

А.Я. Барашиков, В.М. Колякова
Київський національний університет будівництва і архітектури,
кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій
03680, м. Київ, Воздухофлотський проспект, 31

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ БЕТОНУ ПРИ ТРИВАЛИХ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

© Барашиков А.Я., Колякова В.М., 2007

Проведено експериментально-теоретичні дослідження деформацій повзучості бетону при тривалих повторних навантаженнях. Запропоновано залежність для визначення відносного зниження модуля пружності бетону при високих навантаженнях.

In this article resulted experimentally theoretical researches of deformations creep flow of concrete under action of long and repeating loadings. And there is proposed dependence for definition of relative decrease the modulus of elasticity concrete offered at high loadings.

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток масового будівництва в останньому сторіччі з використанням залізобетону обумовив необхідність досліджень властивостей бетону та залізобетону при різних видах динамічних, статичних та температурних навантажень та дій, зокрема з урахуванням тривалої дії навантаження.

Аналіз останніх досліджень. За цим напрямом існують дослідження [1–5], детальний розгляд та порівняльний аналіз яких наведено нижче.

Загалом робота присвячена вивченню поведінки бетону при одновісному тривалому повторному навантаженні. Отримані результати повинні підвищити ефективність та надійність запроєктованих конструкцій будівель та споруд, що визначає актуальність роботи.

Мета роботи. Мета цієї роботи – вивчення напружено-деформованого стану бетону при тривалому повторному одновісному стиску.

Експериментальні дослідження. Експериментальні дослідження повзучості бетону при одновісному стиску проводили на зразках призм (15 зразків розміром 100x100x400 мм). Загальний вигляд установки для випробувань призм наведено на рис. 1.

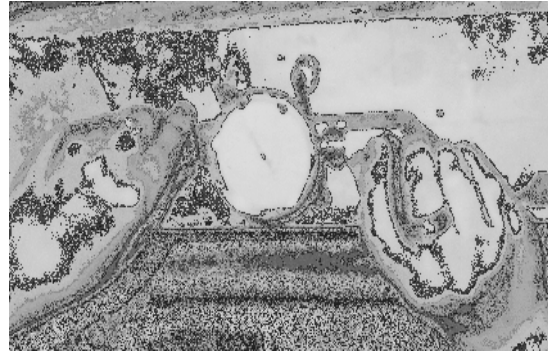
Повзучість бетону при одновісному стиску було досліджено не тільки при постійних, але і при тривалих повторних циклічних навантаженнях. Максимальні напруження в призмах було встановлено так, щоб визначити вплив інтенсивності напружень на повзучість, залишкові та зворотні деформації бетону.

У призмах серії ПР-0,3/0 максимальні напруження в циклі були обмежені величиною $\sigma_b \leq 0,3R_b$ з тим, щоб початкова інтенсивність напруження в бетоні не перевищувала значень, які відповідають межі умовно лінійної повзучості бетону. У призмах серії ПР-0,6/0, величина $\sigma_b \leq 0,5R_b$ прийнята для того, щоб досліджувати деформації на рівні, близькому до межі між лінійною і нелінійною повзучістю. Нарешті, деформації бетону на рівні істотно нелінійної повзучості було досліджено на призмах серії ПР-0,9/0.

Тривалість циклу періодичного навантаження було прийнято у 28 діб з однаковими періодами (напівциклами) навантаження та відпочинку (повного розвантаження). Передбачалось, що за час напівциклу навантаження в основному виявляються деформації повзучості, а на напівциклах відпочинку (повного розвантаження) оборотна частина деформацій повзучості відновлюється і стабілізується.



а



б

Рис. 1. Загальний вигляд установки для випробування призм:
а – установка; б – вимірювання деформацій повзучості бетону
з використанням компаратора

Характеристику циклу було прийнято близькою до режимів навантаження зразків раніше виконаних досліджень, проведених у КНУБА [1,4,5], що дає додаткові можливості для зіставлення та аналізу отриманих результатів, а також для підбору відповідних аналітичних співвідношень. У табл. 1 наведено зміни повних деформації бетону $\varepsilon(t)$ при повторних ступінчастих навантаженнях.

