2 = 4,75 \text{ МПа.}$$

6. Визначимо значення розрахункового опору бетону на розтяг за умови прямокутної епюри напружень:

$$f_{ct,dp} = k\eta_t f_{ct,d} = 0,56 \times 0,75 \times 4,75 = 1,995 \text{ МПа.}$$

7. Визначимо необхідну несучу здатність плити із умови (1.86):

$$M_{ult} \geq \frac{v_c d^2 l}{4 \lambda k_{np}} = \frac{960 \times 0,030^2 \times 2}{4 \times 0,662 \times 8,7 \times 10^{-7}} \times 10^{-3} = 750 \text{ кНм.}$$

8. Визначаємо механічний процент армування для фібро бетону:

$$\omega = \frac{f_{ct,dp}}{f_{c,d} + f_{ct,dp}} = \frac{1,995}{49,2 + 1,995} = 0,039.$$

9. Визначимо параметр  $k_z$ , за табл. А.5:

$$k_z = \alpha + \beta \times \omega = 0 + 5,678 \times 0,039 = 0,221.$$

10. Загальний розрахунковий опір фібро бетону:

$$f_{zM} = k f_{c,d} = 0,221 \times 49,2 = 10,87 \text{ МПа.}$$

11. Необхідна товщина плити:

$$h_2 = \sqrt{\frac{6 M_{ult}}{b f_{zM}}} = \sqrt{\frac{6 \times 750 \times 10^3}{200 \times 10,87}} = 45,5 \text{ см.}$$

12. Із двох значень  $h_{np1} = 0,240 \text{ м}$  та  $h_2 = 0,455 \text{ м}$  приймаємо більше. Остаточна необхідна товщина плити повинна бути  $0,455 \text{ м}$ . Товщина плити визначена точним методом з використанням програмного комплексу складає  $0,4104 \text{ м}$ , похибка  $9,8\%$ .



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Аветисян Л. А. Прочность и деформативность сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий. Дис. канд. техн. наук: 05.23.01. – Москва, 2015. – 215 с.
2. Баженов Ю. М. Бетон при динамическом нагружении. М. : Стройиздат, 1970, 274 с.
3. Баженов Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов: учеб. пособие. – М. : Стройиздат, 1975. – 272 с.
4. Байков В. Н. Железобетонные конструкции. Общий курс: учеб. для вузов. Изд. 6-е, репринт. / Байков В. Н., Сигалов Э. Е. // – М. 2009. – 310 с.
5. Балаганский И. А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. / Балаганский И. А., Мерзневский Л. А. // – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 408 с. – ISBN 5-7782-0467-1.
6. Баландин В. В. Установка для исследования процессов высокоскоростного соударения // Проблемы прочности и пластичности. Вып. 75 (3). Нижний Новгород, 2013. – С. 232 – 237.
7. Белов Н. Н. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки. / Белов Н. Н., Копаница Д. Г., Кумпляк О. Г., Югов Н. Т. // – Томск: STT, 2004. – 466 с. – ISBN 5-93629-183-9.
8. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1991. – 31 с.
9. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.– М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1980. – 14 с.
10. ДБН В.2.6–98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
11. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін // – К : Основа, 2007. – 616 с.



12. Дворкін Л. Й. Бетони і будівельні розчини. / Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. // – К. : "Основа", 2008. – 448 с.
13. Дворкін Л. Й. Проектування складів бетону із заданими властивостями. / Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Гарніцький Ю. В. // – Рівне, 2000. – 215 с.
14. Дворкін Л. Й. Проектування і аналіз ефективності складів бетону. / Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Горячих М. В., Шмигальський В. М. // – Рівне, НУВГП, 2009. – 173 с.
15. Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетонов. – Львов. : Вища школа, 1981. – 160 с.
16. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства. / Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. // – К. : Основа, 2007. – 616 с.
17. Дворкин Л. И. Строительное материаловедение. / Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. // – М. : Инфра-Инженерия, 2013. – 830 с.
18. Дворкин Л. И. Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов. / Дворкин Л. И., Гоц В. И., Дворкин О. Л. // – М. : Инфра-Инженерия, 2014, 432 с.
19. Дворкин Л. И. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона. / Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. // – М. : Инфра-Инженерия, 2015, с.386.
20. Дворкин Л. И. Строительное материаловедение. / Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. // – С.Пб. : Стройбетон, 2006. – 682 с.
21. Дворкин Л. И. Многофакторное прогнозирование свойств и проектирование составов бетонов. / Дворкин Л. И., Шамбан И. Б. // – М. : Стройиздат, 1992. – 132 с.
22. Руководство по подбору составов тяжелого бетона. – М. : Стройиздат, 1979. – 102 с.
23. Сизов В. П. Проектирование составов тяжелого бетона. – М. : Стройиздат, 1980. – 144 с.
24. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers, New York, USA, 2012, 172 p.
25. Dvorkin L., Nwoubani S., Dvorkin O. Construction Materials. Nova Science Publishers, New York, USA, 2010, 409p.



26. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Multi-parametric Concrete Compositions design. Nova science Publishers, New York, USA, 2013, 223 p.

27. Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В. та ін. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони. – Рівне. НУВГП, 2017. – 331 с.

28. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції. Правила проектування. – Київ : Мікрорегіонбуд, 2010. – 166 с.

29. ДСТУ Б В.2.7– 214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. – К. Мікрорегіонбуд, 2010. – 31 с.

30. Заломин Д. О. Коэффициент динамического упрочнения сталефибробетона при растяжении // Современные наукоемкие технологии №2. – М.:Издательство АСВ, 2004. – С 150-151.

31. Казаков, Ю. Н. Инженерные решения для строительства «антитеррористических» зданий. Ю. Н. Казаков, Н. Флавицкий, Т. М. Николаева. Монография. – СПб. : СПГАСУ, 2009. – 472 с.

32. Кочкаръов Д.В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам: Монографія. – Рівне: О. Зень, 2015. – 384 с.:Іл.: 139; табл. 48; бібліогр: 326 - ISBN 978-617-601-125-5.

33. Кузнецов В. С. Железобетонные и каменные конструкции (Основы сопротивления железобетона. Практическое проектирование. Примеры расчета): Учеб.пособие. – М. : Издательство АСВ, 2014. – 304 с.

34. Кумпяк О. Г., Копаница Д. Г. Прочность и деформативность железобетонных сооружений при кратковременном динамическом нагружении. – Томск: STT, 2002. – 336 с.

35. Ламзин Д.А. Высокоскоростное деформирование и разрушение мелкозернистых бетонов. Дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. – Нижний-Новгород, 2014. – 161 с.

36. Мкртчян А. М., Аксенов. В. Н. Аналитическое описание диаграммы деформирования высокопрочных бетонов.



[Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, № 3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1334> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

37. Опір матеріалів: Підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський; за ред. Г. С. Писаренка. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К. : Вища шк., 2004. – 655 с. іл. – ISBN 966-642-056-2.

38. Парфенов А. В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Уфа, 2004. – 188 с.

39. СП Конструкции и изделия фибробетонные. Правила проектирования. Москва. – 2012. – 155 с.

40. СТО НОСТРОЙ 2.27.125-2013. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ Москва. – 2012. – 117 с.

41. Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990, Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire, UK, 1993.

42. EN 12390-3:2009 Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens.

43. EN 12390-6:2009 Testing hardened concrete. Tensile splitting strength of test specimens.

44. EN 14488-5:2006 Testing sprayed concrete. Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens.

45. EN 14651:2005+A1:2007 Test method for metallic fiber concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).

46. EN 14845-2:2006 Test methods for fibers in concrete. Effect on concrete.

47. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings.

