

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН БЕТОНІВ ПРИ  
РОЗВАНТАЖЕННІ ПІСЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО ОБТИСНЕННЯ НА  
ОСНОВІ ЙОГО СТРУКТУРНОЇ ТЕОРІЇ**

**STRESSED-DEFORMED CONDITION OF CONCRETE  
WHEN UNLOADING AFTER PRELIMINARY COMPRESSION  
BASED ON ITS STRUCTURAL THEORY**

**Битько М.М., к.т.н., доцент, Кузнецова О.В., ст. викладач,  
Іванова Л.В. ст. викладач (Черкаський державний технологічний  
університет, м. Черкаси)**

**N.M. Bitko, Ph.D., Associate Professor, O.V. Kuznetsova, Senior  
Lecturer, L.V. Ivanova, Senior Lecturer (State Technological University,  
Cherkassy)**

*Викладено результати теоретичних досліджень напружено-деформованого стану важкого бетону при короткочасному розвантаженні після тривалого центрального обтиснення різної інтенсивності. Розглянуто напружено-деформований стан при розвантаженні до напружень у центральному камені, рівних нулю, а також власний напружений стан у важкому бетоні при повному розвантаженні та відсутності розвантажувальних тріщин по цементному каменю. Наведено скалярні дані вказаних параметрів для різних рівнів попереднього обтиснення.*

*During the operation stage, long-term applied compressive stresses take place in the structures of reinforced concrete elements. Their assessment is based on the strength and deformation characteristics of the concrete constituents and have phenomenological dependences. Proceeding from this, the authors studied the stress-strain state of concrete during unloading after a preliminary long-term compression based on its structural theory.*

*On the basis of the analysis, an idealized structural diagram was adopted that looked like a staggered arrangement of the aggregate in the cement matrix. At the same time, the prerequisites for a nonlinear relationship between stresses  $\sigma_{\eta\tau}$  and the creep characteristic  $\varphi_{\eta\tau}$  and a linear relationship between the secant modulus of total deformations which takes into account creep deformations  $\epsilon_{\eta\tau}^0$  and the initial level of long-term stresses  $\eta\tau$  at a fixed time  $t-\tau$  for a cement stone were accepted (solution).*

*Based of these assumptions, the stress-strain state of concrete is considered at zero stress in the cement stone (mortar). For this state, the secant modulus values for the cement stone and concrete deformation were obtained in each section of the structural diagram. In these sections, the stress in concrete  $(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_0^0$  and aggregate  $(\sigma_{a,\eta,t,\tau})_1^0$  was determined during unloading with the relative level of compression  $\eta\tau$  in the absence of stress in the cement stone.*

The deformations secant modulus value for the entire concrete element was obtained in the absence of stress in the cement stone  $(\bar{E}'_{c,\eta,t,\tau})_I^0$  and relative deformations  $(\varepsilon_{c,\eta,t,\tau})_I^0$ .

The intrinsic stress-strain state in concrete with complete unloading and the absence of unloading cracks along the cement stone is also considered.

The concrete and cement stone deformations secant modulus at full unloading  $(\bar{E}_{c,1,\eta,t,\tau})_c^0$  is determined from the conditions for solving the system of equations of deformations equilibrium and compatibility for each of the sections in the idealized scheme, and the entire concrete section at full unloading after the long compression.

Based on the obtained dependencies, the intrinsic stress state in concrete was determined, that is, tensile stress in cement stone,  $(\sigma_{1,\eta,t,\tau})_c^0$ , stress in the aggregate,  $(\sigma_{2,\eta,t,\tau})_c^0$  and deformations during unloading  $(\bar{\varepsilon}_{c,\eta,t,\tau})_c^0$ . The scalar values of the given parameters for different levels of preliminary reduction are given.

*Ключові слова:* Бетон, січний модуль, розчин, цементний камінь, заповнювач, структурна схема напруги, деформації.

*Keywords:* Concrete, secant module, mortar, cement stone, aggregate, structural diagram of stress, deformation.

**Вступ.** На даний час бетон є основним будівельним матеріалом. Однак його міцнісні та деформативні характеристики, як за короткочасного, так і за тривалого прикладання навантаження, які базуються на міцнісних і деформативних характеристиках його складових, вивчені недостатньо. З цієї причини при вирішенні багатьох задач теорії бетону та залізобетону виходять із феноменологічних залежностей, взятих безпосередньо з результатів випробувань.

