

МЕТОДОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ ПРИ ДІЇ ДИНАМІЧНИХ ВПЛИВІВ

METHODOLOGY OF OBTAINING DIAGRAMS OF CONCRETE DEFORMATION UNDER DYNAMIC INFLUENCE

Бабич Є. М.¹, д. т. н., професор. ORCID ID: 0000-0003-1746-9991, **Барановський М. М.²**, член кореспондент АБУ. ORCID ID: 0000-0003-4891-1295, **Кочкар'єв Д. В.¹**, д. т. н., доцент. ORCID ID: 0000-0002-4525-7315, **Філіпчук С. В.¹**, к. т. н., доцент. ORCID ID: 0000-0001-8334-8827

(¹ Національний університет водного господарства та природокористування),

(² ДП Міністерства оборони України «Центральний проектний інститут»)

Babych Y. M.¹, DR., professor. ORCID ID: 0000-0003-1746-9991, **Baranovskyi M. M.²**, ABU Corresponding Member. ORCID ID: 0000-0003-4891-1295, **Kochkarev D. V.¹**, Dr., associate professor. ORCID ID: 0000-0002-4525-7315, **Filipchuk S. V.¹**, cand. of techn. scien., associate professor. ORCID ID: 0000-0001-8334-8827, (¹ National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne), (² State Enterprise of the Ministry of Ukraine Defense "Central Design Institute")

Наведено методологію встановлення діаграм деформування бетону при дії динамічних впливів. Визначення необхідних параметрів відбувається методом ітерацій. Методика зводиться до пошуку необхідної діаграми деформування бетону при стиску або розтязі. Основні параметри діаграм деформування при дії динамічних впливів пропонується визначати з енергетичних позицій на основі діаграм деформування при статичних навантаженнях. На відміну від існуючих емпіричних формул придатних лише для окремих видів бетонів запропонований підхід дозволяє більш точно визначати динамічні характеристики матеріалів, тим самим, як забезпечуючи більшу надійність динамічних розрахунків, так і певну економію матеріалів. Достовірність наведеної методології підтверджено шляхом порівняння граничних деформацій бетону визначених за наведеною методологією та за емпіричними виразами отриманими шляхом обробки експериментальних даних.

The methodology of establishing diagrams of concrete deformation under the action of dynamic influences is given. The necessary parameters are determined by iterations. The technique is to find the necessary diagram of the deformation of concrete under compression or tension. It is proposed to determine the main parameters of deformation diagrams under the action of

dynamic influences from energy positions on the basis of deformation diagrams under static loads. From the energy standpoint, the energy expended on deformation under static loads must correspond to the energy expended under the action of dynamic loads. This principle allows to obtain diagrams of deformation under dynamic influences on the basis of parameters of diagrams under static load. This allows from a single theoretical position to obtain the parameters of the deformation diagrams for different types and compositions of concrete, and then perform the calculation of elements and structures from them on the basis of a universal deformation model. The possibility of obtaining compression and tensile deformation diagrams is shown.

The proposed technique allows to more accurately determining the dynamic characteristics of materials, thereby providing greater reliability of dynamic calculations, and some savings in materials. Depending on the dynamic impact, deterministic values of dynamic hardening coefficients are set, in contrast to the average value of 1.2 adopted for all types of dynamic loads, which is proposed in most developed methods of calculating the dynamic effects. The reliability of the above methodology was confirmed by comparing the ultimate deformations of concrete determined by the above methodology and by empirical expressions obtained by processing experimental data.

Ключові слова: діаграми деформування бетону, залізобетонні елементи, швидкість зміни деформацій, деформаційна модель.

Diagrams of concrete deformation, reinforced concrete elements, rate of change of deformations, deformation model.

Аналіз досліджень і постановка задачі. Розрахунок залізобетонних елементів передбачає використання діаграм деформування бетону та арматури. Діаграми деформування бетону отримані в умовах статичного навантаження вивчені у достатній мірі [1, 2, 3]. Найбільш відомі дробово-лінійні, поліноміальні, кусочно-лінійні та степеневі функції [1, 2, 3]. Таки діаграми дають змогу проводити розрахунки міцності та жорсткості залізобетонних елементів за дії статичного навантаження. Натомість, на сьогодні практично відсутні діаграми деформування бетону при дії динамічних впливів. Розрахунок на динамічні впливи виконується, за силовими наближеними методиками, які не дають можливості врахувати особливості деформування елементів та конструкцій в умовах динамічних навантажень.