48. EN 1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.

49. EN 1992-2 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for build-ings.



50. Hakan Hansson. Warhead penetration in concrete protective structures. Licentiate Thesis. – Stockholm, 2011. – 188 с.
51. Kufuor K. G., Perry S. H. Hard impact of shallow reinforced concrete domes. Int. Conf. Structural Impact and Crashworthiness: Int. Conf. – V.2. – London, 1984. – P.675-686.
52. Wang S., Zhang M., Quek T. Compressive behavior of plain and fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain rate loading // Applied Mechanics and Materials Vol. 82 (2011). P. 57-62.
53. ДСТУ Б В. 2.7-215:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу
54. ДСТУ Б В.2.7-46-2010 Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови
55. ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови
56. ДСТУ Б В.2.7-43-96 Будівельні матеріали. Бетони важкі. Технічні умови
57. ДСТУ Б В.2.7-176:2008 Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови (EN 206-1:2000, NEQ)
58. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови
59. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Додавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови (EN 934-2:2001, NEQ)
60. ДСТУ Б В.2.7-205:2009 Будівельні матеріали. Золиноносу теплових електростанцій для бетонів. Технічні умови
61. ДСТУ Б В.2.7-273:2011 Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови (ГОСТ 23732-79, MOD)



**ДОДАТКИ**  
**ДОДАТОК А**  
**ДОВІДКОВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ**  
**КОНСТРУКЦІЙ ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД**

Таблиця А.1

**Параметри окремих боеприпасів**

Назва снаряду або патрону	Калібр патрону або снаряду, мм	Початков а швидкість, м/с	Вага боеприпасу, кг	Висота головної частини снаряду, мм	Зброя
Патрон з бронейно-запальною кулею - 12,7 Б-32 (57-БЗ-542 і 7-БЗ-2)	12,7	818	0,0482	33,43	<i>Крупно-каліберні кулемети ДШКМ, НСВ-12,7 «Утес» (НСВТ и НСВС), «КОРД», ЯКБ-12,7, крупно-каліберні снайперські гвинтівки АСВК «КОРД» и ОСВ-96</i>
Патрон з бронейно-запальною кулею - 12,7 БС (7-БЗ-1)		818	0,0554	33,43	
Патрон із запальною кулею миттєвого дії - 12,7 МДЗ (7-З-2)		828	0,043	33,43	
Двухпульний патрон - 12,7 ІСЛГ (9-А-4427)		730 700	0,031 0,027	33,43 33,43	
Снайперський патрон - 12,7 СН (7Н34)		785	0,059	33,43	
Осколково-фугасно-запальний снаряд (ОФЗ)	30	960	0,390	45,4	<i>2А42 або 2А72 (БМП-2, БМП-3, БМД-2, БМД-3, БРМ «Рысь»), вертоліт (Ка-50, Ми-28), автомат 2А38</i>
Осколково-трасуючий снаряд (ОТ);		960	0,388	77,6	
Бронейно-трасуючий і бронейний снаряд (БТ і Б);		970	0,400	78,4	
Бронейно-підкаліберний снаряд (БП).		1120	0,304	78,4	
Кумулятивний снаряд ЗБК18М	125	905	29	280	<i>Танки Т-64/72/80/90</i>
Осколково-фугасний снаряд ЗОФ26		850	33	280	
Кумулятивний снаряд ЗБК29М		970	28,4	280	

Таблиця А.2

## Міцнісні та деформаційні характеристики фібробетону

Характеристика	Розмірність	Клас міцності бетону														
		C10	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C70	C80	C90	C100
$f_{fck,cube}$	МПа	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100
$f_{fcm,cube}$	МПа	13	19	25	32	38	45	51	58	64	71	77	89	1103	1116	1129
$f_{fck,prism}$	МПа	7,5	11	15	18,5	22	25,5	29	32	36	39,5	43	50	57	64	71
$f_{fcd}$	МПа	6,0	8,5	11,5	14,5	17	19,5	22	25	27,5	30	33	37	41	44	47,5
$f_{fctm}$	МПа	1,2	1,6	1,9	2,2	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,1				
$f_{fctd}$	МПа	0,56	0,75	0,90	1,05	1,15	1,30	1,4	1,50	1,60	1,7	1,8-3,6	1,9-3,8	2,1-4,2	2,15-4,3	2,2-4,4
$f_{fctk}$	МПа	0,85-1,7	1,10-2,2	1,35-2,7	1,55-3,1	1,75-3,5	1,95-3,9	2,1-4,2	2,25-4,5	2,45-4,9	2,6-5,2	2,75-5,5	3,0-6,0	3,3-6,6	3,6-7,2	3,8-7,6
$f_{fctk,0,05}$	МПа	0,8	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,1	2,2	2,5	2,7	3,0				
$f_{fctk,0,95}$	МПа	1,6	2,0	2,5	2,9	3,4	3,6	3,9	4,2	4,6	4,9	5,3				
$E_{fcm}$	ГПа	18	23	27	30	32,5	34,5	36	37,5	39	39,5	40	41	42	42,5	43
$E_{fck}$	ГПа	15	20	23	26	29	31	32	34	35	36	37				
$E_{fcd}$	ГПа	12,6	16,3	20	23	25	27	28,5	30,5	32	33	34				
$\epsilon_{fcl,ek}$	$\text{‰}$	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
$\epsilon_{fct1}$	$\text{‰}$	3,5										3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
$\epsilon_{fct,3}$	$\text{‰}$	1,75										1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
$\epsilon_{fctn,3}$	$\text{‰}$	3,5										3,1	2,9	2,7	2,6	2,6



Міцнісні та деформаційні характеристики звичайної арматури

<i>Характеристика арматури</i>	<i>Клас арматури</i>				
	<i>A240C</i>	<i>A400C</i>	<i>A500C</i>		<i>B500</i>
<i>Стандарт</i>	<i>ДСТУ 3760</i>	<i>ДСТУ 3760</i>	<i>ДСТУ 3760</i>		<i>ДСТУ ENV 10080</i>
<i>Діаметр, мм</i>	<i>10-40</i>	<i>6-40</i>	<i>8-22</i>	<i>25-32</i>	<i>3-12</i>
<i>f<sub>yk</sub>, МПа</i>	<i>240</i>	<i>400</i>	<i>500</i>		<i>500</i>
<i>f<sub>yd</sub>, МПа</i>	<i>225</i>	<i>365</i>	<i>435</i>	<i>415</i>	<i>415</i>
<i>f<sub>ywd</sub>, МПа</i>	<i>170</i>	<i>285</i>	<i>300</i>		<i>300</i>
<i>E<sub>s</sub>, МПа</i>	<i>2,1×10<sup>5</sup></i>	<i>2,1×10<sup>5</sup></i>	<i>2,1×10<sup>5</sup></i>		<i>1,9×10<sup>5</sup></i>
<i>ε<sub>ud</sub>, ‰</i>	<i>0,025</i>	<i>0,025</i>	<i>0,02</i>		<i>0,012</i>

Таблиця А.4

## Сортамент арматури

Номінальний діаметр, мм	Розрахункова площа поперечного перерізу, см <sup>2</sup>									Маса 1 кг/мп	Діаметр арматури класів		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		A240C	A400C	A500C
<b>5,5</b>	0,238	0,476	0,714	0,952	1,19	1,428	1,666	1,904	2,142	<b>0,187</b>	+	-	-
<b>6</b>	0,283	0,57	0,85	1,13	1,41	1,7	1,98	2,26	2,55	<b>0,222</b>	+	+	+
<b>8</b>	0,503	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,53	<b>0,395</b>	+	+	+
<b>10</b>	0,785	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07	<b>0,617</b>	+	+	+
<b>12</b>	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,18	<b>0,888</b>	+	+	+
<b>14</b>	1,54	3,08	4,62	6,16	7,69	9,23	10,77	12,31	13,85	<b>1,21</b>	+	+	+
<b>16</b>	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,07	14,08	16,09	18,10	<b>1,58</b>	+	+	+
<b>18</b>	2,54	5,09	7,63	10,18	12,72	15,27	17,82	20,36	22,91	<b>2,00</b>	+	+	+
<b>20</b>	3,14	6,28	9,42	12,56	15,71	18,85	21,99	25,14	28,28	<b>2,47</b>	+	+	+
<b>22</b>	3,80	7,60	11,40	15,20	19,00	22,81	26,61	30,41	34,21	<b>2,98</b>	+	+	+
<b>25</b>	4,91	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,18	<b>3,85</b>	+	+	+
<b>28</b>	6,16	12,32	18,47	24,63	30,79	36,95	43,11	49,26	55,42	<b>4,83</b>	+	+	+
<b>32</b>	8,04	16,09	24,13	32,17	40,21	48,25	56,30	64,34	72,38	<b>6,31</b>	+	+	+
<b>36</b>	10,18	20,36	30,54	40,72	50,89	61,07	71,25	81,43	91,61	<b>7,99</b>	+	+	+
<b>40</b>	12,56	25,13	37,70	50,27	62,83	75,40	87,96	100,5	113,1	<b>9,86</b>	+	+	+

Таблиця А.5

Значення параметрів  $k_z$  при плоскому згині для прямокутних перерізів із одиничним армуванням