Проте вже є деяка тенденція до використання не феноменології, а сутності явища та розробки структурної теорії бетону. Розрахункові формули при цьому ґрунтуються на міцнісних і пружнопластичних характеристиках складових бетону, їх кількісного співвідношення і взаємного розташування в одиниці об'єму.

**Постановка проблеми.** Бетон є конгломератом і має тверді, рідкі та газоподібні включення. Взаємне розташування складових в одиниці бетонного елемента здійснюється за допомогою ідеалізованих структурних схем бетону. Дійсна структурна схема бетону складна і не піддається статистичній оцінці. Цементний камінь при цьому розглядається як матриця, а заповнювачі – як включення. Але цементний камінь і заповнювач мають різні фізико-механічні властивості, тому пружнопластичні характеристики бетону повинні визначатися через реологічні властивості складових, їх кількісне співвідношення і взаємне розташування. Вирішення цього завдання є досить актуальним.

**Аналіз результатів досліджень.** З цього питання є незначна кількість досліджень. Так, автори [1-2] дають визначення модуля пружності бетону за трьома ідеалізованими структурними схемами.

Деякі інші, при короткочасному центральному стиску, залежності для визначення модуля пружності бетону розглянуті в [3-10]. Всі вони стосуються визначення модуля пружності бетону при короткочасному центральному стиску. Що ж стосується оцінки його деформативності за ідеалізованими схемами при короткочасному розвантаженні після тривалого стиску навантаженням різної інтенсивності, то жоден з вищевказаних авторів такої не дає.

**Мета.** Розробка на основі ідеалізованих структурних схем бетону аналітичних залежностей для визначення його напружено-деформованого стану при короткочасному розвантаженні після тривалого центрального стиску навантаженням різної інтенсивності, виходячи з реологічних властивостей складових.

**Виклад основного матеріалу.** Оцінка напружено-деформованого стану бетонів, при короткочасному і тривалому стиску за їх складом і реологічними властивостями складових, наведена на ідеалізованих структурних схемах [1; 2].

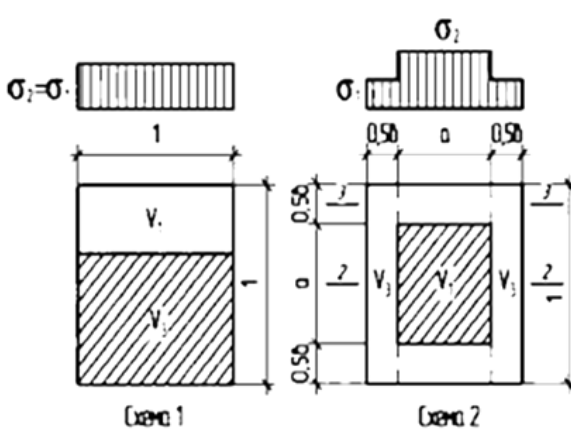


Рис. 1. Ідеалізовані структурні схеми бетону

Оцінку напружено-деформованого стану бетонів при короткочасному розвантаженні після тривалого обтиснення навантаженням різної інтенсивності виконуємо за схемою 2 (рис.1), що найточніше відображає роботу бетону при короткочасному та тривалому завантаженні.

Додаткові передумови:

1. нелінійна залежність між напруженнями та характеристикою повзучості бетонів;

2. лінійна залежність між січним модулем повних деформацій (з урахуванням деформацій повзучості)  $E_{1,\eta,t,\tau}$  і початковим рівнем тривалих напружень  $\eta\tau$  у фіксований момент часу  $t-\tau$  для цементного каменю (розчину).

Експериментально-статистичне обґрунтування цих передумов наведено у [2].

Розглядаємо напружено-деформований стан бетону (схема 2):

а) розвантаження до напружень у цементному камені (або розчині), що дорівнюють нулю.

У процесі короткочасного розвантаження у перерізі 2-2 при напруженні у цементному камені, рівному нулю  $(\sigma_{1,\eta,t,\tau})_1^0$  напруження бетону,  $(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^0$  буде завжди напруженням стиску,  $(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^0 > 0$  причиною цього є перерозподіл зусиль із цементного каменю на пружний заповнювач і збільшення модуля пружності цементного каменю з віку  $\tau$  до віку  $t$  за рахунок старіння і спадковості. При розвантаженні до  $(\sigma_{1,\eta,t,\tau})_1^0$  цементний камінь (розчин) працює пружно-пластично з модулем пружності  $E_{0,1,t,\tau}$ .