У багатьох наукових дослідженнях [4, 5, 6], за основний параметр який приймається для оцінки характеру динамічного впливу приймається

швидкість деформування $\dot{\varepsilon}$, який характеризує параметри динамічного зміцнення бетону.

Також, при дії різних динамічних впливів суттєве значення відіграють коефіцієнти динамічного зміцнення, які визначаються за виразами

$$DEF_c = \frac{f_{cd}}{f_c}, \quad DEF = \frac{f_{td}}{f_t}, \quad (1)$$

де DEF_c , DEF – коефіцієнти динамічності при стиску та розтягу, відповідно, f_c , f_t – міцність бетону на стиск та розтяг при статичній дії навантаження, відповідно, f_{cd} , f_{td} – міцність бетону на стиск та розтяг при динамічній дії навантаження, відповідно.

Коефіцієнти динамічного зміцнення можуть бути визначені за виразами, отриманими на основі великої кількості експериментальних даних для бетону та фібробетону із сталлюю фіброю [4]

$$\left\{ \begin{array}{l} DEF_c = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} \quad \text{при } 30 \times 10^{-6} \leq \dot{\varepsilon} \leq (30 + 23i) c^{-1}; \\ DEF_c = \eta \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^k \quad \text{при } (30 + 23i) \leq \dot{\varepsilon} \leq 300 c^{-1}, \end{array} \right. \quad (2)$$

де $\alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_c / f_{c0}}$, $f_{c0} = 10 \text{ МПа}$; $\varepsilon_{sc} = 30 \times 10^{-6} c^{-1}$, $\gamma_s = 10^{(6,15\alpha_s - 2)}$,

$\eta = (1 - 0,3392i)\gamma_s$, $k = \frac{1 + 0,05i}{3}$, $i = \begin{cases} 0 - \text{для важкого бетону;} \\ 1 - \text{для сталеві фібробетону.} \end{cases}$

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

В окремих дослідженнях поведінки бетону при динамічних впливах [4, 5] показана можливість визначення граничних деформацій бетону у залежності від швидкості деформування, але це стосується лише окремо взятих складів бетонів, на обмеженій кількості експериментальних зразків. Тому розробка універсальної методології отримання діаграм деформування за дії динамічних впливів для різних видів та складів бетонів, яка б враховувала їх особливості є актуальною задачею.

Методика досліджень. Розглянемо методологію отримання діаграм деформування бетонів за дії динамічних впливів на основі статичних діаграм деформування. Для цього сформулюємо запропонуємо наступні передумови:

1. Деформування бетону при динамічних та статичних навантаженнях та впливах описується формулою наведеною у Єврокод-2 [1]:

$$\sigma_{c,d} = f_{c,d} \frac{k_d \eta - \eta^2}{1 + (k_d - 2)\eta}, \quad (3)$$

де $\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,d}}$ – рівень деформування, $k_d = 1,05 \frac{\varepsilon_{c1,d} E_{c,d}}{f_{c,d}}$.

Варто зазначити, що не має особливої різниці у виборі функції деформування бетону головне, щоб вона відповідала загальноприйнятим параметричним точкам.

2. Механічні та деформаційні характеристики діаграм деформування при динамічних впливах параметри отримуються, шляхом трансформування діаграми деформування бетону при статичних навантаженнях на основі загально прийнятих енергетичних положень.

Прийняття першої передумови визначає функцію деформування бетону при динамічних та статичних навантаженнях. Будемо описувати нею роботу бетону стисної та розтягнутої зон за різних видів динамічних впливів для всіх видів та класів бетонів, в тому числі і дрібнозернистих та сталевібробетонів.