№ з/п	Механічний коефіцієнт армування $\omega$												
	0	0,0-0,10		0,10	0,1-0,15		0,15	0,15-0,20		0,20	0,20-0,25		0,25
		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$	
1	0,000	0,000	5,678	0,568	0,048	5,196	0,828	0,096	4,874	1,071	0,161	4,553	1,299
№ з/п	Механічний коефіцієнт армування $\omega$												
	0,25	0,25-0,30		0,30	0,3-0,35		0,35	0,35-0,40		0,40	0,40-0,45		0,45
		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$	
2	1,299	0,241	4,231	1,511	0,338	3,910	1,706	0,450	3,588	1,885	0,744	2,852	2,028
№ з/п	Механічний коефіцієнт армування $\omega$												
	0,45	0,45-0,50		0,50	0,50-0,60		0,60	0,60-0,70		0,70	0,70-1,0		1,0
		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$	
3	2,028	1,649	0,841	2,070	1,722	0,696	2,140	1,808	0,554	2,195	1,928	0,382	2,310
№ з/п	Механічний коефіцієнт армування $\omega$						Формула визначення $k_z = \alpha + \beta \times \omega$	Формула визначення механічного коефіцієнту армування $\omega = (k_z - \alpha) / \beta$					
	1,0	1,0-2,0		2,0	2,0-3,0				3,0				
		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$							
4	2,310	2,143	0,166	2,476	2,345	0,065	2,542						

Таблиця А.6

Значення параметрів  $k_z$  армування за плоского згину для прямокутних перерізів із симетричним армуванням

№ з/н	<b>Механічний коефіцієнт армування <math>\omega</math></b>												
	<b>0</b>	0.0-0.10		<b>0.10</b>	0.1-0.15		<b>0.15</b>	0.15-0.20		132	0.20-0.25		<b>0.25</b>
		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$	
<b>1</b>	<b>0.000</b>	0.000	2.923	<b>0.292</b>	0.018	2.743	<b>0.429</b>	0.022	2.715	<b>0.565</b>	0.026	2.695	<b>0.700</b>
№ з/н	<b>Механічний коефіцієнт армування <math>\omega</math></b>												
	<b>0.25</b>	0.25-0.30		<b>0.30</b>	0.3-0.35		<b>0.35</b>	0.35-0.40		<b>0.40</b>	0.40-0.45		<b>0.45</b>
		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$	
<b>2</b>	<b>0.700</b>	0.030	2.680	<b>0.834</b>	0.034	2.667	<b>0.967</b>	0.038	2.656	<b>1.100</b>	0.042	2.646	<b>1.232</b>
№ з/н	<b>Механічний коефіцієнт армування <math>\omega</math></b>												
	<b>0.45</b>	0.45-0.50		<b>0.50</b>	0.50-0.60		<b>0.60</b>	0.60-0.70		<b>0.70</b>	0.70-1.0		<b>1.0</b>
		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$	
<b>3</b>	<b>1.232</b>	0.046	2.637	<b>1.364</b>	0.052	2.625	<b>1.627</b>	0.060	2.611	<b>1.888</b>	0.078	2.586	<b>2.664</b>
№ з/н	<b>Механічний коефіцієнт армування <math>\omega</math></b>							Формула визначення $k_z = \alpha + \beta \times \omega$	Формула визначення механічного коефіцієнту армування $\omega = (k_z - \alpha) / \beta$				
	<b>1.0</b>	1.0-2.0		<b>2.0</b>	2.0-3.0		<b>3.0</b>						
		$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$							
<b>4</b>	<b>2.664</b>	0.478	2.186	<b>4.850</b>	1.207	1.821	<b>6.671</b>						

Таблиця А.7

## Параметри демпферних пружин стиснення

<i>Показник</i>	<i>Позначення пружини</i>				
	<i>П-1</i>	<i>П-2</i>	<i>П-3</i>	<i>П-4</i>	<i>П-5</i>
<i>Нормативний документ</i>	-	-	<i>ГОСТ</i> <i>1086-1257</i>	<i>ГОСТ</i> <i>1086-1276</i>	<i>ГОСТ</i> <i>1086-1289</i>
<i>m, кг</i>	3.05	10.1	8.8	21.9	42.8
<i>d, м</i>	0.015	0.029	0.022	0.036	0.04
<i>G, МПа</i>	80000	80000	80000	80000	80000
<i><math>\tau</math>, МПа</i>	530	400	500	500	500
<i>n</i>	10	6	9	6	8
<i>R, м</i>	0.0275	0.0555	0.0515	0.072	0.085
<i>W, Дж</i>	294.5	759.3	950.4	2371.9	4609.4

Таблиця А.8

## Коефіцієнти піддатливості проникненню матеріалів

№ з/п	Назва матеріалу	Коефіцієнт піддатливості проникненню матеріалу $k_{np} \times 10^7$
1	Грунт рихлий, насипний	130...170
2	Грунт звичайний	110...130
3	Глина середньої	70...100
4	Мерзлий грунт	35
5	Суглинок	60...80
6	Пісок природної вологості	45...70
7	Пісок водонасичений	60...90
8	Супісок	50...70
9	Вапняк	18...20
10	Скельний грунт	14...17
11	Дерево (хвойні породи)	-
12	Цегляна кладка	20...25
13	Бетон середньої міцності	12...15
14	Залізобетон	7...9

Таблиця А.9

Коефіцієнти  $\omega$  і  $\beta$  для високоміцних бетонів

$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$	Клас бетону							
	С60		С80		С100		С80*	
	$\omega$	$\beta$	$\omega$	$\beta$	$\omega$	$\beta$	$\omega$	$\beta$
0.1	0.086	0.057	0.072	0.047	0.067	0.044	0.077	0.051
0.2	0.162	0.106	0.131	0.085	0.128	0.084	0.142	0.093
0.3	0.232	0.151	0.184	0.119	0.188	0.124	0.201	0.131
0.4	0.297	0.194	0.236	0.154	0.247	0.164	0.258	0.168
0.5	0.360	0.234	0.290	0.190	0.308	0.204	0.315	0.206
0.6	0.420	0.273	0.346	0.228	0.369	0.245	0.373	0.244
0.7	0.476	0.309	0.404	0.267	0.428	0.284	0.430	0.282
0.8	0.529	0.342	0.461	0.305	0.485	0.321	0.486	0.319
0.9	0.578	0.371	0.515	0.341	0.538	0.354	0.538	0.352
1.0	0.619	0.395	0.562	0.370	0.583	0.381	0.584	0.381
1.1	0.653	0.413	0.601	0.392	0.621	0.401	0.623	0.402
1.2	0.679	0.424	0.630	0.404	0.648	0.414	0.651	0.414
1.3	0.695	0.426	0.647	0.408	0.667	0.418	0.669	0.418
1.4	0.701	0.421	0.653	0.402	0.677	0.416	0.676	0.414
1.5	0.697	0.409	0.652	0.391	0.680	0.409	0.675	0.403
1.6	0.685	0.390	0.649	0.380	0.681	0.402	0.669	0.389
1.7	0.667	0.366	0.651	0.376	0.686	0.400	0.663	0.377
1.8	0.645	0.342	0.671	0.390	0.703	0.410	0.666	0.376
1.9	0.626	0.321	0.724	0.436	0.741	0.441	0.689	0.394
2.0	0.613	0.308	0.830	0.532	0.816	0.507	0.746	0.444

\*- бетон дрібнозернистий



## ДОДАТОК Б

### ДОВІДКОВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ СКЛАДІВ БЕТОНУ

Таблиця Б.1

Цементи, що виготовляються в Україні

Цементний завод	Тип портландцементу
Волинь-Цемент філія ПАТ Дікергофф Цемент Україна м. Здолбунів	Портландцемент ПЦ І-500Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400
	Портландцемент тампонажний ПЦТ І-100
	Портландцемент тампонажний ПЦТ ІІ-50.
ЮГцемент філія ПАТ Дікергофф Цемент Україна, м. Миколаїв	Портландцемент ПЦ І-500Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/Б-Ш-400Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/Б-Ш-300
	Сульфатостійкий шлакопортландцемент СС ШПЦ-400-Д60.
ПАТ "Подільський цемент", м. Кам'янець- Подільський  ПАТ "Миколаївцемент", м. Миколаїв Львівської обл.	Портландцемент ПЦ І-500
	Портландцемент ПЦ І-500 Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/Б-К(Ш-З)-400
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400 Р
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400
	Сульфатостійкий шлакопортландцемент СС ШПЦ 400-Д60
ВАТ "Івано- Франківськцемент	Портландцемент ПЦ І-500Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш 400Р-Н
	Шлакопортландцемент ШПЦ ІІ/А-400Р
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-П-400Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/Б-К(Ш-В-П)-400Р- Н





