

УДК 624.012:539.376

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.90.1047

РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК УСАДКИ І ПОВЗУЧОСТІ БЕТОНУ

СЛОБОДЯНИУК С. О.

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (066) 213-78-23, e-mail: slobodianiuk.sergey@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4874-7296

Анотація. Постановка проблеми. У розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно враховувати усадку і повзучість бетону, які є не другорядним фактором, тому що за тривалої експлуатації таких споруд ці фактори можуть суттєво змінювати напружено-деформований стан конструкцій у часі та викликати появу граничних деформацій, тріщин і їх руйнування. Тому у проектуванні бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно враховувати вплив усадки і повзучості бетону. Для цього проєктант повинен мати параметри, які входять у рівняння і розрахункові формули. Цих параметрів багато і вони визначаються експериментально та залежать від багатьох факторів. Однак проєктант повинен мати ці параметри уже тоді, коли ще немає ніяких експериментальних даних про матеріал і конструкцію, але коли матеріал (клас міцності) уже заданий. Таким чином, виникає необхідність розрахункового визначення необхідних параметрів на основі головних факторів. Найпростіше розрахункове визначення характеристик повзучості бетону можливе за теорією старіння при постійному модулі пружності бетону, яка частково враховує післядію (оборотність) деформацій повзучості. Таку теорію будемо називати технічною теорією старіння і вона оперує найменшою кількістю параметрів (усього 2) та тільки однією кривою повзучості при початковому віку навантаження t_0 , а не сімейством цих кривих. **Мета статті** – розроблення теоретичних рішень та практичних способів урахування розрахункових характеристик усадки і повзучості бетону в будівельних нормах проектування. **Висновок.** Отримано розвиток зручної для практичного використання лінійної теорії повзучості бетону – технічної теорії старіння, і розробку на її основі теоретичних рішень та практичних способів урахування розрахункових характеристик усадки і повзучості бетону в будівельних нормах проектування.

Ключові слова: бетон; усадка; характеристика повзучості; технічна теорія старіння

CALCULATED VISION OF SHRINKAGE AND TOUCH CHARACTERISTICS OF CONCRETE

SLOBODIANIUK S.O.

Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (066) 213-78-23, e-mail: slobodianiuk.sergey@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4874-7296

Abstract. Raising of problem. When calculating concrete and reinforced concrete structures, it is necessary to take into account the shrinkage and creep of concrete, which are not a minor factor. Because during long-term operation of such structures, these factors can significantly change the stress-strain state of structures over time and lead to the appearance of extreme deformations, cracks and their destruction. Therefore, when designing concrete and reinforced concrete structures, it is necessary to take into account the influence of shrinkage and creep of concrete. To do this, the designer must have the parameters included in the equations and calculation formulas. There are numerous of parameters and they are determined experimentally and depend on many factors. However, the designer must have these parameters even when there is no experimental data on the material and design, but when the material (strength class) has already been specified. Thus, there is a need to calculate the required parameters based on the main factors. The simplest computational determination of the creep characteristics of concrete is possible using the theory of aging at a constant modulus of elasticity of concrete, which partially takes into account the aftereffect (reversibility) of creep deformations. We will call such a theory the technical theory of aging and it operates with the smallest number of parameters (2 in total) and only one creep curve at the initial load age t_0 , and not with a family of these curves. **Purpose.** Development of theoretical solutions and practical methods for taking into account the design characteristics of shrinkage and creep of concrete in building design standards. **Conclusion.** The work resulted in the development of a convenient for practical use linear theory of concrete creep – the technical theory of aging and the development on its basis of theoretical solutions and practical methods for taking into account the calculated characteristics of shrinkage and creep of concrete in building design standards.

Keywords: concrete; shrinkage; creep characteristics; technical theory of aging

Постановка проблеми. Під час розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій (ЗБК) визначають зусилля, які виникають на всіх стадіях роботи (виготовлення, транспортування, монтаж, експлуатація) і потім перевіряють їх по першій і другій групах граничного стану. Якщо залізобетонна конструкція статично не визначена, зусилля в ній залежать від співвідношення деформацій елементів цієї конструкції, а оскільки на ці деформації у часі сильно впливає усадка і повзучість бетону, визначати зусилля в загальному випадку необхідно з урахуванням цих тривалих процесів. Тому в такому розрахунку міцності і стійкості ЗБК (перша група) необхідно враховувати тривалі процеси – усадку і повзучість бетону. При розрахунку деформацій, жорсткості і тріщиностійкості (переміщень, прогинів, втрат попереднього напруження тощо) ЗБК (друга група) вплив тривалих процесів ще більш суттєвий, тому їх також необхідно враховувати.

Таким чином, для розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно враховувати усадку і повзучість бетону, які є не другорядним фактором, оскільки за тривалої експлуатації таких споруд ці фактори можуть суттєво змінювати напружено-деформований стан конструкцій у часі та викликати появу граничних деформацій, тріщин і їх руйнування.

При проектуванні бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно враховувати вплив усадки і повзучості бетону. Для цього проєктант повинен мати параметри, які входять у рівняння і розрахункові формули. Цих параметрів багато і вони визначаються експериментально та залежать від багатьох факторів. Однак проєктант повинен мати ці параметри уже тоді, коли ще немає ніяких експериментальних даних про матеріал і конструкцію, але коли матеріал (клас міцності) уже заданий.