Прийняття наступної передумови зумовлює отримання основних параметрів діаграми деформування різних видів та класів бетонів при дії динамічних навантажень, на основі діаграм деформування отриману при дії статичних навантажень. Варто зазначити, що необхідно використовувати діаграми деформування при статичних навантаженнях з низхідною віткою, отримані або в умовах постійного деформування, або аналітичним шляхом на основі трансформації із діаграм отриманих на звичайному пресовому обладнанні.

З енергетичних позицій енергія затрачена на деформування при статичних навантаженнях повинна відповідати енергії затраченої при дії динамічних навантажень (рис.1).

Таким чином

$$A_{cd} = A_{din}; \quad (4)$$

$$A I_c + A_c = A I_{c,d} + A_{c,d}. \quad (5)$$

Для спрощення приймемо, що площі криволінійних епюр $A I_c$ та $A I_{c,d}$ змінюються незначно, тоді граничні деформації бетону при динамічних впливах будуть визначатися залежністю

$$A_{cd} = A_{din}; \Leftrightarrow \frac{1}{2} f_c \varepsilon_{c1} = \frac{1}{2} f_{c,d} \varepsilon_{c1,d}. \quad (6)$$

З виразу (4) визначимо граничні деформації $\varepsilon_{c1,d}$

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{f_c \varepsilon_{c1}}{f_{c,d}}, \quad \text{або} \quad \varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c}. \quad (7)$$

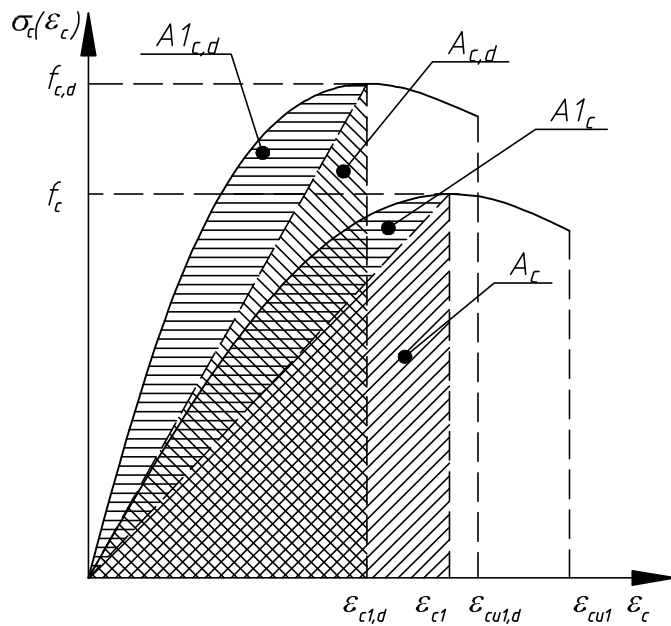


Рис. 1. До побудови діаграми деформування бетону при динамічних навантаженнях

Отримання точного значення динамічного модуля деформацій передбачає знаходження потенційних енергій діаграм деформування. Даний процес є доволі складним. Тому в межах незначних похибок, приймемо співвідношення початкових модулів деформацій бетону $E_{c,d}/E_c$ при статичному та динамічному навантаженнях, рівним співвідношенню січних модулів $\bar{E}_{c,d}/\bar{E}_c$, які відповідають найбільшим напруженням

$$\frac{E_{c,d}}{E_c} = \frac{f_{c,d}\epsilon_{c1}}{\epsilon_{c1,d}f_c} \rightarrow E_{c,d} = \frac{E_c f_{c,d} \epsilon_{c1}}{\epsilon_{c1,d} f_c}. \quad (8)$$

Після нескладних перетворення виразу (8), з урахуванням (7), отримаємо

$$E_{c,d} = E_c D E F_c^2. \quad (9)$$

З наведених виразів впливає наступна тотожність

$$k_d = k_c \rightarrow \frac{\epsilon_{c1,d} E_{c,d}}{f_{c,d}} = \frac{\epsilon_{c1} E_c}{f_c}. \quad (10)$$

Цей вираз дає можливість значно спростити інженерні розрахунки.