Таблиця 1

Повні деформації бетону при ступінчасто-повторних навантаженнях бетонних призм

№ циклу	Складові повних відносних деформацій $\varepsilon_b(t)10^5$			
	$\bar{\varepsilon}_{el}(\tau_{2k-1})$	$\bar{\varepsilon}(\tau_{2k-1}, \tau_{2k})$	$\bar{\varepsilon}_{el}(\tau_{2k-1})$	$\bar{\varepsilon}(\tau_{2k}, \tau_{2k+1})$
СЕРІЯ ПР-0,3/0				
1	16,83	8,66	14,88	7,15
2	16,24	5,31	15,62	6,28
3	16,61	3,40	16,05	3,25
4	16,03	3,05	16,02	2,20
5	16,05	2,80	15,65	2,00
6	16,01	2,05	15,06	1,80
7	16,01	1,85	15,05	1,70
СЕРІЯ ПР-0,6/0				
1	42,75	21,07	40,05	16,06
2	41,86	10,75	40,30	8,78
3	42,40	7,36	40,28	7,65
4	42,95	6,3	39,95	6,30
5	44,05	6,15	41,80	60,5
6	45,15	5,40	43,03	5,90
7	45,44	5,05	43,15	5,80
СЕРІЯ ПР-0,9/0				
1	62,26	51,12	58,35	37,87
2	62,37	21,25	58,05	16,32
3	62,73	15,07	62,51	15,59
4	64,85	10,72	58,16	12,06
5	66,70	8,05	62,03	7,33
6	67,05	6,85	62,16	6,45
7	68,17	6,05	64,72	6,25

Примітки: позначення $\bar{\varepsilon}_b$ стосується до напівциклів навантаження; $\bar{\varepsilon}$ – напівциклів розвантаження;
 $k = 1, 2, 3, \dots$ – номери напівциклів.

Для прикладу на рис. 2 наведено графіки зміни сумарних деформацій бетону зразків при впливі на них змінних циклічних навантажень протягом семи циклів. Для наочності та зіставлення результатів тут же нанесені криві деформацій постійно навантажених бетонних призм.

З даних, наведених в табл. 1 та на рис. 2, видно, що пружні деформації бетону протягом часу випробувань повторним навантаженням змінюються залежно від рівня діючих напружень. За низьких напружень модуль пружності збільшується приблизно на 6%, а при середніх і високих – зменшується приблизно від 6% до 9%. У зв'язку з цим відносні пружні деформації в першому випадку до кінця спостережень збільшуються, а в інших – зменшуються (див. табл. 1).

Отримане збільшення та зниження величини $E_b(\tau)$ незначні порівняно з отриманими іншими авторами (А.Я. Барашиковим; Й.П. Новотарським; П.П. Крамарчуком; Л.А. Мурашко; М.М. Калишенко; М.Д. Сиротою; Н.Н. Шоевим та інш.). Можна зробити висновок, що вочевидь тут позначився досить "старий" вік бетону (100...130 діб) до моменту першого прикладання стискного навантаження.