Таким чином, виникає необхідність розрахункового визначення необхідних параметрів на основі головних факторів. Найпростіше розрахункове визначення

характеристик повзучості бетону можливе за теорією старіння при постійному модулю пружності бетону, яка частково враховує післядію (оборотність) деформацій повзучості [20]. Таку теорію будемо називати технічною теорією старіння (ТТС) і вона оперує найменшою кількістю параметрів (усього 2) та тільки однією кривою повзучості при початковому віку навантаження t_0 , а не сімейством цих кривих.

Аналіз публікацій. Класичну теорію старіння (ТС) створили Ц. Уїтней у 1932 р., Ф. Дішингер у 1934 р. і незалежно від них М. О. Буданов у 1936 році. В подальшому її використовували і вдосконалювали такі вчені як Я. В. Столяров, В. А. Бовін, І. І. Улицький, О. Б. Голишев, Я. Д. Лівшиц, Є. А. Яценко, А. М. Смирнов, Б. Ф. Деркач, С. Е. Фрайфельд, Г. Рюле, Ф. Леонгардом та ін.

Ця теорія приймає допущення про паралельність кривих повзучості, які відповідають різним термінам початку навантаження бетону, тобто характеристика повзучості визначається за формулою:

$$\varphi(t, \tau) = \varphi(t) - \varphi(\tau). \quad (1)$$

Також суттєвий вклад у розроблення і удосконалення цієї теорії внесли вітчизняні науковці Дніпропетровської школи повзучості (ДІБ–ДІБІ–ПДАБА) д. т. н., професори: М. О. Буданов (у 1936 р. незалежно створив і розробив теорію старіння, яка не враховує оборотність деформацій повзучості); В. А. Бовін використовував ТС для розрахунку ЗБК починаючи з 1939 р.; Є. А. Яценко у 1962 році створив і розробив модифіковану теорію старіння (МТС), яка враховує оборотність деформацій повзучості; О. Б. Голишев виконував дипломну роботу під керівництвом проф. М. О. Буданова, закінчив ДІБІ у 1953 році і пізніше очолив Київську школу повзучості після І. І. Улицького.

У статті використано тільки монографії вищезгаданих вчених, науково-нормативну

літературу [1–19] і авторів [20–24] та виконаний їх аналіз за 50 років.

Мета статті – розвиток зручної для практичного використання лінійної теорії повзучості бетону – технічної теорії старіння, і розроблення на її основі теоретичних рішень та практичних способів урахування розрахункових характеристик усадки і повзучості бетону в будівельних нормах проектування.

Виклад матеріалу. Фактичні напруження, які виникають у процесі тривалої експлуатації бетонних і залізобетонних споруд, не перевищують в основному 0,45 межі міцності бетону $f_{ck}(t_0)$, тому лінійна повзучість становить найбільший інтерес з точки зору їх проектування. На жаль, у ДБН В.2.6-98:2009 [18] для розрахунку ЗБК на усадку взагалі відсутні дані по бетону, а з повзучості немає даних по $\varphi(\infty, t_0)$.

Проектант повинен розуміти, що з моменту виготовлення бетонної або залізобетонної конструкції в ній з часом t виникають самовільні відносні деформації усадки бетону:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh}(\infty) (1 - e^{-\gamma t}) = \varepsilon_{sh}(\infty) \Phi_t, \quad (2)$$

які не залежать від напруження. Потім в момент навантаження цієї конструкції напруженням σ_0 у віці бетону $\tau = t_0$ в ній виникає пружно-миттєва відносна деформація:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0}(t_0) = \sigma_0/E_0 \quad (3)$$

і далі за постійних навантажень напруженням $\sigma_0 = \text{const}$ у часі t виникає проста повзучість:

$$\varepsilon_{ct}^0 = C(t, t_0) \sigma_0 = \varphi_t \sigma_0/E_0. \quad (4)$$

При монотонно змінних у часі напруженнях $\sigma(t) = \sigma_0 + \sum_{\tau_i=t_0}^{\tau_i=t} \Delta\sigma(\tau_i)$ відносні деформації повзучості знаходять за формулою:

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{ct}^0 + \int_{t_0}^t \frac{d\varepsilon_{ct}}{d\tau} d\tau. \quad (5)$$

$$\vec{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_0 \\ \dot{\varepsilon}_0 \\ \ddot{\varepsilon}_0 \\ \dots \end{vmatrix}; \quad \vec{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_0 \\ \dot{\sigma}_0 \\ \ddot{\sigma}_0 \\ \dots \end{vmatrix}; \quad \vec{\varepsilon}_u = \begin{vmatrix} 0 \\ \dot{\varepsilon}_{u0} \\ \ddot{\varepsilon}_{u0} \\ \dots \end{vmatrix}; \quad (E + C) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \varphi_0 & 1 & 0 \\ 0 & \varphi_0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Таким чином, повні відносні деформації бетону в момент часу t знаходять за формулою:

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_y + \varepsilon_0 + \varepsilon_{ct} = \varepsilon_{ct}(t, t_0) = \varepsilon_{sh}(t) + \varepsilon_{c0}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t, t_0). \quad (6)$$