Деформування бетону при динамічних навантаженнях відбувається миттєво, а тому низхідна вітка може бути незначною. Під граничними деформаціями бетону ϵ_{cu} ($\epsilon_{cu,d}$) прийнято вважати, границю стійкого деформування перерізу, яка відповідає граничній потенційній енергії матеріалу. В такому випадку вона визначається із рівності енергії пружного деформування на висхідній вітці, енергії деформування на низхідній вітці. В нормах проектування для високоміцних бетонів цей підхід не використовують зважаючи на їх крихкий характер руйнування, забезпечуючи при цьому високу надійність. Приймемо підхід норм проектування визначимо граничні деформації бетону $\epsilon_{cu,d}$ за виразом по аналогії з (7)

$$\varepsilon_{cu,d} = \frac{f_c \varepsilon_{cu}}{f_{c,d}}, \text{ або } \varepsilon_{cu,d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{DEF_c}. \quad (11)$$

Граничні деформації при розтязі будемо визначати за залежністю

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{2f_{ct,d}}{E_{c,d}}. \quad (12)$$

З урахуванням того, що $DEF = DEF_c^{2/3}$ та (10)

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{2f_c}{E_c DEF_c^{4/3}} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF_c^{4/3}}. \quad (13)$$

Максимально можливі граничні деформації при розтязі для важкого та дрібнозернистого бетонів $\varepsilon_{ctu} = 0,00015$.

Для розтягнутої зони фібробетонів прийнято розглядати декілька діаграм деформування. Нами пропонується приймати єдину функцію деформування на основі залежності (1). В такому випадку всі формули описані вище лишаються справедливими для фібробетону, теж. При цьому граничні деформації розтягнутої зони для опису діаграми деформування визначаються механічними властивостями фібри і повинні прийматися незалежно від класів бетону матриці рівними:

$$\varepsilon_{ct1} = 6,67 \times 10^{-3}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_{ctu} = 0,0100. \quad (16)$$

Порядок отримання діаграм деформування бетону та фібробетону при дії динамічних впливів наступний:

1. Встановлюємо діаграми деформування при статичному навантаженні, або шляхом безпосереднього випробування призм, або шляхом встановлення параметрів за загально відомими виразами. Діаграми повинні достовірно описувати процес деформування бетонів.

2. Встановлюємо час дії динамічного навантаження τ .

3. Визначаємо швидкість зміни деформацій при дії динамічних навантажень, попередньо приймаючи граничні деформації при динамічному навантаженні $\varepsilon_{cul,d}$, рівними статичним граничним деформаціям ε_{cu1} .

4. Визначаємо коефіцієнт динамічності при стиску за виразом (2)

5. За коефіцієнтом динамічності визначаємо граничні деформації бетону за виразом (7).

6. Уточнюємо значення швидкості зміни деформацій та повторюємо п.4-5. Розрахунки повторюємо до отримання необхідної точності.

7. За виразами (9), (11) визначаємо параметри діаграм деформування.

Для підтвердження теоретичних вищенаведених теоретичних викладок перевіримо достовірність виразу (7) за допомогою числового експерименту. Визначимо граничні деформації важкого бетону $\varepsilon_{cl,d}$ для діапазону зміни швидкості деформування в межах $1 \times 10^{-6} \div 10^2 \text{ c}^{-1}$, для важких бетонів із

міцністю $f_c=30$ МПа, $f_c=60$ МПа, $f_c=90$ МПа. Деформації будемо визначати за виразом (7) та відомими загальноприйнятими виразами [5]

$$\begin{cases} \varepsilon_{c1,d} = \left(1,3 - 0,061 \lg \dot{\varepsilon} + 0,01 f_c \right) \times 10^{-3} \text{ при } \dot{\varepsilon} > 1,6 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}, \\ \varepsilon_{c1,d} = \left(0,5 - 0,23 \lg \dot{\varepsilon} + 0,01 f_c \right) \times 10^{-3} \text{ при } \dot{\varepsilon} < 1,6 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}. \end{cases} \quad (17)$$

Дані вирази отримані при обробці значної кількості експериментальних даних. Для встановлення граничних деформацій ε_{c1} при статичній дії навантаження виконаємо за загальноприйнятим виразом

$$\varepsilon_{c1} = 0,0007 f_c^{0,31}. \quad (18)$$

Проведений числовий експеримент підтвердив достовірність запропонованих виразів (табл. 1). Найбільші відхилення складають 12% при найбільшому коефіцієнті динамічності. Середнє значення відхилень складає $x_{сер}=1,02$, середнє квадратичне відхилення $\sigma=7.27\%$, коефіцієнт варіації $\nu=7.14\%$.