	Сульфатостійкий портландцемент ССПЦ 400–Д20
	Цемент для будівельних розчинів марки 300 ЦБР 300
	Тампонажний цемент марки ПЦТ I-100
	Тампонажний цемент марки ПЦТ II-50
	Цемент для дорожніх бетонів
	Сульфатостійкий портландцемент ССПЦ 400-Д0
	Портландцемент ПЦ II/A-II-500P-H
ПрАТ "ХайдельбергЦемент Україна" Криворізький Завод Дніпродзержинський Завод	Портландцемент ПЦ II/БШ-400
	Портландцемент ПЦІ-500
	Цемент для будівельних розчинів ЦБР 300
	Шлакопортландцемент ШПЦ III/A-400
ПрАТ "Свроцемент-Україна" м. Балаклія Харківської област	Портландцемент для азбестоцементних виробів ПЦА
	Портландцемент ПЦ I-500 –H
	Портландцемент ПЦ II/A-500
	Портландцемент ПЦ II/A-III-400 P
	Портландцемент ПЦ II/Б-III-400
	Шлакопортландцемент ШПЦ III/A-III-400
	Сульфатостійкий шлакопортландцемент СС ШПЦ-400

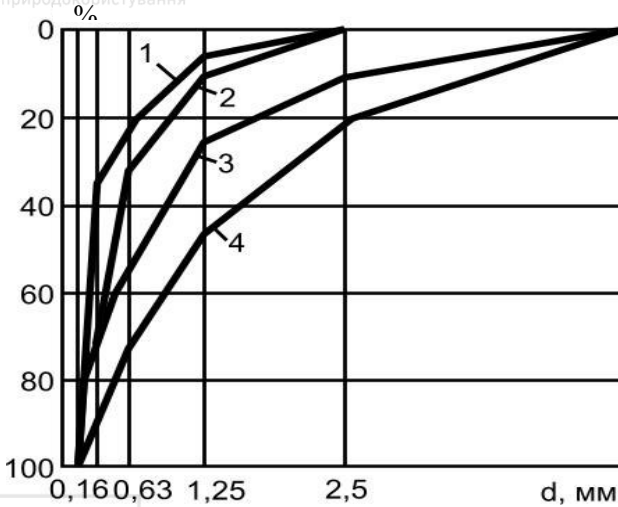


Рис. Б.1. Зерновий склад піску для бетонів:

1, 2 – нижня границя крупності, що допускається ( $M_{кр}=1,5$ ) і рекомендується ( $M_{кр}=2$ );

3, 4 – верхня границя крупності, що рекомендується ( $M_{кр}=2,5$ ) і допускається ( $M_{кр}=2,25$ );

А – повний залишок на ситах розміром d

Таблиця Б.2

Рекомендований вміст окремих фракцій в крупному  
заповнювачі

Найбільша крупність заповнювача, мм	Вміст фракцій, %				
	5...10мм	10...20мм	20...40мм	40...70мм	>70мм
20	25...40	60...75	-	-	-
40	15...25	20...35	40...65	-	-
70	10...20	15...25	20...35	35...65	-
120	5...10	10...20	15...25	20...30	30...40



Таблиця Б.3

Рекомендований склад суміші фракцій крупного заповнювача

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

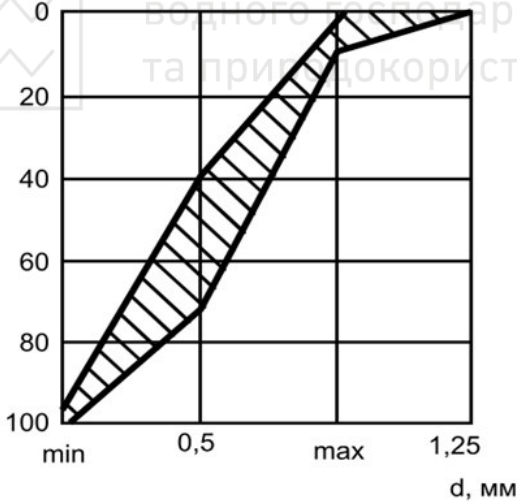
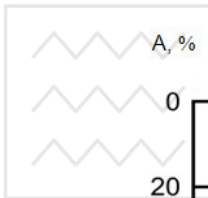


Рис. Б.2. Рекомендований склад крупного заповнювача



Таблиця Б.4

Втрата маси заповнювачами бетону, % за масою при визначенні марки за дробимістю

Марка заповнювача за дробимістю	Щебінь із осадових і метаморфічних порід	Щебінь із вивержених порід		Гравій
		із інтрузивних	із ефузивних	
1400	-	до 12 вкл.	до 9 вкл.	-
1200	до 11 вкл.	вище 12 до 16 вкл.	вище 9 до 11 вкл.	-
1000	вище 11 до 13 вкл.	вище 16 до 20 вкл.	вище 11 до 163 вкл.	до 8 вкл.
800	вище 13 до 15 вкл.	вище 20 до 25 вкл.	вище 13 до 15 вкл.	вище 8 до 12
600	вище 15 до 19 вкл.	вище 25 до 34 вкл.	вище 15 до 20 вкл.	вище 12 до 16
400	вище 19 до 24 вкл.	-	-	вище 16 до 24
300	вище 24 до 28 вкл.	-	-	-
200	вище 28 до 35 вкл.	-	-	-

Таблиця Б.5

Допустимий вміст шкідливих домішок у заповнювачах для

Вид домішок	Граничний вміст
Аморфні різновиди діоксиду кремнію, розчинні в лугах, сірка, сульфідні (крім піриту) у перерахунку на $SO_2$ для крупного заповнювача для дрібного заповнювача	не більше 50 моль/л не більше 1,5% за масою не більше 1,0% за масою
Шаруваті силікати (слюди, гідрослюди, хлорити та ін.) для крупного заповнювача для дрібного заповнювача	не більше 15% за об'ємом не більше 2% за масою
Магнетит, гідрослюди заліза, апатит, нефелін, фосфорит	не більше 15% за об'ємом (кожний окремо не більше 10%)
Галоїди в перерахунку на іон хлору для крупного заповнювача для дрібного заповнювача	не більше 0,1% за масою не більше 0,15% за масою
Азбестове волокно	не більше 0,25% за масою
Вугілля	не більше 1% за масою



Таблиця Б.6

Види добавок-модифікаторів

Вид добавок	Призначення добавок
Регулюють властивості готових до використання бетонних сумішей	Пластифікуючі Стабілізуючі Регулюючі стабільність рухомості Поризуючі Повітровтягувальні Піноутворюючі Газоутворюючі
Змінюють властивості бетону та регулюють кінетику їх тверднення	Прискорюючі тверднення Сповільнюючі тужавлення Підвищуючі міцність Знижуючі проникність Підвищуючі захисні властивості по відношенню до сталльної арматури Підвищуючі морозостійкість Підвищуючі сульфатостійкість Підвищуючі стійкість до корозії, що викликана реакцією кремнезему заповнювачів з лугами цементу і добавок Регулюючі процеси усадки та розширення
Надають бетонам спеціальних властивостей	Протиморозні Гідрофобізуючі Біоцидні Підвищують стійкість до утворення висолів

Таблиця Б.7

Класифікація пластифікаторів бетонних сумішей

Категорія	Найменування	Ефективна пластифікуюча дія (підвищення ОК з 2...4 см), см	Зменшення кількості води, %
I	Суперпластифікатори	До 20 і більше	не менше 20
II	Пластифікатори	14...19	не менше 10
III	Пластифікатори	9...13	не менше 5
IV	Пластифікатори	8 і менше	менше 5



Таблиця Б.8

Класифікація суперпластифікаторів

Позначення	Склад СП	Механізм дії
НФ	На основі сульфованих нафталінформальдегідних поліконденсатів	Електростатичний
МФ	На основі сульфованих меламіноформальдегідних поліконденсатів	Електростатичний
ЛСТ	На основі очищених від цукрів лігносульфонатів	Електростатичний
П	На основі полікарбоксилатів і поліакрилатів	Стеричний

Таблиця Б.9

Міцність бетону нормального твердіння із застосуванням  
добавок-прискорювачів

Добавка	Вміст добавки, % маси цементу	Відносна міцність бетону, % від 28-добової бетону без добавок, у віці		
		1 доби	3 діб	28 діб
Бетон без добавки	0	26	63	100
Хлорид кальцію	1	40	83	116
Хлорид натрію	1	43	90	102
Нітрат натрію	1	36	79	115
Сульфат алюмінію + хлорид кальцію	3+1	38	84	140
Хлорид алюмінію	1	37	60	100
Нітрат кальцію	3	36	79	114
Нітрат кальцію	5	39	78	108