Січний модуль деформацій цементного каменю у перерізі 2-2 при розвантаженні з рівня обтискання  $\eta\tau$  при напруженні в ньому рівному нулю,  $(\sigma_{1,\eta,t,\tau})_1^0$  визначиться з умови:

$$\overline{E}_{1,\eta,t,\tau}^1 = E_{0,1,t,\tau} \left( 1 - \lambda_{fcd,1,t,\tau} \frac{\sigma_{1,\eta,t,\tau}}{f_{cd,1,t,\tau}} \right) \quad (1)$$

де:  $\lambda_{fcd,1,t,\tau}$  – граничне значення коефіцієнта пластичності при розвантаженні;

$\sigma_{1,\eta,t,\tau}$   $f_{cd,1,t,\tau}$  – напруження і призмова міцність цементного каменю в момент розвантаження з рівня обтискання  $\eta\tau$ .

Січний модуль деформацій бетону в перерізі 2-2 у процесі розвантаження з рівня обтискання  $\eta\tau$  при напруженні у цементному камені (розчині), рівному нулю, визначиться за аналогією з формулою (5) [3]

$$(\overline{E}_{1,c,\eta,t,\tau}^1)_1^0 = (\overline{E}_{1,\eta,t,\tau}^1)_1^0 A_1 + E_3 A_3 \quad (2)$$

Напруження у бетоні і заповнювачі в перерізі 2-2 у процесі розвантаження з відносного рівня обтискання  $\eta\tau$  при напруженнях у цементному камені, рівних нулю, визначаються за формулою:

$$(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^0 = \sigma_{c,\eta,\tau} - \sigma_{1,\eta,t,\tau} \frac{\overline{(E^1_{c,\eta,t,\tau})}_1^0}{(E^1_{1,\eta,t,\tau})_1^0}; \quad (3)$$

$$(\sigma_{3,\eta,t,\tau})_1^0 = \sigma_{3,\eta,t,\tau} - \left[ \sigma_{c,\eta,\tau} - (\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^0 \frac{E_3}{(E^1_{c,\eta,t,\tau})_1^0} \right]; \quad (4)$$

У формулах (1) – (4) значення  $\sigma_{1,\eta,t,\tau}$  і  $\sigma_{3,\eta,t,\tau}$  визначаються відповідно за (16) – (17) [4];  $\sigma_{c,\eta,\tau}$  – напруження у бетоні при початковому рівні тривалого обтискання  $\eta\tau$ .

Січний модуль деформацій цементного каменю (розчину) в комбінованому елементі II при розвантаженні з рівня обтискання  $\eta\tau$  і при напруженнях у цементному камені в перерізі 1-1, рівних нулю:

$$(\overline{E}^I_{II,\eta,t,\tau})_1^0 = E_{0,1,r,\tau} \left[ 1 - \lambda_{fd,1,t,\tau} \frac{\sigma_{3,\eta,t,\tau} - (\sigma_{3,\eta,t,\tau})_1^0}{f_{cd,1,t,\tau}} \right]; \quad (5)$$

Для всього бетонного елемента січний модуль деформацій при напруженнях у цементному камені (розчині), рівних нулю, визначиться за аналогією з формулою (18) [4]:

$$(\overline{E}^I_{c,\eta,t,\tau})_1^0 = A_1 (E^1_{I,1,\eta,t,\tau})_1^0 + \frac{A_3}{\frac{a}{E_3} + \frac{b}{(\overline{E}^I_{II,1,\eta,t,\tau})_1^0}}; \quad (6)$$

Відносна деформація бетону в цьому випадку буде рівною

$$(\varepsilon_{c,\eta,t,\tau})_1^0 = \varepsilon_{c,\eta,t,\tau} - \frac{\sigma_{c,\eta,\tau} - (\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^0}{(\overline{E}^I_{c,\eta,t,\tau})_1^0}; \quad (7)$$

У формулах (6) и (7) значення  $(\overline{E}^I_{I,1,\eta,t,\tau})_1^0$  і  $(\overline{E}^I_{c,\eta,t,\tau})_1^0$  визначаються за формулами (2) и (5), а  $\varepsilon_{c,\eta,t,\tau}$  – за формулою (24) [4].