Підставивши (3) і (4, 5) у (6), отримаємо залежність між відносними деформаціями та напруженнями в бетоні. Для лінійної повзучості теорії старіння (ТС) при $\sigma_0 = \text{const}$ (проста повзучість) ця залежність буде:

$$E_0 \varepsilon_{ct} = E_0 \varepsilon_{sh} + \sigma_0 + \varphi_t \sigma_0. \quad (7)$$

При монотонно змінних у часі напруженнях $\sigma(t) = \sigma_0 + \sum_{\tau_i=t_0}^{\tau_i=t} \Delta\sigma(\tau_i)$ ця залежність для лінійної технічної теорії старіння (ТТС, $E_0 = \text{const}$, $t_0 = 0$) буде:

$$E_0 \varepsilon_{ct} = E_0 \varepsilon_{sh} + (1 + \varphi_t) \sigma_0 + \int_0^t d\sigma_{\tau} / d\tau (1 + \varphi_t - \varphi_{\tau}) d\tau. \quad (8)$$

При заміні інтеграла алгебраїчним рівнянням одержимо наближене рішення:

$$E_0 \varepsilon_{ct} \approx E_0 \varepsilon_{sh} + \sigma_0 k_{1t} + \sigma_t k_{2t}, \quad (9)$$

де коефіцієнти дорівнюють по ТС:

І. І. Улицький [1, с. 69]

$$k_{1t} = \varphi_t/2; \quad k_{2t} = 1 + \varphi_t/2; \quad (10)$$

по МТС:

О. Б. Голишев [12, с. 46]

$$k_{1t} = (1 - \alpha) \varphi_t/2; \quad k_{2t} = 1 + (1 + \alpha) \varphi_t/2; \quad \alpha = 0,5/\xi_{1t}; \quad (11)$$

Я. Д. Лівшиц [7, с. 29]

$$k_{1t} = (1 - \alpha) \varphi_t/3; \quad k_{2t} = 1 + (2 + \alpha) \varphi_t/3; \quad \alpha = 0,45/\xi_{1t}; \quad (12)$$

при $E_0 = \text{const}$, $t_0 = 0$, $\varphi_t = \varphi_0 (1 - e^{-\gamma t}) = \varphi_0 \Phi_t$.

Точний розв'язок інтегрального рівняння (8) одержав д. т. н., проф., академік АБУ Євген Андрійович Яценко (мій Учитель) матричним методом початкових параметрів повзучості (ММППП) [14, с. 65]:

$$E_0 \vec{\varepsilon}_{ct} = E_0 \vec{\varepsilon}_y + (E + C) \vec{\sigma}_t \quad (13)$$

або

$$E_0 \vec{\varepsilon} = E_0 \vec{\varepsilon}_u + (E + C) \vec{\sigma}, \quad (14)$$

де вектори-стовпці початкових параметрів і матриця повзучості дорівнюють:

У векторах крапками над буквами позначено порядок похідної по Φ , а нулики внизу вказують на те, що функції і їх похідні взяті при $\Phi = 0$.

$$F(\Phi) = F_0 + \dot{F}_0 \Phi/1! + \ddot{F}_0 \Phi^2/2! + \ddot{\ddot{F}}_0 \Phi^3/3! + \dots = F_0 + \sum_{n=1}^{n=9} F_0^n \Phi^n/n! , \quad (16)$$

де $\Phi = \Phi_t = (1 - e^{-\gamma t})$; $F_0 = F(0)$; $\dot{F}_0 = \frac{dF}{d\Phi}$ ($\Phi = 0$); $\ddot{F}_0 = d^2F/d\Phi^2$ при $\Phi=0$; $\ddot{\ddot{F}}_0 = d^3F/d\Phi^3$ при $\Phi = 0$; ... і т. д.

Розрахунок параметрів, які характеризують усадку і повзучість бетону, оснований на пропозиції І. І. Улицького [2] обчислювати їх граничні значення як добуток цих нормативних значень (знайдених статистичною обробкою експериментальних даних у нормальних лабораторних умовах) на систему коефіцієнтів, які враховують головні фактори (вік навантаження бетону – ξ_1 ; масштабний фактор – ξ_2 ; вологість середовища – ξ_3). Для усадки і повзучості бетону ці розрахункові залежності відповідно мають вигляд:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh}(\infty) = \varepsilon_{sh}^n \xi_{1y} \xi_{2y} \xi_{3y}$$

і

$$\varphi_0 = \varphi_\infty = \varphi(\infty, t_0) = \varphi_\infty^n \xi_{1p} \xi_{2p} \xi_{3p}. \quad (17)$$

Нормативні граничні значення відносних деформацій усадки ε_{sh}^n та характеристики повзучості бетону φ_∞^n приймаються середньостатистичними із забезпеченням 0,5 і відповідають базовим лабораторним умовам: навантаженням зразків у віці $\tau = t_0 = 28$ діб, їх вологого висихання протягом 7 діб та подальшого натурального твердіння зразка за вологості навколишнього середовища 60 %.

Нормативною граничною відносною деформацією усадки бетону ε_{sh}^n називається її гранична величина при $t \rightarrow \infty$, яка відраховується з моменту закінчення вологого висихання протягом 7 діб бетонних зразків розміром $150 \times 150 \times 600$ мм та подальшого натурального твердіння за вологості навколишнього середовища 60 %.