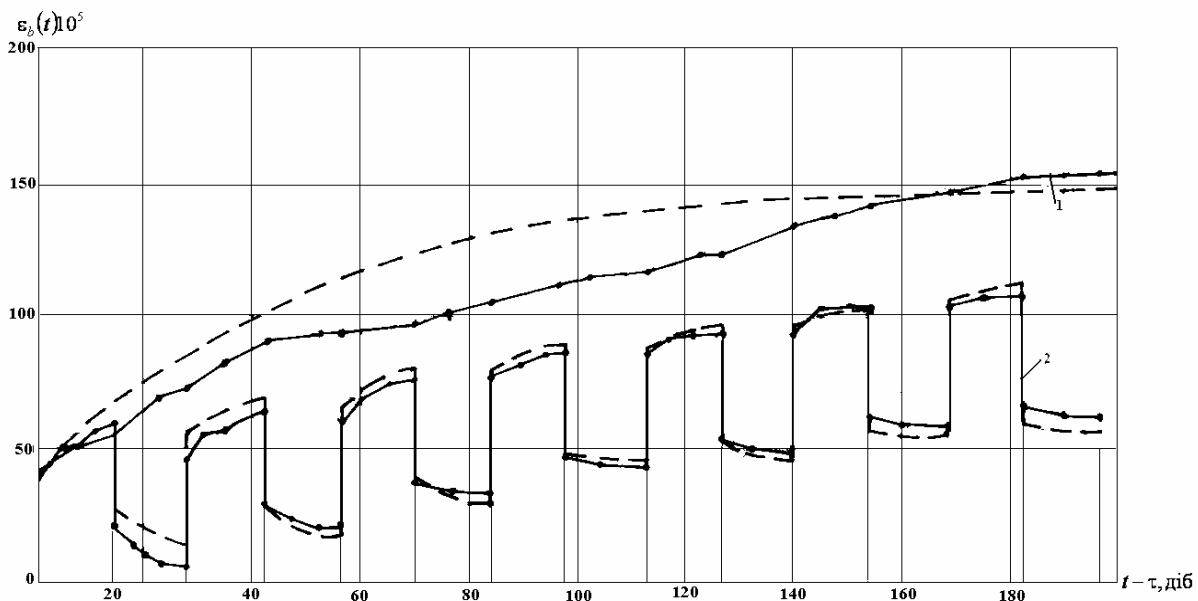


Рис. 2. Результати експериментальних досліджень бетонних призм серії ПР-0,6 (1) та ПР-0,6/0 (2) та зіставлення з теоретичними даними $\sigma_0 = 12$ МПа

Після обробки результатів власних досліджень, а також результатів досліджень інших науковців автори цієї роботи запропонували залежність для визначення відносного зниження модуля пружності бетону при високих навантаженнях

$$E_b(n) = E_0 L(n), \quad (1)$$

де E_0 – початковий модуль пружності; $L(n)$ – функція впливу повторних навантажень.

$$L(n) = 1 \pm a(1 - e^{-b(n-1)}), \quad (2)$$

де a, b – дослідні константи.

Знак “+” використовують при напруженнях $\sigma_b \leq 0.3R_b$, знак “-” – при $\sigma_b > 0.3R_b$

Для досліджень, які наведені у [3] при $\sigma_b = 0,28R_b$ для $a = 0,06$; $b = 0,305$; $n = 7$, величина $L(n)$ становить 1,051. Для високого рівня напружень $\sigma_b = 0,85R_b$ при $a = 0,116$; $b = 0,235$; $n = 7$ величина $L(n)$ за формулою (2) становить 0,913.

Аналізуючи значення деформацій повзучості (рис.3) на різних етапах прикладання стискних напружень, можна зробити висновок про те, що зміна цих деформацій у часі характеризується відносно плавним наростанням і подальшим згасанням їх у часі, що притаманно “старому” бетону.

Для призм із низьким рівнем напружень $\sigma_b = 0,28R_b$ стабілізація значень деформацій повзучості спостерігалася приблизно після 60...80 доби витримки зразків під навантаженням. Деформації призм із середнім рівнем навантаження $\sigma_b = 0,58R_b$ стабілізувалися, починаючи з 150 доби після навантаження, а при $\sigma_b = 0,85R_b$ стабілізації деформацій практично не відбулося і після 200 доби спостереження.