Дослідні значення вищенаведених параметрів при напруженнях у цементному камені, рівних нулю, отримати неможливо. Теоретичні їх значення, отримані за вищенаведеними формулами, наведені в таблиці 1. Як видно з цієї таблиці, зі збільшенням початкового рівня тривалого обтиснення напруження у бетоні і заповнювачі в цьому випадку, а також відносні деформації бетону безперервно зростають.

б) Власний напружений стан в бетонах при повному розвантаженні та відсутності розвантажувальних тріщин по цементному каменю (розчину).

При короткочасному розвантаженні в перерізі 2-2 схеми 2 (рис. 1) з моменту досягнення в цементному камені (розчині) напружень, рівних нулю, до повного розвантаження [напруження в бетоні рівне нулю –  $(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_c^0$ ], цементний камінь (розчин), у зв'язку з наявністю власних структурних напружень, піддається розтягуванню. При цьому, передбачається, що залежність "напруження – січний модуль деформацій  $(\sigma_{c,\eta,t,\tau} - E_{t,1,t,\tau})$  при короткочасному розтягуванні є лінійною кореляційною залежністю виду:

$$E^I_{t,1,t,\tau} = E_{0,t,1,t,\tau} \left[ (1 - \lambda_{fd1,1,t,\tau} \frac{\sigma_{t1,t,\tau}}{f_{td1,t,\tau}}) \right], \quad (8)$$

де:  $E^I_{t,1,t,\tau}$ ;  $E_{0,t,1,t,\tau}$ ;  $\lambda_{fd1,1,t,\tau}$  – відповідно січний модуль деформацій, модуль пружності та граничне значення коефіцієнта пластичності цементного каменю (розчину), що перебував під дією стискувального навантаження напрутязі (t- $\tau$ ), при короткочасному розтягу у віці t.

Січний модуль деформацій бетону в перерізі 2-2 при повному розвантаженні  $(\bar{E}_{c,1,\eta,t,\tau})_c^0$  визначається із умов розв'язку системи рівнянь рівноваги

$$(\sigma_{t1,t,\tau})_c^0 + A_1 + (\sigma_{3,\eta,t,\tau})_c^0 A_3 = (\sigma_{c,\eta,t,\tau})_c^0; \quad (9)$$

і рівняння спільності деформацій

$$(\bar{\varepsilon}_{c,\eta,t,\tau})_c^0 = (\varepsilon_{t1,t,\tau})_c^0 = (\bar{\varepsilon}_{3,\eta,t,\tau})_c^0; \quad (10)$$

із використанням кореляційної залежності (8):

$$(\bar{E}_{c,1,\eta,t,\tau})_c^0 = -0,5B + \sqrt{(0,5B)^2 - C}. \quad (11)$$

$$B = - \left\{ A_3 (E_3 - E_{t1,t,\tau} \left[ 1 - \lambda_{fd1,t,\tau} \frac{(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^0}{f_{td1,t,\tau}} \right]) \right\}, \quad (12)$$

$$C = -A_3 E_3 \lambda_{f_{td}, 1, t, \tau} E_{t, 1, t, \tau}^1 \frac{(\sigma_{c, \eta, t, \tau})_1^0}{f_{td, 1, t, \tau}}, \quad (13)$$

У формулах (9) – (13):  $(\sigma_{3, \eta, t, \tau})_c^0, (\bar{\sigma}_{3, \eta, t, \tau})_c^0$  – напруження і відносні деформації заповнювача при повному розвантаженні бетону;

$(\varepsilon_{t, 1, t, \tau})_c^0, (\bar{\varepsilon}_{3, \eta, t, \tau})_c^0$ ; – відповідно відносні деформації розтягу цементного каменю (розчину) та стиску заповнювача за повного розвантаження бетону. Значення  $(\sigma_{c, \eta, t, \tau})_1^0$  і  $E_{t, 1, t, \tau}^1$  визначаються відповідно за формулами (3) і (8).

