

Львів. – 2004. – С. 9–16. 3. Котів М.В., Більський М.Р. Стійкість позацентрово стиснутого стержня, підсиленого збільшенням перерізу елементом із сталі підвищеної міцності // Теорія і практика будівництва. Вісник НУ “Львівська політехніка” № 520. – Львів. – 2004. – С. 126–128.

УДК 624.21

П.М. Коваль*, Р.І. Полюга**, П.М. Сташук*, А.Є. Фаль*

*Державний дорожній науково-дослідний інститут ім. Шульгіна, м. Київ,

**Національний університет “Львівська політехніка”,

кафедра будівельних конструкцій та мостів

КІНЕТИКА ВИПРОМІНЮВАННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ В БЕТОНІ ПРИ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

© Коваль П.М.*, Полюга Р.І.**, Сташук П.М.*, Фаль А.Є.*, 2005

Наведено дані про експериментальні дослідження роботи бетонних зразків на стиск в умовах малоциклових навантажень з використанням методу акустичної емісії, проведення аналізу кінетики випромінювання сигналів акустичної емісії. Описана програма, методика та результати випробувань дослідних зразків бетонних призм різної міцності та складу бетону.

In the article the information about experimental researching of behaviour of concrete specimens under stress lowcycling loads using acoustic emission method and analysis of acoustic emission kinetics is given. The program, method and results of researching of concrete specimens with various strength and contents are described.

Постановка проблеми. Всі навантаження та впливи в нормах проектування [1] поділяють на постійні і тимчасові. Існуючий поділ за тривалістю дії не відображає характер і значення цих навантажень. У реальних умовах усі тимчасові навантаження періодично повторюються, тобто мають змінний характер як за тривалістю, так і за своїм значенням [2]. Їх можна подати монотонно-змінними та циклічними. Останні своєю чергою можна розділити на малоциклові, періодичність повторення яких є декілька десятків, сотень, а деколи і тисяч циклів, і багатоциклові з періодичністю повторення більше ніж два мільйони циклів.

Аналіз останніх досліджень. Відомо, що границя малоциклової втомленості або малоциклова пристосованість стиснутого бетону $\sigma_{b,cyc}^{cr} = 0.85R_b$ [3,4]. При рівнях відносних напружень $\eta_b^{top} = \sigma_b / R > 0.85$ існує розуцільнення бетону і малоциклова втомленість (коли ширина петлі гістерезису безперервно збільшується від циклу до циклу аж до руйнування). При рівнях напружень $\eta_b^{top} = \sigma_b / R < 0.85$ настає малоциклова пристосованість бетону, відбувається ущільнення бетону із подальшою стабілізацією деформацій.

Руйнування в бетоні під час дії навантажень не відбувається миттєво – від моменту утворення дефектів і до початку її критичного зростання минає певний час. Своєчасне виявлення розвитку цих дефектів є важливим завданням, і, разом з тим, складною проблемою [5]. На сьогодні методом, що дозволяє оцінити активність дефекту і класифікувати його не за розміром, а за рівнем небезпеки для роботи конструкції, є метод акустичної емісії. Акустична емісія (АЕ) – це явище, що полягає у випромінюванні пружних хвиль у твердих тілах під час їх деформації [6,7,8,9].

Мета роботи. В НУ “Львівська політехніка” були проведені дослідження роботи бетонних та залізобетонних зразків при малоциклових навантаженнях із використанням методу АЕ.

Об'єктом дослідження були бетонні призми 100x100x400мм що випробовували у м'якому режимі (при постійному заданному напруженню, $\sigma = \text{const}$) статичними малоцикловими навантаженнями при двох рівнях відносних напружень: $\eta_b^{\text{top}} = \sigma_b / R = 0.95$ і $\eta_b^{\text{low}} = \sigma_b / R = 0$, і відповідно $\eta_b^{\text{top}} = \sigma_b / R = 0.84$ і $\eta_b^{\text{low}} = \sigma_b / R = 0$. Базою випробувань N було прийнято 40 циклів завантажень-розвантажень. Зразки, що витримали базу випробування, доводили до руйнування одноразовим прикладанням сили для визначення руйнівного навантаження.

Зразки виготовляли із п'яти серій важкого бетону, які відрізнялись між собою складом та міцністю. Склад бетонної суміші наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Склад бетонної суміші

Серія	Склад бетонної суміші кг/м ³			В/Ц	Марка цементу
	Ц	П	Щ		
I	220	814	1226	0,4	500
II	388	512	1398	0,4	400
III	466	464	1328	0,4	400
IV	500	720	1038	0,4	500
V	600	500	1170	0,3	500

Міцнісні та деформативні характеристики бетонів визначали згідно з чинними методиками ГОСТ 10180-78 та ГОСТ 24452-80 випробуванням бетонних зразків, що входили в програму експериментальних досліджень (табл. 2).