Зіставляючи питомі деформації повзучості і пружної післядії (оборотної повзучості), наведені на рис. 3, можна зазначити, що питомі деформації повзучості при повторних навантаженнях і питомі деформації пружної післядії при витримках після розвантаження залежать від рівня напружень. При цьому зазначені деформації для призм із більш високими напруженнями більші, ніж для призм, які перебували під дією менших напружень. Можна зробити висновок, що і при повторних навантаженнях з високим рівнем напружень залежність між напруженнями та деформаціями прямої і оборотної повзучості (пружної післядії) є нелінійною.

Дані табл. 1 показують, що після першого розвантаження для призм серії ПР-0,3/0 питомі деформації післядії до кінця напівциклу розвантаження становлять 82,5% від питомих деформацій, які зросли за цей самий термін на напівциклі навантаження. Для призм серії ПР-0,6/0 питомі деформації післядії становлять 76,2%, а для призм ПР-0,9/0 – 69%. Після сьомого циклу навантаження питомі деформації становлять ПР-0,3/0 – 92%; ПР-0,6/0 – 96%; ПР-0,9/0 – 99%.

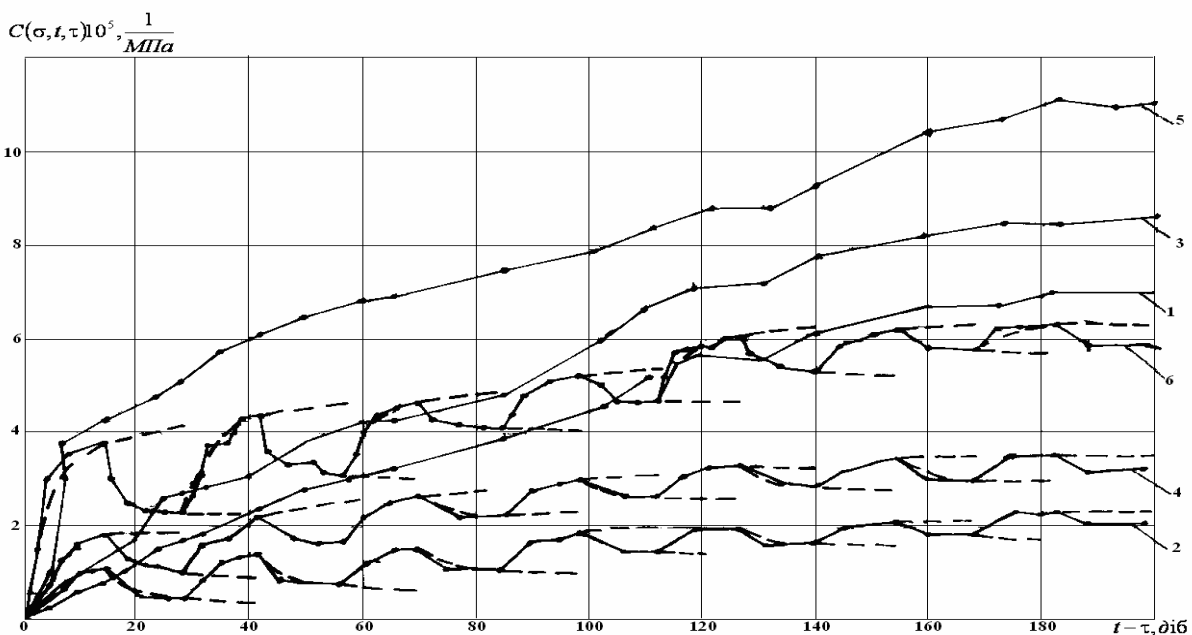


Рис.3. Питомі деформації повзучості при постійних та повторних навантаженнях:

1 – призми серії ПР-0,3; 2 – ПР-0,3/0; 3 – ПР-0,6;
4 – ПР-0,6/0; 5 – ПР-0,9; 6 – ПР-0,9/0

Отже, чим вище напруження в призмах, тим меншу частку становлять деформації пружної післядії після першого розвантаження від деформацій повзучості після першого навантаження.

Подальший аналіз експериментальних даних дав змогу одержати важливі відомості про накопичення залишкових деформацій бетону, які є основною характеристикою деструктивних процесів у бетоні внаслідок явищ втоми і малоциклової повзучості.