Січний модуль деформацій цементного каменю (розчину) в перерізі 2-2 при напруженнях у бетоні, рівних нулю (повне розвантаження), дорівнює:

$$(E_{t, 1, t, \tau}^I)_c^0 = \frac{(\bar{E}_{c, I, \eta, t, \tau} A_1)_c^0 - E_3 A_3}{1 - A_3}, \quad (14)$$

Цементний камінь (розчин), що знаходиться у комбінованому елементі II, буде стиснутим і його січний модуль деформацій за повного розвантаження визначається за формулою, аналогічною (5):

$$(\bar{E}_{II, 1, \eta, t, \tau}^I)_c^0 = E_{0, 1, t, \tau} \left[ 1 - \lambda_{f_{cd}, 1, t, \tau} \frac{\sigma_{3, \eta, t, \tau} - (\sigma_{3, \eta, t, \tau})_c^0}{f_{cd, 1, t, \tau}} \right]. \quad (15)$$

Для всього бетонного перерізу структурної схеми 2 січний модуль деформацій бетону за повного розвантаження після тривалого обтискання, за аналогією з (6), дорівнює

$$(\bar{E}_{c, \eta, t, \tau}^I)_c^0 = F_1 (E_{t, I, t, \tau}^1)_c^0 + \frac{A_3}{\frac{a}{E_3} + \frac{b}{(\bar{E}_{II, 1, \eta, t, \tau}^I)_c^0}} \quad (16)$$

Власний напружений стан в бетоні оцінюється за такими залежностями:

розтягувальні напруження у цементному камені

$$(\sigma_{t, 1, t, \tau})_c^0 = -(\sigma_{c, \eta, t, \tau})_1^0 \frac{(E_{t, I, 1, t, \tau}^1)_c^0}{(\bar{E}_{c, \eta, t, \tau}^I)_c^0}; \quad (17)$$

напруження у заповнювачі

$$(\sigma_{3,\eta,t,\tau})_c^0 = \frac{(\sigma_{t,1,t,\tau})_1^0(1-A_3)}{A_3}; \quad (18)$$

деформації при розвантаженні

$$(\bar{\varepsilon}_{c,\eta,t,\tau})_c^0 = -\frac{\sigma_{c,\eta,\tau}}{(\bar{E}_{c,\eta,t,\tau})_c^0}; \quad (19)$$

Теоретичні значення власного напруженого стану, отримані за вищенаведеними формулами, для бетону серії ТБ-3 наведені в таблиці 1.

Як бачимо з таблиці 1, зі збільшенням початкового рівня тривалого обтискання розтягувальні напруження у цементному камені (розчині) зростають. За рівня  $\eta\tau = 0,5$  ці напруження перевищують міцність цементного каменю на розтяг, тобто, у ньому утворюються поперечні розвантажувальні мікротріщини розриву. Після цього всі вищенаведені формули для визначення власного напруженого стану в перерізі з розвантажувальною тріщиною втрачають зміст.

Таблиця 1

Напружено-деформований стан у бетонах у процесі короточасного розвантаження після тривалого стиску навантаженням різної інтенсивності в системі "розчин-бетон" за ідеалізованою структурною схемою 2 серії ТБ-3

Рівень обтискання	$\eta\tau = \sigma_\tau / f_{ctd,\tau}$								
		0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$(\sigma_{c,\eta,t,\tau})_1^0$	МПа	0,00	3,09	4,67	6,32	8,00	9,72	10,58	13,16
$(\sigma_{3,\eta,t,\tau})_1^0$	МПа	0,00	5,26	7,95	10,76	13,62	16,54	18,31	22,40
$(\varepsilon_{c,\eta,t,\tau})_1^0$	$10^{-5}$	0,0	20,6	34,4	52,2	76,1	109,9	132,0	161,3
$(\sigma_{1,\eta,t,\tau})_1^0$	МПа	0,00	-0,63	-1,17	-1,36	1,62	-	-	-
$(\sigma_{3,\eta,t,\tau})_c^0$	МПа	0,00	0,45	0,83	0,96	1,15	-	-	-

Примітка: знаком – (мінус) позначені розтягувальні напруження. Прочерки у графі для значень  $\sigma_1$  і  $\sigma_3$  табл. 1 при  $\eta\tau=0,6; 0,7; 0,8$  вказують на утворення розвантажувальних мікротріщин розриву по розчину.



**Висновки.** Структурна теорія опору бетонів силовим впливом базується на ідеалізації їх структурних схем. Найповніше роботу бетону при стиску та розтягу відображає ідеалізована структурна схема у вигляді шахового розташування кубічних зерен заповнювача в розчиновій частині бетону (схема 2).