Таблиця Б.10

Наростання міцності бетону з протиморозними добавками

Добавка	Розрахункова температура твердіння бетону, °C	Міцність, % від проектної $\eta$ , за період часу $\tau$ , діб			
		7	14	28	90
Нітрит натрію (НН)	-5	30	50	70	90
	-10	20	35	55	70
	-15	10	25	35	50
Хлорид кальцію + хлорид натрію (ХК+ХН)	-5	35	65	80	100
	-10	25	35	45	70
	-15	15	25	35	50
нітрит-нітрат-хлорид кальцію (ННХК)	-5	40	60	80	100
	-10	25	40	50	80
	-15	20	35	45	70
	-20	15	30	40	60

Таблиця Б.11

Рекомендовані витрати протиморозних добавок

Розрахункова температура твердіння бетону, °C		Витрата протиморозних добавок, % від маси цементу		
від	до	НН	ХК+ХН	ННХК
0	-5	4...6	3...5	3...5
-6	-10	6...8	6...7	6...9
-11	-15	8...10	7,5...8,5	7...10
-16	-20	-	8,5...10	8...12
-21	-25	-	-	10...14...14



Таблиця Б.12

Вимоги до золи як добавки в бетон

Показники	Значення показників для золи виду (класу)		
	I (A і B)	II (A і B)	III (A)
Вміст $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , % за масою, не менше, для золи: антрацитової і кам'яновугільної буровугільної	70	Не нормується	70
	50	Те ж саме	50
Вміст сірчаних і сірчаноокислих сполук у перерахунку на $\text{SO}_3$ , % за масою, не більше	3	3,5	3
Вміст вільного оксиду кальцію ( $\text{CaO}$ ), % за масою, не більше	3	5	2
Вміст оксиду магнію ( $\text{MgO}$ ), % за масою, не більше	5	5	5
Втрати при прожарюванні, % за масою, не більше, для золи: антрацитової кам'яновугільної буровугільної	15	20	5
	7	10	5
	5	5	3
Вологість, % за масою, не більше	3	3	3





Класи бетону за міцністю на стиск

Клас бетону за міцністю на стиск	Мінімальна міцність на стиск зразків-циліндрів діаметром 150 мм і довжиною 300 мм у віці 28 діб, МПа	Мінімальна міцність на стиск зразків-кубів із ребром 150 мм у віці 28 діб, МПа
Звичайні бетони		
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
Високоміцні бетони		
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C90/105	90	105
C100/115	100	115



Таблиця Б.14

Значення коефіцієнта необхідної міцності  $k_f$

Коефіцієнт варіації міцності бетону $V_{cm}$ , %	Значення коефіцієнта необхідної міцності $k_f$ для бетону	
	усіх видів(крім щільних силікатних, ніздрюватих) і конструкцій, окрім масивних гідротехнічних	для масивних гідротехнічних конструкцій
6 і менше	1,07	1,09
7	1,08	1,10
8	1,09	1,11
9	1,10	1,13
10	1,14	1,14
11	1,18	1,16
12	1,23	1,18
13	1,28	1,20
13,5	1,31	1,21
14	1,33	1,22
15	1,38	1,23
16	1,43	1,25
17		1,28
18		1,32
19		1,36
20		1,39

Таблиця Б.15

Значення коефіцієнта  $A$  (за В.П.Сізовим)

Вид заповнювача	Вміст глини, пілу і мулу в щебені (гравій) і піску, %	Значення коефіцієнта $A$ для бетону на		
		щебені	гравію гірському	гравію річковому і морському
Щебень (гравій) пісок	0 0	0,64	0,6	0,57
Щебень (гравій) пісок	0 3	0,61	0,56	0,53
Щебень (гравій) пісок	1 3	0,58	0,53	0,5
Щебень (гравій) пісок	2 3	0,55	0,5	0,47
Щебень (гравій) пісок	2 5	0,52	0,47	0,44



Таблиця Б.16

Вихід міцності бетону на стиск при різних температурах та тривалості тверднення ( $A_{t,t}$ )

Бетон	Термін тверднення, діб	Середня температура бетону, °С					
		0	5	10	20	30	40
C12/15 на портланд- цементі М300	1	0,04	0,06	0,10	0,18	0,27	0,36
	3	0,12	0,20	0,25	0,40	0,52	0,65
	7	0,30	0,40	0,50	0,65	0,74	0,85
	14	0,40	0,55	0,65	0,80	0,90	1,00
	28	0,55	0,68	0,80	1,00	-	-
C12/15...16/20 на портландцементі М400	1	0,05	0,09	0,12	0,23	0,35	0,45
	3	0,18	0,27	0,37	0,50	0,65	0,77
	7	0,35	0,48	0,58	0,75	0,90	1,00
	14	0,50	0,62	0,72	0,90	1,00	-
	28	0,65	0,77	0,85	1,00	-	-
C25/30 на портландцементі М500	1	0,08	0,12	0,18	0,28	0,40	0,55
	3	0,22	0,32	0,45	0,60	0,74	0,85
	7	0,40	0,55	0,66	0,82	0,92	1,00
	14	0,57	0,70	0,80	0,92	1,00	-
	28	0,70	0,80	0,90	1,00	-	-
C12/15 на шлакопортланд- цементі М 300	1	-	0,03	0,06	0,12	0,20	0,35
	3	0,07	0,12	0,18	0,30	0,46	0,63
	7	0,18	0,25	0,40	0,55	0,70	0,92
	14	0,25	0,40	0,5	0,75	0,90	-
	28	0,35	0,55	0,70	1,00	-	-
C12/15...16/20 на шлакопортланд- цементі М 400	1	0,03	0,06	0,10	0,16	30	40
	3	0,13	0,18	0,25	0,40	55	70
	7	0,25	0,34	0,43	0,65	70	100
	14	0,35	0,50	0,60	0,80	96	-
	28	0,45	0,65	0,80	1,00	-	-



Таблиця Б.17

Значення коефіцієнтів в рівнянні (2.9)

Класи бетону	t=5...40° C		
	a	b	c
C 15...25	0,242	0,0115	0,008
C 30...40	0,218	0,0134	0,063
C 60...100	0,182	0,0145	0,2

Таблиця Б.18

Розрахункові значення показників властивостей бетону  
(портландцемент М500)

Властивість бетону	Розрахункові формули
Міцність бетону на розтяг при згині ( $f_{c,tf}$ ), МПа	$f_{c,tf} = 0,08 (10 f_{cm})^{2/3}$ (1)
	$f_{c,tf} = 1.74 \cdot f_{c,t}$ (1a)
	$f_{c,tf} = 0,045 R_y (\text{Ц}/B + 0,064)$ (2)
Міцність бетону на розколюванні ( $f_{c,m}$ ), МПа	$f_{c,m} = 0,055 (10 f_{cm})^{2/3}$ (3)
	$f_{c,m} = 0,031 R_y (\text{Ц} / B + 0,064)$ (4)
Міцність бетону при осьовому розтягу ( $f_{c,t}$ ), МПа	$f_{c,t} = 0,046 (10 f_{cm})^{2/3}$ (5)
	$f_{c,t} = 0,026 R_y (\text{Ц}/B + 0,064)$ (6)
Динамічний модуль пружності ( $E_d$ ), $10^4$ МПа	$E_d = \frac{4 \cdot 10^3 f_{cm}}{1 + 0,07 f_{cm}}$ (7)
	$E_d = 205 R_y (\text{Ц}/B + 2,18)$ (8)



Таблиця Б.19

Емпіричні залежності для розрахунку складів дорожніх і  
гідротехнічних бетонів

Властивості бетону	Формула	Умовні позначення
Морозостійкість	$F = A_1 f_{cm}^{A_2} \exp^{A_3 V_{e,n}} \quad (9)$	$A_1, A_2, A_3$ – коефіцієнти ( $A_3 \approx 0,35$ )
Водонепроникність	$K_\phi = A f_{cm}^n \quad (10)$ $A \approx 126, n \approx -7,7$	$K_\phi$ – коефіцієнт фільтрації; $f_{cm}$ – міцність бетону при стиску, МПа
Модуль пружності	$E_o \cdot 10^{-4} = \frac{5,3 \cdot f_{cm}}{85 P_k + f_{cm}} \quad (11)$	$P_k$ – об'ємна концентрація цементного каменя в бетоні

Таблиця Б.20

Об'єм втягнутого повітря, що рекомендується для бетону з  
підвищеною морозостійкістю ( $F \geq 200$ )

Максимальна крупність заповнювача, мм	Об'єм втягнутого повітря у бетонній суміші, % при В/Ц		
	менше 0,41	0,41...0,50	більше 0,50
10	2...4	3...5	5...7
20	1...3	2...4	4...6
40	1...3	1...3	3...5
60	1...3	1...3	2...4