Накопичення деформацій для зразків, що знаходяться під впливом періодичного навантаження, наведено на рис.4.

Як видно з рис. 4, зі збільшенням рівня навантаження частка оборотних деформацій першого роду хоча і незначно, але зростає: для рівня $0,28R_b - \varepsilon_{res}^I$ становить 36,0%, для $0,58R_b - 37,1\%$, для $0,85R_b - 43,7\%$.

Основну частину деформацій повзучості та оборотної повзучості (пружної післядії) у межах 60...70% отримано за перші 2–3 цикли впливів. Аналіз складових деформацій показав, що пружні складові деформації при навантаженні і розвантаженні вирівнюються, але повної їхньої рівності не відбувається.

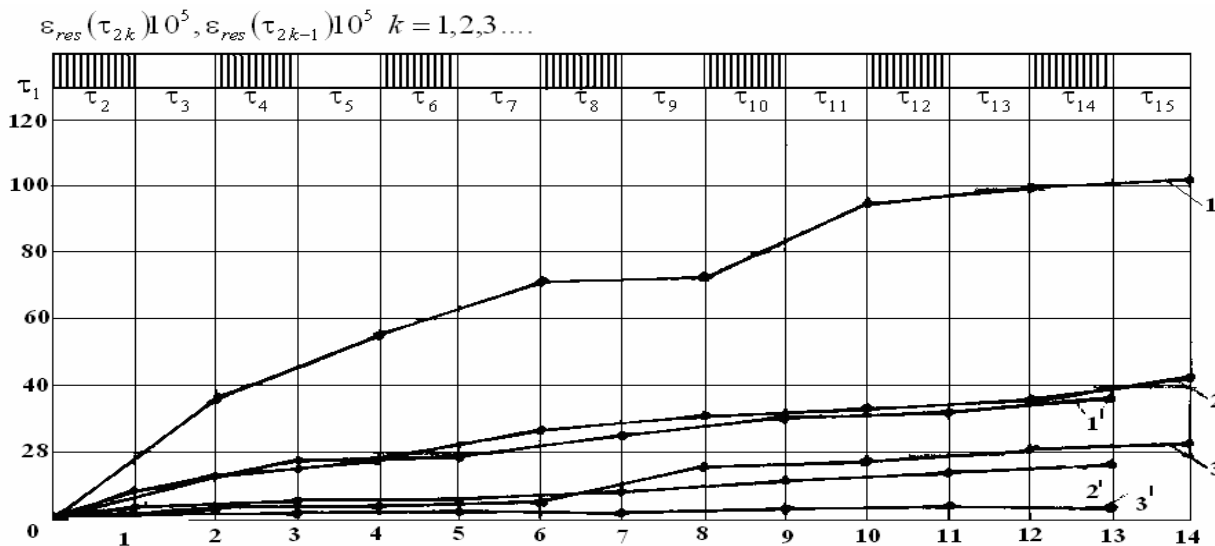


Рис. 4. Накопичення оборотних деформацій в періодично навантажених зразках:
1, 2, 3 – повні оборотні деформації відповідно зразків ПР–0,3/0; ПР–0,6/0; ПР–0,9/0.
1', 2', 3' – оборотні деформації першого роду

З табл. 1 видно, що деформації повзучості, як і деформації пружної післядії досить швидко зменшуються з визначеною закономірністю. Як показує аналіз, загасання зазначених деформацій можна описати гіперболічними функціями, що визначають зменшення деформацій при циклічних навантаженнях відносно першого напівциклу навантаження або розвантаження. У нашому випадку функцію загасання можна визначити формулою для кожного напівциклу k навантаження або розвантаження

$$f_k = \frac{\varepsilon_{crp}(n)}{\varepsilon_{crp}(n) + \varepsilon_{crp}(n=1)} = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_{crp}(n=1)}{\varepsilon_{crp}(n)}} = \frac{1}{1 + \varphi_k(\eta)}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{crp}(n)$ – деформації повзучості або пружної післядії наприкінці напівперіоду (напівциклу) ($n = k = 3, 5, 7, \dots$) навантаження чи розвантаження ($n = k = 4, 6, 8, \dots$);
 $\varepsilon(n=1)$ – деформації повзучості або пружної післядії наприкінці напівциклу навантаження ($n = k = 1$) або розвантаження ($n = k = 2$).