Нормативна гранична характеристика повзучості бетону φ_∞^n визначається за формулою:

Шукана функція буде знаходитися точно по (не більше) 10 початковим параметрам ряду Маклорена:

$$\varphi_\infty^n = \varepsilon_n / \varepsilon_0 = E_{cm} C_\infty^n. \quad (18)$$

при $E_{cm} = E_0$ – модулі пружності бетону у віці $\tau = t_0 = 28$ діб.

Нормативною граничною питомою деформацією лінійної повзучості бетону C_∞^n називається гранична величина міри повзучості за $t \rightarrow \infty$, яка спричинена постійним напруженням 0,1 МПа до бетонних зразків розміром $150 \times 150 \times 600$ мм у віці $\tau = t_0 = 28$ діб, їх вологого висихання протягом 7 діб та подальшого натурального твердіння зразка за вологості навколишнього середовища 60 %.

На початковому варіанті проектування стержневих ЗБК у проектанта, як правило, задано тільки вид та клас міцності бетону. Тому пропонується знаходити нормативні граничні характеристики усадки ε_{sh}^n і повзучості φ_∞^n бетону по таблиці 1, які одержані середніми із забезпеченням 0,5 з науково-нормативної літератури [1...19] та їх аналізу за 50 років. Вид бетону для аналізу був взятий тільки один – важкий бетон натурального твердіння.

Як видно з таблиці 1, значення граничної нормативної характеристики повзучості бетону змінюється в межах від $\varphi_\infty^n = 1$ до $\varphi_\infty^n = 4$, як і передбачав І. І. Улицький [1, с. 9] ще у 1960 році. Примітки до таблиці 1 взято з роботи професора О. Б. Голишева [13, с. 5] 2000 року.

На заключному варіанті проектування проектанту стає уже відомий точний вид бетону та його осадка конуса і жорсткість. Тоді більш точні дані граничних нормативних характеристик можна знайти у працях проф. О. Б. Голишева [13; 17].

Тут надано рекомендації тільки для початкового (наближеного) варіанта проектування стержневих бетонних і залізобетонних конструкцій із важкого бетону натурального твердіння.

Таблиця 1

Нормативні характеристики важкого бетону натурального твердіння

Гранична відносна деформ. усадки бетону у віці 7 діб, $\varepsilon_{sh}^n 10^5$	Гранична харак. повз. бет. навант. у віці $\tau=t_0=28$ діб, $\varphi_{\infty}^n = E_{cm} C_{\infty}^n$	Гранична міра повзучості бет. навант. у віці $\tau=t_0=28$ діб, $C_{\infty}^n 10^5$ (1/МПа)	Середній модуль пружності у віці $\tau=t_0=28$ діб, E_{cm} (ГПа)	Гарантована міцність, $f_{ck,cube}$ (МПа)	Нормативний опір, f_{ck} (МПа)	Клас і марки важкого бетону натурального твердіння		
						М	В	С
35	4,00	22	18	10	8	100	10	8/10
35	3,80	18	21	12	10	125	12,5	10/12
33	3,70	16	23	15	12	150	15	12/15
33	3,20	12	27	20	16	200	20	16/20
33	3,00	10	30	25	20	250	25	20/25
33	2,60	8	32,5	30	25	300	30	25/30
33	2,40	7	34,5	35	30	350	35	30/35
33	2,15	6	36	40	32	400	40	32/40
33	2,05	5,5	37,5	45	35	450	45	35/45
33	1,95	5	39	50	40	500	50	40/50
33	1,80	4,5	39,5	55	45	550	55	45/55
33	1,60	4	40	60	50	600	60	50/60
30	1,50	3,5	43	75	60	700	70	60/75
30	1,35	3	45	85	70	800	80	70/85
30	1,15	2,5	46	95	80	900	90	80/95
30	1,00	2	48	105	90	1000	100	90/105

Примітка: 1. Для бетону при термовології обробці значення C_{∞}^n (φ_{∞}^n) і ε_{sh}^n треба помножити на коефіцієнт 0,9. 2. Значення C_{∞}^n (φ_{∞}^n) треба крім цього помножити на коефіцієнти для важкого бетону, виготовленого: 1,35 – на пуцолановому портландцементі; 1,15 – на шлакопортландцементі при навантаженні його в умовах атмосферної вологості; 0,85 – при навантаженні у вологонасиченому середовищі та для бетону, виготовленого на крупному заповнювачі із вапняку. 3. Проміжні значення розрахункових параметрів знаходять по лінійній інтерполяції.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів ξ_i ($i = 1, 2, 3$) для важкого бетону натурального твердіння

Вік бетону в момент навантаження $\tau = t_0$ (діб), $\xi_{1п}$ (для повзучості)	28 і менше	45	60	90	180	365	730 і більше
	1,0	0,90	0,85	0,75	0,65	0,60	0,5
Вік бетону до початку висихання τ (діб), $\xi_{1у}$ (для усадки)	1	7	28	60	90	180	365 і більше
	1,05	1,0	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
Модуль відкритої площі елемента M_0 , 1/м $\xi_{2п}$ (для повзучості)	0	5	10	20	40	60	80 і >
	0,70	0,80	0,85	0,90	1,0	1,05	1,10
$\xi_{2у}$ (для усадки)	0,70	0,80	0,85	0,90	1,0	1,05	1,10
	Відносна вологість середовища W, % $\xi_{3п}$ (для повзучості)	40 і <	50	60	70	80	90
$\xi_{3у}$ (для усадки)	1,30	1,15	1,0	0,90	0,80	0,65	0,50
	1,30	1,15	1,0	0,90	0,80	0,60	0,20