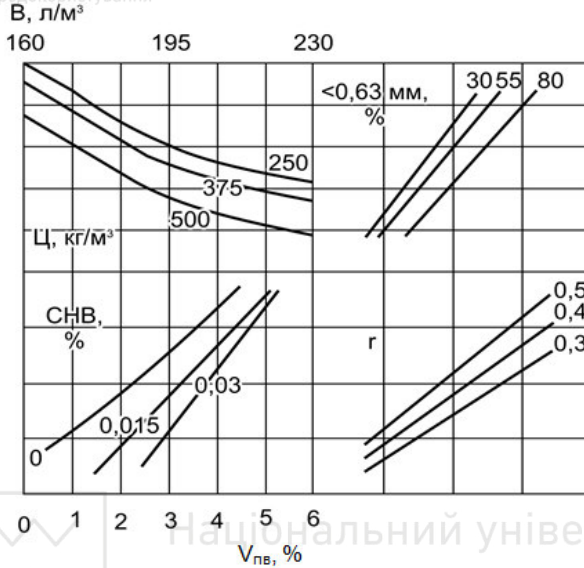


Рис. Б.3. Номограма для визначення об'єму втягнутого повітря  $V_{пв}$ , % у залежності від факторів складу бетонної суміші

Таблиця Б.21

Зв'язок між марками бетону за водонепроникністю та коефіцієнтом фільтрації

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



Таблиця Б.22

Рекомендована витрата золи у важких бетонах

ОК, см	Марка цементу	Витрата золи, кг/м <sup>3</sup> для бетонів	
		пропарених	нормального тверднення
1...4	400	170	150
	500	180	150
5...9	400	190	170
	500	200	180
10...14	400	210	190
	500	215	200

Таблиця Б.23

Значення коефіцієнта “цементуючої ефективності” золи  
Бурштинської ТЕС

Клас бетону за міцністю	Коефіцієнт $K_{ц.е.}$ для бетону		
	пропареного	нормального твердіння при марці цементу	
		500	400
C8/10	0,5	0,38	0,31
C12/15	0,40	0,28	0,20
C16/20	0,37	0,25	0,18
C20/25	0,25	0,16	0,10
C25/30	0,20	0,13	0,08



Таблиця Б.24

Показники легкоукладальності бетонної суміші залежно від  
виду конструкцій і способу укладки

Конструкції	Спосіб укладки бетонної суміші		
	з вібрацією		без вібрації
	ОК, см	Ж, с	ОК, см
Збірні залізобетонні з негайним розпалубленням	0	90...35	-
Підготовка під фундаменти і підлоги	1...2	35...25	2...3
Каркасні залізобетонні (плити, балки, колони)	8...4	15...10	6...12
Залізобетонні з густо розташованою арматурою (бункери, силоси та ін.)	8...10	10...15	12...15
Касети і елементи для об'ємно-збірного домобудування	12...18	-	-
Буронабивні сваї, шахтні стовбури	16...20	-	-
Конструкції дуже насичені арматурою і закладними деталями, які заважають укладці пластичних сумішей із вібруванням	20...24	-	-





Таблиця Б.25

Орієнтовна витрата води ( $V_0$ ) залежно від виду заповнювачів і  
легкоукладальності бетонної суміші

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

**Примітка.** 1. При збільшенні вмісту в щебені мулу та пилу понад 1% і частинок менше 5 мм вище 5% витрата води збільшується на 1...2 л на кожний відсоток. При збільшенні вмісту в піску мулу та пилу більше 3% – на 2 л/м<sup>3</sup> на кожний відсоток. 2. Витрата води замішування наведена для бетонних сумішей, виготовлених на щебені з магматичних порід. Для бетонів на гравії витрата води зменшується на 10 л/м<sup>3</sup>. 3. Витрата води дана для бетонних сумішей на портландцементі з нормальною густиною цементного тіста 26...28%, і середньозернистому піску ( $M_k=2...2,5$ ) без пластифікуючих добавок. При зміні нормальної густоти цементного тіста на кожний відсоток у бік зменшення витрата води зменшується на 3...5 л, у бік збільшення – збільшується на 3...5 л. При зміні модуля крупності піску на кожні 0,5 у бік зменшення витрата води збільшується на 3...5 л, у бік збільшення – зменшується на 3...5 л.



Таблиця Б.26

Поправки для коригування водопотреби бетонної суміші

№	Фактори, які враховуються	Поправки $\Delta B$ , л/м <sup>3</sup>
I. Порода і вид крупного заповнювача		
1.	Щебінь із метаморфічних і осадових порід із межею міцності 40...80 МПа	$\Delta B_1 = B_0 + (4...13)$
2.	Гірський гравій	$\Delta B_2 = B_0 - (5...10)$
3.	Морський і річковий гравій	$\Delta B_3 = B_0 - (9...15)$
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%	$\Delta B_6' = B_0 + X_1$ $\Delta B_6'' = B_0 + 2X_2$
II. Крупність і забрудненість піску		
7.	Зміна модуля крупності піску на кожні 0,5 менше 3 ( $X_3$ )	$\Delta B_7 = B_0 + (3...5)X_3$
	більше 3 ( $X_4$ )	$\Delta B_7' = B_0 - (3...5)X_4$
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% ( $X_6$ )	$\Delta B_{11} = B_0 + 4X_6$
	менше 28% ( $X_7$ )	$\Delta B_{11}' = B_0 - 4X_6$
12.	Зміна витрати цементу на кожні 10 кг понад 350 кг/м <sup>3</sup> ( $X_7$ )	$\Delta B_{12} = B_0 + X_7$
III. Температура бетонної суміші, °C		
	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	$\Delta B_{13} = B_0 + 11$

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



Таблиця Б.27

Поправочні коефіцієнти при використанні пластифікуючих  
добавок

Рухомість, см	Жорст- 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>
		<u>0,88</u>	<u>0,85</u>	<u>0,83</u>	<u>0,81</u>	<u>0,80</u>
		0,77	0,75	0,73	0,71	0,7
1...4	-	<u>0,93</u>	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	<u>0,92</u>	<u>0,91</u>
		<u>0,86</u>	<u>0,84</u>	<u>0,82</u>	<u>0,80</u>	<u>0,79</u>
		0,76	0,74	0,72	0,7	0,69
5...9	-	<u>0,91</u>	<u>0,91</u>	<u>0,90</u>	<u>0,90</u>	<u>0,89</u>
		<u>0,82</u>	<u>0,80</u>	<u>0,79</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>
		0,71	0,7	0,69	0,68	0,67
10...16		<u>0,90</u>	<u>0,89</u>	<u>0,88</u>	<u>0,87</u>	<u>0,87</u>
		<u>0,80</u>	<u>0,78</u>	<u>0,77</u>	<u>0,76</u>	<u>0,75</u>
		0,69	0,67	0,66	0,65	0,64

**Примітка.** У верхньому ряду наведені значення при застосуванні добавок на основі лігносульфонатів (ЛСТ) в кількості 0,25% від маси цементу, у середньому ряду – на нафталін-сульфонатній основі (Н) в кількості 0,7% від маси цементу, у нижньому ряду – на полікарбоксилатній основі (П) – 0,7% від маси цементу

Таблиця Б.28

Мінімальна витрата цементу в бетоні

Вид конструкції	Умови експлуатації	Вид і витрата цементів		
		ПЦ-Д0 ПЦ-Д5 ССПЦ- Д0	ПЦ-Д20 ССПЦ- Д20	ШПЦ ССШПЦ ПУщПЦ
Неармовані	Без атмосферного впливу	Не нормується		
	При атмосферному впливі	150	170	170
Армовані з не напруженою арматурою	Без атмосферного впливу	150	170	180
	При атмосферному впливі	200	220	240
Армовані з попередньо напруженою арматурою	Без атмосферного впливу	220	240	270
	При атмосферному впливі	240	270	300



Таблиця Б.29

Орієнтовні значення частки піску ( $r$ ) у суміші заповнювачів

Витрата цементу, кг/м <sup>3</sup>	Максимальна крупність зерен щебеню, гравію, мм	Модуль крупності піску	$r$ при використанні	
			щебеню	гравію
250	20	1,5...2,0	0,35	0,33
		2,0...2,5	0,36	0,34
	40	1,5...2,0	0,34	0,33
		2,0...2,5	0,35	0,34
	70	1,5...2,0	0,33	0,32
		2,0...2,5	0,34	0,33
300	20	1,0...2,0	0,34	0,32
		2,0...2,5	0,35	0,33
	40	1,5...2,0	0,33	0,32
		2,0...2,5	0,34	0,33
	70	1,5...2,0	0,32	0,31
		2,0...2,5	0,33	0,32
350	20	1,0...2,0	0,32	0,30
		2,0...2,5	0,33	0,31
	40	1,5...2,0	0,31	0,30
		2,0...2,5	0,32	0,31
	70	1,5...2,0	0,31	0,30
		2,0...2,5	0,32	0,31
400	20	1,0...2,0	0,30	0,28
		2,0...2,5	0,31	0,29
	40	1,5...2,0	0,29	0,28
		2,0...2,5	0,30	0,29
	70	1,5...2,0	0,29	0,28
		2,0...2,5	0,30	0,29

**Примітка.** Наведені значення  $r$  рекомендуються для бетонної суміші з рухомістю 2 см. При збільшенні рухомості на кожні 2 см значення  $r$  збільшується на 0,01.