Таблиця 1

До визначення граничних деформацій бетону

№ п/п	Коефіцієнт динамічного зміцнення бетону при стиску	Швидкість зміни деформацій	Граничні деформації бетону при динамічній дії за виразом (18)			Граничні деформації бетону при динамічній дії за виразом (7)			Середнє значення відхилень
			$f_c=30$ МПа	$f_c=60$ МПа	$f_c=90$ МПа	$f_c=30$ МПа	$f_c=60$ МПа	$f_c=90$ МПа	
			$\varepsilon_{c1,d} \times 10^5$			$\varepsilon_{c1,d} \times 10^5$			
1	0.960	1×10^{-6}	218.0	248.0	278.0	209.3	259.5	294.2	0.98
2	0.990	1×10^{-5}	195.0	225.0	255.0	202.9	251.6	285.3	0.92
3	1.060	1×10^{-4}	184.4	214.4	244.4	189.5	235.0	266.4	0.93
4	1.140	1×10^{-3}	178.3	208.3	238.3	176.2	218.5	247.7	0.98
5	1.220	1×10^{-2}	172.2	202.2	232.2	164.7	204.2	231.5	1.01
6	1.300	1×10^{-1}	166.1	196.1	226.1	154.5	191.6	217.3	1.05
7	1.380	1	160.0	190.0	220.0	145.6	180.5	204.7	1.08
8	1.460	10	153.9	183.9	213.9	137.6	170.6	193.4	1.10
9	1.540	10^2	147.8	177.8	207.8	130.5	161.7	183.4	1.12
$x_{сер} =$									1.02
$\sigma, \% =$									7.27
$\nu, \% =$									7.14

Варто зазначити, що за відомого значення коефіцієнта динамічного зміцнення на стиск, завжди можна визначити коефіцієнт динамічного зміцнення на розтяг, або навпаки. Це виконується шляхом використання загально відомої формул Фере [7]. Приймавши справедливність формули Фере за різних видів силових впливів, отримаємо значення коефіцієнта динамічності при розтягуванні у залежності від його значення при стиску

$$DEF = DEF_c^{2/3}. \quad (19)$$

Приймаючи швидкість деформування постійною, швидкість зростання деформацій можна визначити при відомих граничних деформаціях за формулою

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau}, \quad (20)$$

де $\dot{\varepsilon}$ – швидкість зростання деформацій, c^{-1} ; τ – час навантаження, с; ε_u – відповідні граничні деформації бетону.

Час дії ударного (імпульсного) навантаження можна встановлювати через імпульс сили за емпіричним виразом

$$\tau = \frac{(m/g) \cdot v \cdot (1+k_0)}{P_d}, \quad (21)$$

де m – маса ударника, g – прискорення вільного падіння, 9.81 м/с^2 , v – швидкість перед зіткненням із захисним покриттям, k_0 – коефіцієнт відновлення при ударі, приймається за табл. 2.

Варто зауважити, що вираз (22) не дає змоги встановити час дії імпульсного навантаження з урахуванням проникнення ударника у захисну товщу.

Таблиця 2

Коефіцієнт відновлення при ударі k_0

Захисне покриття	Матеріал та форма ударника			
	Тверді метали		М'які метали, бетон, камінь, пластмаси	
	шар	куб	шар	куб
Сталь	0.60	0.35	0.40	0.25
Дерево	0.55	0.30	0.40	0.20
Камінь	0.40	0.20	0.30	0.15
Бетон	0.35	0.15	0.25	0.10
Асфальт	0	0	0	0

Час дії динамічного навантаження з урахуванням проникнення ударника у захисну товщу, більш точно, можна встановлювати за наступною залежністю

$$\tau = \frac{h_{\Sigma}}{v_c}, \quad (22)$$

де v_c – середня швидкість дії ударного навантаження, м/с; h_{Σ} – сумарний шлях проходження ударника (снаряду), визначається як сума прогину несучої конструкції, демпферу та глибини пробою захисної споруди.