Примітка: 1. Модуль відкритої площі елемента $M_0 = F/V$ (F – площа поверхні елемента відкритої для висихання, m^2 ; V – об'єм елемента, m^3). Для стержневих елементів можна за формулою $M_0 = P/A$ (P – периметр поперечного перерізу відкритої поверхні елемента, м; A – площа поперечного перерізу елемента, m^2), 1/м. 2. Для елементів типових конструкцій, для яких невідомий кліматичний район експлуатації, допускається приймати $\xi_{3п} = \xi_{3у} = 1$.

Розрахункові граничні характеристики усадки ε_{sh} і повзучості φ_0 бетону знаходять за формулами (17), які є їх граничними значеннями при $t \rightarrow \infty$ та відповідають фактичним умовам роботи конструкції. Вони входять у розрахунок конструкції та

визначаються добутком нормативних граничних значень на систему коефіцієнтів, які враховують: вік навантаження бетону – ξ_1 ; масштабний фактор – ξ_2 ; вологість середовища – ξ_3 , відповідно для усадки і повзучості бетону. Їх значення для усадки і

повзучості різні і наведені в таблиці 2. Коефіцієнти ξ_i ($i = 1, 2, 3$) для важкого бетону натурального твердіння взяті середніми із забезпеченням 0,5 з науково-нормативної літератури [2–4; 6–8; 10; 12–14; 17].

Примітка до таблиці 2 взята з роботи професора О. Б. Голишева [13, с. 6] 2000 року.

Якщо силові дії або вимушені деформації (переміщення) прикладають до конструкції поступово в різному віці, то значення ε_{sh} і φ_0 визначають з урахуванням віку бетону до моменту прикладення кожного із цих дій.

Визначення швидкості тривалих процесів γ та проміжних значень функції Φ_t

для характеристик усадки $\varepsilon_{sh}(t)$ і повзучості $\varphi(t, t_0)$, відповідно заданому моменту часу t в частках від їх граничних значень, знаходимо по таблиці 3. Вона побудована на основі експериментальних даних та встановленого факту, що криві усадки і повзучості подібні та їх частка складає 75 % і 85 % від граничних значень через один і два роки відповідно [2, с. 14]. Також за унікальними експериментами Девіса, які продовжувались 30 років, можна установити долю усадки і повзучості в 90 % і 95 % від граничних значень через 7 і 15 років відповідно.

Таблиця 3

Проміжні значення функції Φ_t і швидкості тривалих процесів γ

t , діб	3	7	28	60	90	180	365 (1 р.)	730 (2 р.)	2 555 (7 р.)	5 475 (15 р.)
$\varphi_t/\varphi_\infty = \varepsilon_{sh}^t/\varepsilon_{sh}^\infty = \Phi_t$	0,1	0,2	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,90	0,95
γ (1/діб)	0,035	0,032	0,015	0,010	0,009	0,006	0,004	0,0026	0,0009	0,0005

Якщо будуть відомі точні експериментальні дані по шести параметрах спадкової теорії старіння (СТС), для перевірки проєктант може використати цю найбільш точну теорію повзучості. Приклади розрахунків ЗБК і співставлення, за теорією старіння за постійного модуля пружності (ТТС) і спадкової теорії старіння з урахуванням зростання модуля пружності бетону (СТС) модифікованим методом початкових параметрів повзучості (ММППП), можна знайти у працях [20–24].

Пропозиції. Пропонується в ДБН В.2.6.–98:2009 [18] ввести такі зміни:

п. 3.1.3.1 доповнити реченням: «Якщо напруження стиску бетону у віці t_0 не перевищує величину $0,45 f_{ck}(t_0)$, то повзучість треба розглядати як лінійну»;

п. 3.1.3.2 доповнити реченнями і формулами: «Пружно-миттєва деформація бетону $\varepsilon_{c0}(t_0)$, при напруженні стиску σ_c прикладеної до бетону у віці t_0 , представлена виразом:

$$\varepsilon_{c0}(t_0) = (\sigma_c/E_c),$$

а при напруженні $\sigma_c = \text{const}$ повні відносні деформації бетону у часі t визначаються так:

$$\varepsilon_{ct}(t, t_0) = \varepsilon_{sh}(t) + \varepsilon_{c0}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{sh}(t) + (1 + \varphi(\infty, t_0)) (\sigma_c/E_c).$$

Відносні деформації усадки бетону у часі t можна визначити так:

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh}(\infty) (1 - e^{-\gamma t}) = \varepsilon_{sh}(\infty) \Phi_t,$$

а коефіцієнт повзучості, за умови $t_0 = 0$, так:

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi(\infty) \text{ і } \varphi(t, t_0) = \varphi(t) = \varphi(\infty) (1 - e^{-\gamma t}) = \varphi(\infty) \Phi_t,$$

де $\Phi_t = (1 - e^{-\gamma t})$ і γ – швидкість тривалих процесів (1/діб)»;

п. 3.1.3.3 доповнити реченнями, формулами і таблицями: «Розрахункові граничні характеристики бетону для часу $t = \infty$ представлені виразом: для усадки:

$$\varepsilon_{sh}(\infty) = \varepsilon_{sh}^n \xi_{1y} \xi_{2y} \xi_{3y},$$

а для повзучості:

$$\varphi(\infty) = \varphi_\infty^n \xi_{1п} \xi_{2п} \xi_{3п}.$$

Нормативні граничні характеристики усадки ε_{sh}^n і повзучості φ_∞^n для важкого бетону натурального твердіння наведені в таблиці 1.