Таблиця Б.30

Коефіцієнт розсунення  $\alpha$  (для пластичних бетонних сумішей)

Витрата цементу, кг/м <sup>3</sup>	Значення $\alpha$ при В/Ц					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	–	–	–	1,26	1,32	1,38
300	–	–	1,3	1,36	1,42	–
350	–	1,32	1,38	1,44	–	–
400	1,31	1,4	1,45	–	–	–
500	1,44	1,52	–	–	–	–
600	1,52	1,56	–	–	–	–

**Примітка. 1.** Таблиця складена для пісків із водопотребою  $M_{кр}=7\%$ . При збільшенні  $V_n$  на кожен відсоток  $\alpha$  зменшується на 0,03, а при зниженні  $V_n$  зростає відповідно на 0,03. Водопотреба піску показує кількість води, яку необхідно додати в цементне тісто щоб отримати розчинну суміш складу 1:2, з такою рухомістю як нормальної густоти. **2.** Для жорстких бетонних сумішей ( $\rho < 400$  кг/м<sup>3</sup>)  $\alpha = 1,05...1,15$ .

Таблиця Б.31

Значення коефіцієнтів А і b у формулі міцності для дрібнозернистого бетону

Вид заповнювачів	Пластичні бетонні суміші	Жорсткі бетонні суміші	Наджорсткі (напівсухі) бетонні суміші
Заповнювач високої якості	A=0,52, b=0,65	A=0,52, b=0,55	A=0,52, b=0,2
Заповнювач середньої якості	A=0,48, b=0,65	A=0,48, b=0,55	A=0,48, b=0,2
Заповнювач низької якості	A=0,44, b=0,65	A=0,44, b=0,55	A=0,44, b=0,2

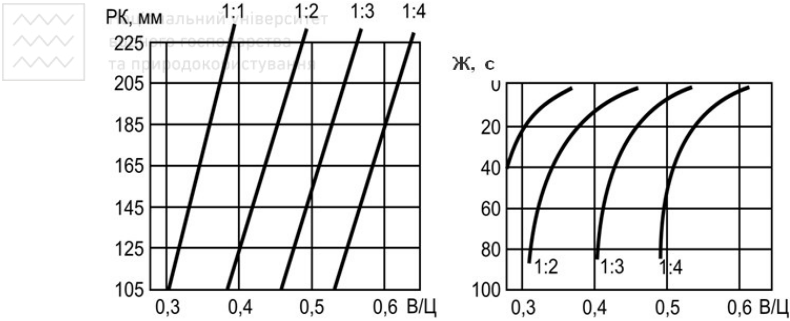


Рис. Б.4. Графіки для вибору співвідношення між цементом і піском середньої крупності (водопотреба 7%), яке забезпечує задані значення розпливу конусу (РК) і легкоукладальності (Ж) цементно-піщаних сумішей (за Ю.М. Баженовим)

Таблиця Б.32

Рухомість дрібнозернистих бетонних сумішей, визначена різними методами

Осадка стандартного конуса, см	Глибина занурення конуса, см	Розплив конуса (РК) на струшуючому століку, мм
1...3	2...3	110...140
3...6	3...5	140...170
5...8	4...6	160...180
8...14	6...8	170...200
12...15	7...9	190...220
15...22	8...11	210...240
20...25	10...14	230...270

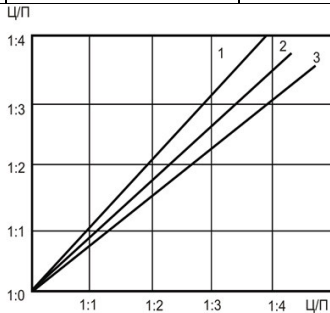


Рис. Б.5. Графік для корегування співвідношення Ц/П при забезпеченні заданої рухомості цементно-піщаної суміші залежно від модуля крупності піску ( $M_k$ ): 1 –  $M_k = 2,5$ ; 2 –  $M_k = 1,5$ ; 3 –  $M_k = 0,75$  (Ц/П – співвідношення для піску середньої крупності, яке приймається за рис. 4)



Вихід міцності бетону на портландцементі із протиморозними  
добавками

Добавки і їх композиції	Розрахункова температура тверднення бетону, °С	Міцність, % від $f_{cm_{28}}$ при твердненні бетону на морозі за період, дів			
		7	14	28	90
НН	-5	30	50	70	90
	-10	20	35	55	70
	-15	10	25	35	50
ХН+ХК	-5	35	65	80	100
	-10	25	35	45	70
	-15	15	25	35	50
	-20	10	15	20	40
НКС, НК+С, ННК+С	-5	30	50	70	90
	-10	20	35	50	70
	-15	15	25	35	60
	-20	10	20	30	50
ННХК, ХК+НН, ХК+ННК,ННХК+С	-5	40	60	80	100
	-10	25	40	50	80
	-15	20	35	45	70
	-20	15	30	40	60
	-25	10	15	25	40
П	-5	50	65	75	100
	-10	30	50	70	90
	-15	25	40	65	80
	-20	25	40	55	70
	-25	20	30	50	60

**Примітка. 1.** НН – нітрит натрію; ХН – хлорид натрію; П – поташ; ХК – хлорид кальцію; НК – нітрат кальцію; ННК – нітрит-нітрат кальцію; НКС – нітрат кальцію з сечовиною; С – сечовина. **2.** Міцність бетону на швидкотверднучому портландцементі у віці 28 дів і менше орієнтовно складає 120%, а на шлако- і пуцоланових портландцементях – 80% від значень, які приведені в таблиці.



Таблиця Б.34

Коефіцієнти змочування ( $K_{3м}$ ) зерен заповнювачів

Фракція, мм	Види заповнювачів		
	Кварцовий пісок	Річковий пісок	Гранітний пісок і щебінь
10...5	–	–	0.0121
5...2,5	0.0072	0.0192	0.022
2,5...1,25	0.00788	0.0207	0.0238
1,25...0,63	0.0132	0.023	0.0264
0,63...0,315	0.0265	0.0346	0.0398
0,315...0,16	0.0504	0.06	0.069
менше 0,16	0.104	0.1201	0.138

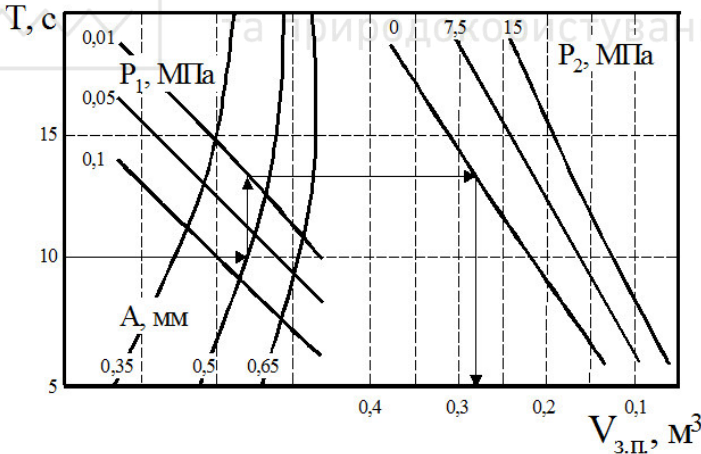


Рис. Б.6. Номограма для визначення об'єму затиснутого повітря у вібропресованому дрібнозернистому бетоні