Висновки. 1. Проведені дослідження дають змогу запропонувати методику отримання основних параметрів різних видів бетону за дії на них динамічних навантажень. Визначення необхідних параметрів відбувається методом ітерацій. Методика зводиться до пошуку необхідної діаграми деформування бетону при стиску або розтязі. Основні параметри діаграм деформування при дії динамічних впливів пропонується визначати з енергетичних позицій на основі діаграм деформування при статичних навантаженнях.

2. На першому етапі встановлюється швидкість зростання деформацій ε . Далі за виразом (2) визначається коефіцієнт динамічного зміцнення при стиску. Коефіцієнт динамічного зміцнення при розтязі пропонується встановлювати на основі перетворень формули Фере за виразом (19). За відомого коефіцієнта динамічного зміцнення граничні деформації при дії динамічних впливів $\varepsilon_{cl,d}$, $\varepsilon_{cu,d}$ визначаються за формулами (7), (11), відповідно. Модель деформацій бетону при дії заданих динамічних навантажень пропонується встановлювати за залежністю (9). При розрахунку конструкцій будівель та споруд на задані динамічні впливи,

кожен елемент має різну швидкість зростання деформування ε , а тому характеристики матеріалів також будуть зазнавати відповідних змін. У такому випадку пропонується проводити уніфікацію елементів конструкцій, що значно зменшить час розрахунку таких споруд.

3. Запропонована методика дозволяє більш точно визначати динамічні характеристики матеріалів, тим самим, як забезпечуючи більшу надійність динамічних розрахунків, так і певну економію матеріалів. Тобто, у залежності від динамічного впливу будуть встановлені детерміновані значення коефіцієнтів динамічного зміцнення на відміну від усередненого значення 1,2, прийнятого для усіх видів динамічних навантажень. Таке значення пропонується у більшості розроблених методик розрахунку на динамічні впливи.

1. EN 1992: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings. – Brussels, 2002. – 230 p.

2. 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.

Kochkarev D.V. Neliniynyy opir zalizobetonnykh elementiv i konstruksiy sylovym vplyvam: Monohrafiya. – Rivne: O. Zen', 2015. – 384 p.:Il.: 139; tabl. 48; bibliohr: 326 - ISBN 978-617-601-125-5.

3. Кузнецов В.С. Железобетонные и каменные конструкции (Основы сопротивления железобетона. Практическое проектирование. Примеры расчета): Учеб.пособие. – М.:Издательство АСВ, 2014. – 304 с.

Kuznetsov V.S. Reinforced concrete and stone structures (Fundamentals of reinforced concrete resistance. Practical design. Calculation examples): Textbook. М.: Publishing house ASV, 2014. – 304 p.

4. Hakan Hansson. Warhead penetration in concrete protective structures. Licentiate Thesis. – Stockholm, 2011. – 188 с.

5. Кумпляк О.Г., Копаница Д.Г. Прочность и деформативность железобетонных сооружений при кратковременном динамическом нагружении. – Томск: STT, 2002. – 336 с.

Kumplyak O.G., Kopanitsa D.G. Strength and deformability of reinforced concrete structures under short-term dynamic loading. – Tomsk: STT, 2002. – 336 p.

6. Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Кумпляк О.Г., Югов Н.Т. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки. – Томск: STT, 2004. – 466 с. – ISBN 5-93629-183-9.

Belov N.N., Kopanitsa D.G., Kumplyak O.G., Yugov N.T. Calculation of reinforced concrete structures for explosive and shock loads. – Tomsk: STT, 2004. – 466 p. – ISBN 5-93629-183-9.

7. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін // – К: Основа, 2007. – 616 с.

Dvorkin L.Y. Fundamentals of concrete knowledge / L.Y. Dvorkin, O. L. Dvorkin // – К: Osnova, 2007. – 616 p.