Коефіцієнти для усадки ξ_{iy} і повзучості ξ_{ip} ($i = 1, 2, 3$) важкого бетону натурального

твердіння, які враховують вплив відхилень фактичних умов навантаження, виготовлення і експлуатації стержневих бетонних і залізобетонних елементів конструкцій від базових, визначаються по таблиці 2.

Якщо силові дії або вимушені деформації (переміщення) прикладають до елементів поступово в різному віці, то значення $\varepsilon_{sh}(\infty)$ і $\varphi(\infty)$ обчислюють з урахуванням віку бетону до моменту прикладення кожної з цих дій.

Показник швидкості тривалих процесів γ та проміжних значень функції Φ_t для характеристик усадки $\varepsilon_{sh}(t)$ і повзучості $\varphi(t)$ бетону, відповідно до заданого моменту часу t в частках від їх граничних значень знаходимо по таблиці 3...»

Висновки

Широке використання бетонних і залізобетонних конструкцій у будівництві робить актуальним при їх проектуванні врахування тривалих процесів – усадки і повзучості бетону. Вміння правильно враховувати деформативність цих процесів у проектуванні необхідне для виготовлення таких конструкцій, які найбільше будуть задовольняти технічним, експлуатаційним і економічним вимогам.

Отримано розвиток зручної для практичного використання лінійної теорії повзучості бетону – технічної теорії старіння (ТТС, $E_0 = \text{const}$, $t_0 = 0$), і розроблено на її основі теоретичні рішення та практичні способи врахування розрахункових характеристик усадки і повзучості бетону в будівельних нормах проектування (ДБН), тобто у проектуванні (розрахунках) бетонних і залізобетонних стержневих конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Улицький І. І., Чжан Чжун-Яо, Голишев О. Б. Розрахунок залізобетонних конструкцій з урахуванням тривалих процесів. Київ : Держ. вид. літ. по будівн. і арх., 1960. 496 с.
2. Улицький І. І. Теорія і розрахунок залізобетонних стержневих конструкцій з урахуванням тривалих процесів. Київ : Будівельник, 1967. 348 с.
3. Бондаренко В. М. Деякі питання нелінійної теорії залізобетону. Харків : Хар. Університет, 1968. 324 с.
4. Лівшиц Я. Д. Розрахунок залізобетонних конструкцій з урахуванням усадки і повзучості бетону. Київ : Вища школа, 1971. 232 с.
5. Довідник інженера-конструктора жилих і громадських будівель за заг. ред. к. т. н. О. А. Диховичного, 1975. 438 с.
6. Голишев О. Б., Поліщук В. П., Руденко І. В. Розрахунок залізобетонних стержневих конструкцій з урахуванням фактора часу : посіб. проєктанту. Київ : Будівельник, 1975. 112 с.
7. Лівшиц Я. Д. Розрахунок залізобетонних конструкцій з урахуванням впливу усадки і повзучості бетону. Київ : Вища школа, 1976. 280 с.
8. Голишев О. Б., Поліщук В. П., Руденко І. В. Розрахунок залізобетонних стержневих конструкцій з урахуванням фактора часу. Київ : Будівельник, 1984. 128 с.
9. БНІП 2.03.01-84*. Бетонні і залізобетонні конструкції. Будівельні норми і правила. Київ, 1986. 84 с.
10. Рекомендації по урахуванню повзучості і усадки бетону при розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій. Київ : НДІЗБ, 1988. 120 с.
11. Design of Concrete Structures. EUROCODE № 2. 1989. 94 с.
12. Голишев О. Б. та ін. Проектування залізобетонних конструкцій: довідковий посібник за заг. ред. О. Б. Голишева. Київ : Будівельник, 1990. 544 с.
13. Голишев О. Б., Ткаченко І. Н. Практичні способи урахування повзучості і усадки бетону при розрахунку залізобетонних конструкцій. Київ : Логос, 2000. 88 с.
14. Яценко Є. А., Корнілова С. В., Бовін А. А., Соссу Г. Теорія повзучості залізобетонних конструкцій. Дніпропетровськ : Guadeamus, 2000. 600 с.
15. СНБ 5.03.01-02. Бетонні і залізобетонні конструкції. 2003. 140 с.
16. СП 52-101-03. Бетонні і залізобетонні конструкції без попереднього напруження арматури. 2003. 126 с.
17. Голишев О. Б., Кривошеєв П. І. Практичні способи урахування повзучості і усадки бетону при розрахунку збірно-монолітних конструкцій : довідковий посіб. Київ : Логос, 2008. 104 с.
18. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Державні будівельні норми України. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.