Прийнята ідеалізована структурна схема бетонів дозволила оцінити за заданим складом і реологічними властивостями складових напружено-деформований стан бетонів при розвантаженні після тривалого центрального стиску (модуль пружності, січний модуль деформацій та відносні деформації).

Отримані та запропоновані до практичного застосування теоретичні залежності оцінки напружено-деформованого стану бетонів при розвантаженні після довготривалого прикладання навантаження дають можливість оцінити внутрішній напружено-деформований стан бетону, виходячи з його складу та властивостей складових.

## References

1. Akhverdov M.N. Mekhanizm usadki i polzuchesti betona v svete sovremennykh predstavleniy reologii i fiziki tverdogo tela. Beton i zhelezobeton, 1970, №10. S.21-23.
2. Bit'ko N.M., Kuznetsova O.V., Boyko V.V. Napryazhenno deformirovannoye sostoyaniye betonov pri kratkovremennom tsentral'nom szhatii, iskhodya iz yego idealizirovannykh strukturnykh skhem. Вісник CHDTU № 3.2016, Cherkasi. S. 84-89.
3. Bit'ko N.M., Arkhangel'skaya N.A., Kuznetsova O.V., Boyko V.V. Napryazhenno deformirovannoye sostoyaniye tsementnogo kamnya pri dlitel'nom tsentral'nom szhatii nagruzkoy razlichnoy intensivnosti. Вісник CHDTU № 2.2009, Cherkasi. S. 7-13.
4. Bit'ko N.M., Kuznetsova O.V., Boyko V.V. Teoreticheskiye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya betonov pri dlitel'nom tsentral'nom szhatii. Вісник CHDTU № 4. 2018, Cherkasi. S. 37-45.
5. Gansen T., Polzuchest' i relaksatsiya napryazheniy v betone (perevod s angliyskogo), M., Gosstroyizdat, 1963, s.124.
6. Gegasyan S.G. Sobstvennyye kolebaniya vyazkoupruzhnoy modeli nasledstvennogo stareniya. Beton i zhelezobeton, 2001 №5, s.6-8.
7. Gorokhov Ye.V., Yugov A.M., Veretennikov V.N. i dr. Uchet yavleniya sistemicheskoy neodnorodnosti svoystv tyazhelogo betona «Bezopasnost' ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy. Monografiya. M., 2011, s.146-167.
8. Dmitriyev A.S. Vliyaniye krupnogo zapolnitelya na prochnost' i deformativnost' vysokoprochnogo betona, S b. NIIZHB "Voprosy obshchey tekhnologii i uskoreniye tverdeniye betona" pod redaktsiyey Mironova S.A., M., Stroyizdat, 1970, s.58-63.

9. Zaytsev YU.V. Sovremennoye sostoyaniye mekhaniki betona v Rossii i za rubezhom (stroitel'nyye materialy, oborudovaniya, tekhnologii XXI veka №1, 2003, s.18-19.

10. Krylov S.B., Goncharov Ye.Ye. Ispol'zovaniye reologicheskikh modeley pri modelirovaniy polzuchesti betona. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo, 2013, №2, s.32-33.

11. Makarenko L.P., Bit'ko N.M. Eksperimental'no-statisticheskiye issledovaniya napryazhenno-deformirovanogo sostoyaniya tsementnogo kamnya i betona pri dvukh rezhimakh tsentral'nogo szhatiya s postoyannoy skorost'yu rosta zagruzki i prodol'nykh deformatsiy. Sbornik Voprosy nadezhnosti zhelezobetonnykh konstruksyy pod. redaktsiyey A.S. Lycheva, Kuybyshev, 1977, s.89-92.

12. Makarenko L.P., Bit'ko N.M. Eksperimental'no-statisticheskiye issledovaniya zavisimosti «Napryazheniye deformatsiy v tsementnom kamne i betonakh, pri dlitel'nom tsentral'nom szhatii postoyannoy nagruzkoy razlichnoy intensivnosti sbornik «Voprosy nadezhnosti zhelezobetonnykh konstruksiy» pod. redaktsiyey A.S. Lychova, Kuybyshev, 1976, s.106-109.

13. Makarenko L.P., Fenko G.A. Vliyaniye polzuchesti i usadki pri dlitel'nom obzhatii betonov na ikh treshchinostoykost' i prochnost' pri posleduyushchem rastyazhenii. Sbornik "Polzuchest' i usadka betona" podgotovlennyy NIISK Gosstroy SSSR (Materialy soveshchaniya soyuznoy komisii RILEM), Kiyev, Budivel'nik, 1969.