Таблиця Б.35

Допустимий вміст шкідливих домішок у воді для бетону

Призначення води	Максимально-допустимий вміст, мг/л			
	розчинних солей	іонів $SO_4^{2-}$	іонів $Cl^-$	зважених частинок
Для замішування бетонної суміші при виготовленні попередньо напружених залізобетонних конструкцій	2000	600	350	200
Для замішування бетонної суміші при виготовленні конструкцій із ненапруженої арматури, у т.ч. для водоскидних споруд і зони змінного рівня води масивних споруд	5000	2700	1200	200
Для замішування бетонної суміші при виготовленні неармованих конструкцій, до яких не пред'являються вимоги по обмеженню утворення висолів, а також бетону конструкцій підводної і внутрішньої зон масивних споруд	10000	2700	3500	300
Для промивання заповнювачів	5000	2700	1200	500
Для поливання робочих швів при перервах у бетонуванні, поверхонь стиків, що підлягають замонолічуванню, і поверхонь водоскидних конструкцій, а також для трубного охолодження масиву бетону	1000	500	350	200
Для поливання закінчених зовнішніх поверхонь бетонних і залізобетонних конструкцій	5000	2700	1200	500
Для поливання зовнішніх поверхонь конструкцій, якщо на поверхні може бути допущена поява цвілі та висолів	35000	2700	20000	500



Таблиця Б.36

Фізико-механічні показники базальтової фібри

Найменування показників	Норми для волокна марки		
	БГВ-100	БГВ-150	БГВ-250
Діаметр, мм	100±50	150±50	250±75
Довжина, мм	75±25		
Міцність на розтяг, МПа	200	150	100
Лугостійкість, %, не менше	90		
Вологість, %, не більше	1		

Таблиця Б.37

Види фібри: основні характеристики

(згідно EN 14889-1, ТУ У В.2.7-28.7-00191046-015:2007)

Основні показники	Вид фібри				
	Хвиле-подібна Ф1 60/1	Анкерна із загнутими кінцями Ф2 60/1	Анкерна із сплюсченими кінцями Ф3 50/1	Анкерна із загнутими кінцями Ф4 33/0,85/0,75	Прямолінійна фібра з анкерами у вигляді конусів Ф5 54/1
Довжина (L), мм	60,0 ± 6,0	60,0 ± 6,0	50,0 ± 5,0	33,0 ± 3,0	54,0 ± 4,0
Діаметр (d), мм	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	0,9*	1,0 ± 0,03
$\Lambda=L/d$	60	60	50	37	54
Тимчасовий опір розриву, МПа не менше	1335	1335	1335	1260	1100
Довжина загнутого/сплюсненого кінця, мм	-	5,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,0 ± 0,1
Висота хвилі/ загнутого кінця, мм	4,5 ± 0,1	5,0 ± 0,1	-	5,0 ± 0,1	-
Середня густина сталі (ρ), г/см <sup>3</sup>	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86

Примітка.\* Еквівалентний діаметр



Технічні характеристики базальтового фіброволокна

Характеристики	Базальтоне волокно 12 мм.	Базальтоне волокно 16 мм.	Базальтоне волокно 25 мм
Діаметр окремого волокна, мкм	16(18)±2	16(18)±2	16(18)±2
Довжина, мм	12	16	25
Міцність на розрив, Н/мм <sup>2</sup>	110	110	110
Модуль пружності, МПа	70000	70000	70000
Кількість одиничних волокон, млн. шт/кг	74,4	74,4	74,4
Температура плавлення, °С	1450	1450	1450

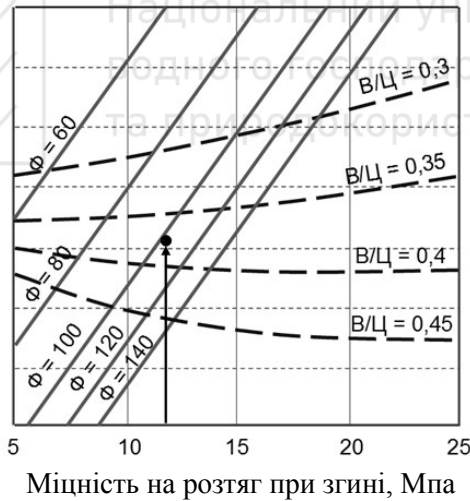


Рис. Б.7. Номограма для визначення витрати фібри ( $\Phi$ , кг/м<sup>3</sup>) для дрібнозернистого фібробетону при використанні портландцементу марки 500 та фібри хвилястого профілю ( $L = 60$  мм,  $d = 1$  мм)



Таблиця Б.39

Орієнтовна витрата води ( $V_0$ ) для розрахунку складу  
високоміцного дрібнозернистого бетону

Осадка конуса, см	Марка за легкоукладальністю	Модуль крупності заповнювача		
		2,0...2,5	3,0...3,5	4,0
0...4	P1	245	235	230
5...9	P2	255	245	240
10...15	P3	270	260	255
16...21	P4	280	270	265

**Примітка.** 1. При збільшенні вмісту у заповнювачі пилу понад 1% витрата води збільшується на 1...2 л на кожний відсоток. При збільшенні вмісту в піску мулу та пилу більше 3% – на 2 л/м<sup>3</sup> на кожний відсоток. 2. Витрата води дана для бетонних сумішей на портландцементі з нормальною густиотою цементного тіста 26...28% без пластифікуючих добавок. При зміні нормальної густоти цементного тіста на кожний відсоток у бік зменшення витрата води зменшується на 3...5 л, у бік збільшення – збільшується на 3...5 л. Поправочні коефіцієнти на використання пластифікуючи добавок наведені у табл. Б.27.

Таблиця Б.40

Значення коефіцієнтів  $A_1$  і  $A_2$  в формулі (4.23) для бетонних  
сумішей з різною легкоукладальністю

Легкоукладальність бетонних сумішей	$A_1$	$A_2$
Рухомі бетонні суміші (ОК=9...12 см)	0,34	1,68
Малорухомі бетонні суміші (ОК=1...4 см)	0,91	1,47
Жорсткі бетонні суміші	2,48	1,25



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

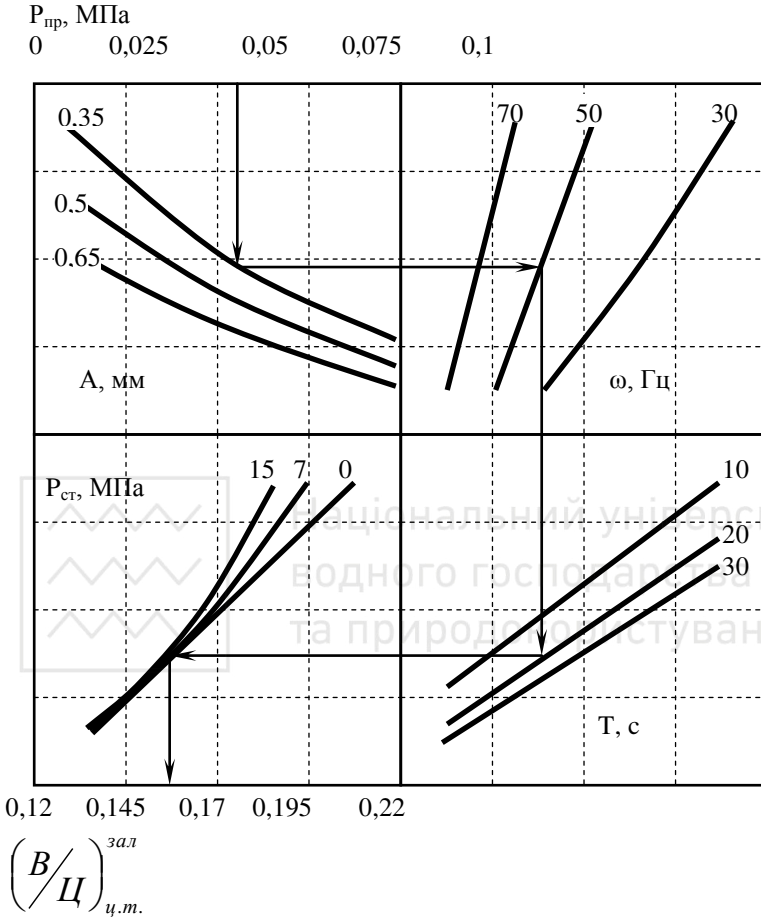


Рис. Б.8. Номограма для визначення  $\left(\frac{B}{\Pi}\right)_{ц.т.}^{зал}$



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Наукове видання

*Бабич Євгеній Михайлович  
Дворкін Леонід Йосипович  
Житковський Вадим Володимирович та ін.*

**РЕКОМЕНДАЦІЇ  
З ПРОЕКТУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ  
ФОРТИФІКАЦІЙНИХ СПОРУД**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Підписано до друку 27.12.2017 р. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Ум.-друк. арк. 10,1. Обл.-вид. арк. 10,6.

Тираж 300 прим. Зам. № 5369.

*Видавець і виготовлювач  
Національний університет  
водного господарства та природокористування  
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до  
державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*