Отже, для визначення функцій загасання наприкінці кожного напівциклу (напівперіоду) навантаження отримуємо

$$\bar{f}_k = \frac{1}{1 + \bar{\varphi}_k(\eta)}, k = 3, 5, 7, \dots, \bar{\varphi}_{k=1}(\eta) = 0; \bar{f}_k = 1; \quad (4)$$

для напівциклів розвантаження (відпочинку) маємо

$$\bar{f}_k = \frac{1}{1 + \bar{\varphi}_k(\eta)}, k = 4, 6, 8, \dots, \bar{\varphi}_{k=2}(\eta) = 0; \bar{f}_k = 1 \quad (5)$$

Детальний аналіз показує, що відносне збільшення деформацій наприкінці кожного циклу порівняно з деформаціями першого циклу може бути описане лінійною функцією від розглядуваного напівциклу навантаження (непарного) або відпочинку та істотно залежить від інтенсивності максимального напруження в циклі.

У формулах (4) і (5) значення $\bar{\varphi}_k(\eta)$ і $\bar{\varphi}_k(\eta)$ визначені за моментом зняття або подальшого прикладання навантаження (див. рис. 3)

$$\bar{\varphi}_k(\eta) = \frac{\varepsilon_{crp}(\tau_2)}{\varepsilon_{crp}(\tau_{2k})}; k = 2, 3, 4, \dots \quad (6)$$

$$\bar{\varphi}_k(\eta) = \frac{\varepsilon_{crp}(\tau_3)}{\varepsilon_{crp}(\tau_{2k+1})}; k = 2, 3, 4, \dots \quad (7)$$

або за номером напівциклу навантаження або розвантаження

$$\bar{\varphi}_k(\eta) = \frac{\varepsilon_{crp}(k=1)}{\varepsilon_{crp}(k)}; k = 3, 5, 7, \dots \quad (8)$$

$$\bar{\varphi}_k(\eta) = \frac{\varepsilon_{crp}(k=2)}{\varepsilon_{crp}(k)}; k = 2, 4, 6, \dots \quad (9)$$

Рис. 5 та 6 детально ілюструють спосіб побудови функції загасання для напівциклів навантаження і розвантаження (відпочинку). Функцію згасання для циклічних навантажень у трохи іншому вигляді $f_k = n^{-\beta}$ свого часу було запропоновано співавтором цієї роботи [1].