14. Fenko G.A. Vliyaniye sobstvennykh napryazheniy na svoystva betona. Kandidatskaya dissertatsiya. Poltavskiy ISI, Poltava, 1972.

15. Ovsyanko V.M. Komp'yuternyy analiz elektronnykh modeley, ob'yektov reologii. Izv. vuzov. Stroitel'stv, 2003, № 4, s. 26-34.

16. Tamzazian A.G. Mekhanika polzuchesti betona: monografiya/A.G. Tamzazian S.G. Esajan. Moskva^ NIGSU, 2012.

### **Список використаної літератури**

1. Ахвердов М.Н. Механизм усадки и ползучести бетона в свете современных представлений реологии и физики твердого тела. Бетон и железобетон, 1970, №10. С.21-23.

2. Битько Н.М., Кузнецова О.В., Бойко В.В. Напряженно деформированное состояние бетонов при кратковременном центральном сжатии, исходя из его идеализированных структурных схем. Вісник ЧДТУ № 3.2016, Черкаси. С. 84-89.

3. Битько Н.М., Архангельская Н.А., Кузнецова О.В., Бойко В.В. Напряженно деформированное состояние цементного камня при длительном центральном сжатии нагрузкой различной интенсивности. Вісник ЧДТУ № 2.2009, Черкаси. С. 7-13.

4. Битько Н.М., Кузнецова О.В., Бойко В.В. Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния бетонов при длительном центральном сжатии. Вісник ЧДТУ № 4. 2018, Черкаси. С. 37-45.

5. Гансен Т., Ползучесть и релаксация напряжений в бетоне (перевод с английского), М., Госстройиздат, 1963, с.124.

6. Гегасян С.Г. Собственные колебания вязкоупругой модели наследственного старения. Бетон и железобетон, 2001 №5, с.6-8.
7. Горохов Е.В., Югов А.М., Веретенников В.Н. и др. Учет явления систематической неоднородности свойств тяжелого бетона «Безопасность эксплуатации зданий и сооружений. Монография. М.,2011, с.146-167.
8. Дмитриев А.С. Влияние крупного заполнителя на прочность и деформативность высокопрочного бетона, Сб. НИИЖБ "Вопросы общей технологии и ускорение твердение бетона" под редакцией Миронова С.А., М., Стройиздат, 1970, с.58-63.
9. Зайцев Ю.В. Современное состояние механики бетона в России и за рубежом (строительные материалы, оборудования, технологии XXI века №1, 2003, с.18-19.
10. Крылов С.Б., Гончаров Е.Е. Использование реологических моделей при моделировании ползучести бетона. Промышленное и гражданское строительство, 2013, №2, с.32-33.
11. Макаренко Л.П., Битько Н.М. Экспериментально-статистические исследования напряженно-деформированного состояния цементного камня и бетона при двух режимах центрального сжатия с постоянной скоростью роста загрузки и продольных деформаций. Сборник Вопросы надежности железобетонных конструкций под редакцией А.С. Лычева, Куйбышев, 1977, с. 89-92.
12. Макаренко Л.П., Битько Н.М. Экспериментально-статистические исследования зависимости «Напряжение деформаций в цементном камне и бетонах, при длительном центральном сжатии постоянной нагрузкой различной интенсивности сборник «Вопросы надежности железобетонных конструкций» под редакцией А.С. Лычева, Куйбышев, 1976, с.106-109.
13. Макаренко Л.П., Фенко Г.А. Влияние ползучести и усадки при длительном обжатии бетонов на их трещиностойкость и прочность при последующем растяжении. Сборник "Ползучесть и усадка бетона" подготовленный НИИСК Госстрой СССР (Материалы совещания союзной комиссии РИЛЕМ), Киев, Будівельник, 1969.
14. Фенко Г.А. Влияние собственных напряжений на свойства бетона. Кандидатская диссертация. Полтавский ИСИ, Полтава, 1972.
15. Овсянко В.М. Компьютерный анализ электронных моделей, объектов реологии. Изв. вузов. Строительство, 2003, № 4, с. 26-34.
16. Tamzazian A.G. Mekhanika polzuchesti betona: monografija/A.G. Tamzazian S.G. Esajan. Moskva^ NIGSU,2012.