19. Lira – Soft – ПК ЛПА–9.6–R9–X86–x64–2012. Пояснення до ЛПА 9.6. п. 3.1.4. Повзучість і усадка, 03: 2012. 6 с.
20. Яценко Є. А., Слободянюк С. О. Теорія тривалої міцності та стійкості стержневих залізобетонних систем з урахуванням повзучості бетону. Дніпропетровськ : ПДАБА, «Пороги», 2002. 252 с.
21. Слободянюк С. О., Яценко Є. А. Взаємодія попередньо напруженої арматури з бетоном і розрахунок одношарових стінових панелей з урахуванням повзучості поризованого бетону. Дніпропетровськ : ПДАБА, «Пороги», 2007. 280 с.
22. Слободянюк С. О., Буратинський А. П., Климпотюк Д. В., Титюк А. О., Шаповал В. Г. Теорія тривалої міцності та стійкості стержневих залізобетонних систем з урахуванням повзучості та віброповзучості бетону за заг. ред. д. т. н., проф. С. О. Слободянюка : моногр. в 3 ч. Ч. I. Дніпро : ПДАБА, «Середняк Т. К.», 2014. 156 с.
23. Слободянюк С. О., Буратинський А. П., Щербачов А. Д., Слободянюк О. С., Шаповал А. В. Теорія тривалої міцності та стійкості стержневих залізобетонних систем з урахуванням повзучості та віброповзучості бетону за заг. ред. д. т. н., проф. С. О. Слободянюка : моногр. в 3 ч. Ч. II. Дніпро : ПДАБА, «Середняк Т. К.», 2015. 150 с.
24. Слободянюк С. О., Буратинський А. П., Щербачов А. Д., Слободянюк О. С., Хамрик О. В. Теорія тривалої міцності та стійкості стержневих залізобетонних систем з урахуванням повзучості та віброповзучості бетону за заг. ред. д. т. н., проф. С. О. Слободянюка : моногр. в 3 ч. Ч. III. Дніпро : ПДАБА, «Середняк Т. К.», 2016. 202 с.

REFERENCES

1. Ulytskyi I.I., Zhang Zhong-Yao and Golyshev O.B. *Rozrakhunok zalizobetonnykh konstrukttsii z urakhuvanniam tryvalykh protsesiv* [Calculation of reinforced concrete structures taking into account long-term processes]. Kyiv : State kind. summer by civil engineering and arch., 1960, 496 p. (in Ukrainian).
2. Ulytskyi I.I. *Teoriia i rozrakhunok zalizobetonnykh sterzhnevyykh konstrukttsii z urakhuvanniam tryvalykh protsesiv* [Theory and calculation of reinforced concrete rod structures taking into account long-term processes]. Kyiv : Budivelnik Publ., 1967, 348 p. (in Ukrainian).
3. Bondarenko V.M. *Deiaki pytannia nelineinoi teorii zalizobetonu* [Some issues of nonlinear theory of reinforced concrete]. Kharkiv : Khar. University Publ., 1968, 324 p. (in Ukrainian).
4. Livshits Ya.D. *Rozrakhunok zalizobetonnykh konstrukttsii z urakhuvanniam usadky i povzuchosti betonu* [Calculation of reinforced concrete structures taking into account the shrinkage and creep of concrete]. Kyiv : Higher School Publ., 1971, 232 p. (in Ukrainian).
5. *Dovidnyk inzhenera-konstruktora zhylykh i hromadskykh budivel* [Handbook of the engineer-designer of residential and public buildings]. in general. ed. Ph. D. O.A. Dykhovychnoy, 1975, 438 p. (in Ukrainian).
6. Golyshev O.B., Polishchuk V.P. and Rudenko I.V. *Rozrakhunok zalizobetonnykh sterzhnevyykh konstrukttsii z urakhuvanniam faktora chasu : posib. proekt* [Calculation of reinforced concrete rod structures taking into account the time factor: manual. the designer]. Kyiv : Budivelnik Publ., 1975, 112 p. (in Ukrainian).
7. Livshits Ya.D. *Rozrakhunok zalizobetonnykh konstrukttsii z urakhuvanniam vplyvu usadky i povzuchosti betonu* [Calculation of reinforced concrete structures taking into account the influence of shrinkage and creep of concrete]. Kyiv : Higher School Publ., 1976, 280 p. (in Ukrainian).
8. Golyshev O.B., Polishchuk V.P. and Rudenko I.V. *Rozrakhunok zalizobetonnykh sterzhnevyykh konstrukttsii z urakhuvanniam faktora chasu* [Calculation of reinforced concrete rod structures taking into account the time factor]. Kyiv : Budivelnik Publ., 1984, 128 p. (in Ukrainian).
9. *Betonni i zalizobetonni konstrukttsii. Budivelni normy i pravyla* [Concrete and reinforced concrete structures. Building norms and rules]. BNiP 2.03.01-84*, 1986, 84 p. (in Russian).
10. *Rekomendatsii po urakhuvanniu povzuchosti i usadky betonu pry rozrakhunku betonnykh i zalizobetonnykh konstrukttsii* [Recommendations for taking into account the creep and shrinkage of concrete when calculating concrete and reinforced concrete structures]. NDIZB, 1988, 120 p. (in Russian).
11. Design of Concrete Structures. EUROCODE No. 2, 1989, 94 p.
12. Golyshev O.B. and oth. *Proektuvannia zalizobetonnykh konstrukttsii : dovidkovyi posibnyk* [Design of reinforced concrete structures : a reference guide]. In general ed. O.B. Golyshev, Kyiv : Budivelnik publ., 1990, 544 p. (in Ukrainian).
13. Golyshev O.B. and Tkachenko I.N. *Praktychni sposoby urakhuvannia povzuchosti i usadky betonu pry rozrakhunku zalizobetonnykh konstrukttsii* [Practical methods of taking into account the creep and shrinkage of concrete in the calculation of reinforced concrete structures]. Kyiv : Logos Publ., 2000, 88 p. (in Ukrainian).
14. Yatsenko E.A., Kornilova S.V., Bovin A.A. and Sossu H. *Teoriia povzuchosti zalizobetonnykh konstrukttsii* [Theory of creep of reinforced concrete structures]. Dnipropetrovsk : Guadeamus Publ., 2000, 600 p. (in Ukrainian).
15. *Betonni i zalizobetonni konstrukttsii* [Concrete and reinforced concrete structures]. SNB 5.03.01-02, 2003, 140 p. (in Russian).
16. *Betonni i zalizobetonni konstrukttsii bez poperednoho napruzhenia armatury* [Concrete and reinforced concrete structures without prestressing the reinforcement]. SP 52-101-03, 2003, 126 p. (in Russian).