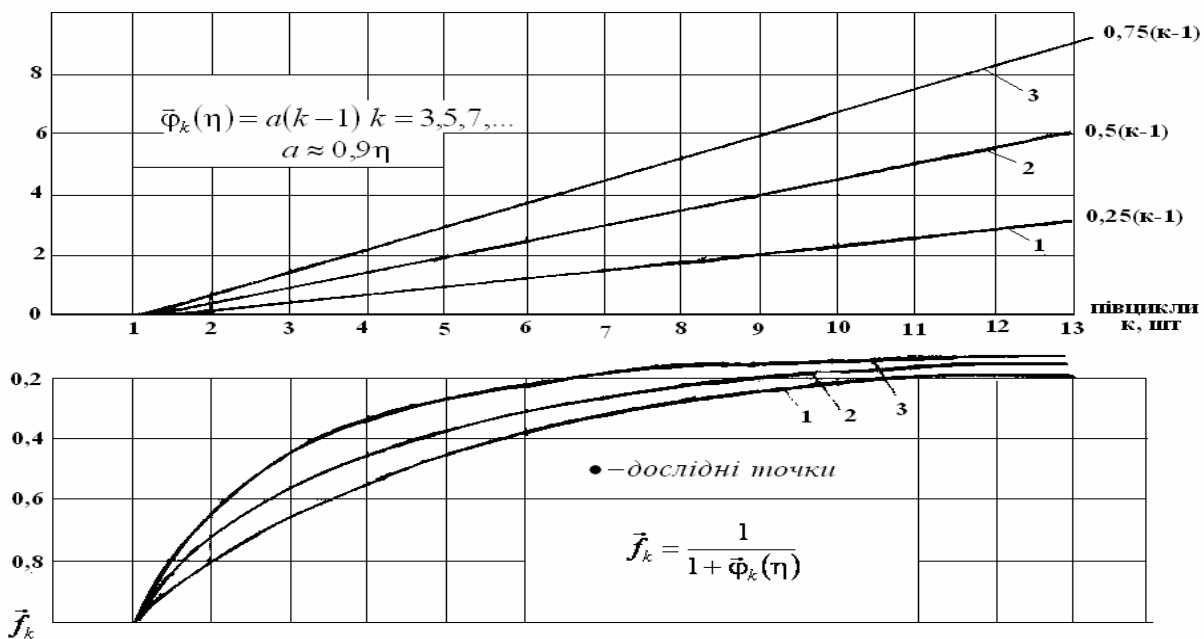


Рис. 5. До побудови функції загасання для півциклів навантаження:
1, 2, 3 – відповідно для зразків серій ПР–0,3/0; ПР–0,6/0; ПР–0,9/0

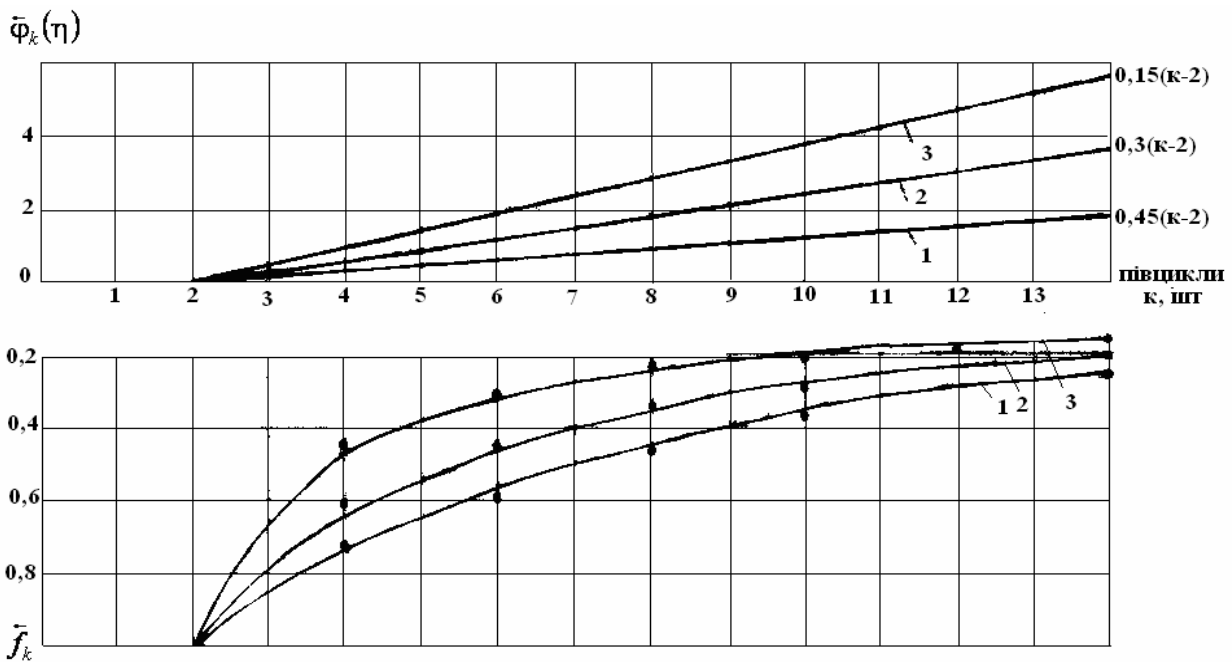


Рис. 6. До побудови функції згасання для півциклів розвантаження
1, 2, 3 – відповідно для зразків серій ПР-0,3/0; ПР-0,6/0; ПР-0,9/0

Маючи функцію загасання, можна перейти до заключного етапу розрахунку: визначення повних деформацій бетону при тривалих повторних навантаженнях. Для жорсткого режиму навантаження деформації бетонних зразків напівциклі навантаження напруженням $\bar{\sigma}_b$ можна навести у вигляді

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_b(t, \tau_{2k-1}, \tau_{2k}) &= \bar{\varepsilon}_{cl}(\tau_{2k-1}) + \bar{\varepsilon}_{crp}(t, \tau_{2k-1}, \tau_{2k}) = \\ &= \frac{\bar{\sigma}_b(\tau_{2k-1})}{\bar{E}_b(\tau_{2k-1})} \left[1 + \bar{f}(\sigma) \bar{f}_{2k} \bar{\varphi}(\infty, \tau_{2k-1}) (1 - e^{-\eta}) \mu(\tau_{2k-1}, \tau_{2k}) \right] \quad k = 1, 2, 3 \dots; \end{aligned} \quad (10)$$

аналогічно на півциклі розвантаження (відпочинку) напруженням $\bar{\sigma}_b$ деформації записують у вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_b(t, \tau_{2k}, \tau_{2k+1}) &= \bar{\varepsilon}_{cl}(\tau_{2k}) + \bar{\varepsilon}_{crp}(t, \tau_{2k}, \tau_{2k+1}) = \frac{\bar{\sigma}_b(\tau_{2k})}{\bar{E}_b(\tau_{2k-1})} \times \\ &\times \left[1 + \bar{f}(\sigma) \bar{f}_{2k+1} \bar{\varphi}(\infty, \tau_{2k}) (1 - e^{-\eta}) \mu(\tau_{2k}, \tau_{2k+1}) \right] \quad k = 1, 2, 3; \end{aligned} \quad (11)$$

Теоретичні значення повних деформацій бетону в процесі повторного прикладання навантажень різного рівня, які розраховані за формулами (10) та (11), наведені на рис. 1 (пунктирні лінії). З цих рисунків видно, що запропоновані залежності досить точно описують деформування бетону при малоциклових навантаженнях у широкому діапазоні інтенсивності навантаження: від низьких ($\sigma_b = 0,28R_b$) до високих рівнів ($\sigma_b = 0,85R_b$) напружень.

Порівняння результатів експериментальних досліджень з результатами досліджень, проведених за аналогічною методикою [2-5], підтверджує достовірність отриманих результатів.

1. Барашиков А.Я. Расчет железобетонных конструкций на действие длительных переменных нагрузок. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – К.: Будівельник, 1977. – 156с. 2. Застава М.М. Расчет железобетонных элементов при случайной переменной нагрузке с учетом изменчивости физико-механических характеристик бетона и арматуры: Дис. ...докт. техн. наук. – Одесса, 1991. – 368с. 3. Колякова В.М. Напряжено-деформованный стан бетона при короткочасному та тривалому повторному одновісному та двовісному стиску: Дис. ...канд. техн. наук. – К., 2002.-199с. 4. Крамарчук П.П. Исследование деформаций бетона и железобетонных элементов под действием длительных повторных нагрузок: Дис. ...канд. техн. наук. – К., 1971. –185с. 5. Новотарский И.П. Исследование изгибаемых железобетонных элементов при постоянных и периодических нагрузках высокого уровня: Дис. ...канд. техн. наук. – К., 1971. – 185с.