17. Golyshev O.B. and Kryvosheev P.I. *Praktychni sposoby urakhuvannia povzuchosti i usadky betonu pry rozrakhunku zbirno-monolitnykh konstruksii : dovidkovyi posibnyk* [Practical ways of taking into account the creep and shrinkage of concrete in the calculation of prefabricated monolithic structures : a reference guide]. Kyiv : Logos Publ., 2008, 104 p. (in Ukrainian).
18. *Betonna ta zalizobetonna konstruksii. Derzhavni budivelni normy Ukrainy* [Concrete and reinforced concrete structures. State building regulations of Ukraine]. DBN V.2.6-98:2009. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011, 71 p. (in Ukrainian).
19. *Lira – Soft – PK LIRA–9.6–R9–X86–x64–2012. Poiasnennia do LIRA 9.6. p. 3.1.4. Povzuchist i usadka, 03* [Lira – Soft – PC LIRA–9.6–R9–X86–x64–2012. Explanation to LIRA 9.6. clause 3.1.4. Creep and shrinkage, 03]. 2012, 6 p. (in Ukrainian).
20. Yatsenko E.A. and Slobodianiuk S.O. *Teoriia tryvaloi mitsnosti ta stiikosti sterzhnevyykh zalizobetonnnykh system z urakhuvanniam povzuchosti betonu* [The theory of long-term strength and stability of reinforced concrete systems taking into account the creep of concrete]. Dnipropetrovsk : PSACEA, “Porogy” Publ., 2002, 252 p. (in Ukrainian).
21. Slobodianiuk S.O. and Yatsenko E.A. *Vzaiemodiia poperedno napruzhenoi armatury z betonom i rozrakhunok odnosharovykh stinovykh panelei z urakhuvanniam povzuchosti poryzovanoho beton* [Interaction of prestressed reinforcement with concrete and calculation of single-layer wall panels taking into account the creep of cracked concrete]. Dnipropetrovsk : PSACEA, “Porogy” Publ., 2007, 280 p. (in Ukrainian).
22. Slobodianiuk S.O., Buratynskyi A.P., Klimpotyuk D.V., Tytyuk A.O. and Shapoval V.G. *Teoriia tryvaloi mitsnosti ta stiikosti sterzhnevyykh zalizobetonnnykh system z urakhuvanniam povzuchosti ta vibropovzuchosti betonu* [Theory of long-term strength and stability of reinforced concrete systems taking into account the creep and vibro-creep of concrete]. In general. ed. Ph. D., prof. S.O. Slobodianiuk's : monogr. in 3 pfrts, P. I, Dnipro : PSACEA, “Serednyak T.K.” Publ, 2014, 156 p. (in Ukrainian).
23. Slobodianiuk S.O., Buratynskyi A.P., Scherbachov A.D., Slobodianiuk O.S. and Shapoval A.V. *Teoriia tryvaloi mitsnosti ta stiikosti sterzhnevyykh zalizobetonnnykh system z urakhuvanniam povzuchosti ta vibropovzuchosti betonu* [The theory of long-term strength and stability of reinforced concrete systems taking into account the creep and vibro-creep of concrete]. In general. ed. Ph. D., prof. S.O. Slobodianiuk's : monogr. in 3 parts, P. II, Dnipro : PSACEA, “Serednyak T.K.” Publ., 2015, 150 p. (in Ukrainian).
24. Slobodianiuk S.O., Buratynskyi A.P., Scherbachov A.D., Slobodianiuk O.S. and Hamryk O.V. *Teoriia tryvaloi mitsnosti ta stiikosti sterzhnevyykh zalizobetonnnykh system z urakhuvanniam povzuchosti ta vibropovzuchosti betonu* [The theory of long-term strength and stability of reinforced concrete systems taking into account the creep and vibro-creep of concrete]. In general. ed. Ph. D., prof. S.O. Slobodianiuk's : monogr. in 3 parts, P. III, Dnipro : PSACEA, “Serednyak T.K.” Publ., 2016, 202 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.03.2024.