Таблиця 2

Фізико-механічні характеристики досліджуваних бетонів

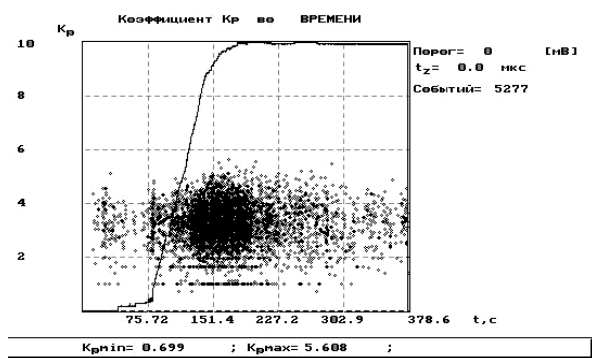
Серія	Міцність бетону на тиск, МПа	Міцність бетону на розтяг, МПа	Початковий модуль пружності (Еб 10 ⁻⁴ МПа)	Початковий коеф. поперечної деформації μ
I	33	1,9	3,0	0,21
II	35	2,0	3,2	0,20
III	49	2,2	3,9	0,18
IV	55	2,5	4,1	0,16
V	67	2,7	4,2	0,14

Експериментальні дослідження. Випробування зразків проводили на пресі типу ПГ-250. Рівень навантаження контролювали за шкалою преса і фіксуючим електронним пристроєм, зв'язаним з ЕОМ. Сигнали АЕ, що виникали в бетоні, реєстрували за допомогою програмно-технічного комплексу "АКЕМ". Давач (п'єзоперетворювач) через шар акусто-прозорого мастила кріпився за допомогою гумової стрічки до бокової грані призми. Сигнали з давача підсилювались і надходили на ЕОМ для обробки і подальшого аналізу з використанням пакета програм "АКЕМ". Програмно-технічний комплекс побудований на базі персонального комп'ютера з використанням технології "PCLabCard". Підсилення сигналу АЕ здійснювали попереднім підсилювачем з чутливістю на вході 10 мкВ, частотним діапазоном 100-2000 кГц, коефіцієнтом підсилення 90 дБ і з динамічним діапазоном 40–65 дБ.

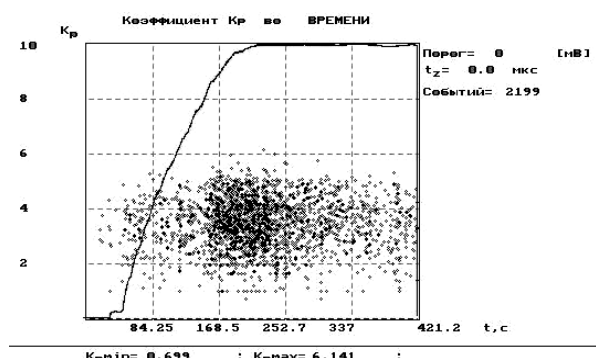
Внаслідок досліджень встановлено, що за допомогою акустичної емісії є можливість діагностувати процеси малоциклової втоми або малоциклової пристосованості в роботі стиснутого бетону [13]. Проілюструємо отримані дані для двох зразків: призма серії V, яка була випробувана при відносному рівні напружень $\eta_b^{\text{top}} = \sigma_b / R = 0.84$ і витримала базу випробувань N=40 циклів,

та призма серії II, яка була випробувана при $\eta_b^{\text{top}} = \sigma_b / R = 0.96$ і зруйнувалась на 13-му циклі внаслідок малоциклової втоми.

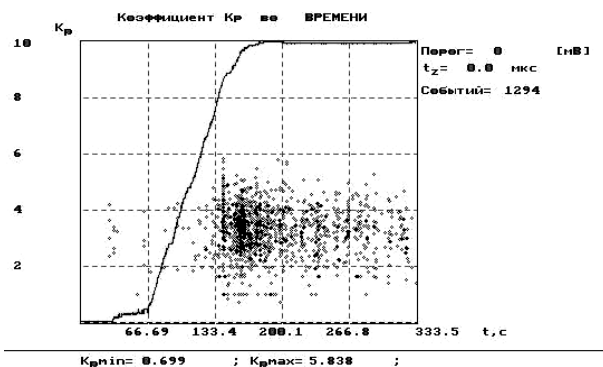
У нормативному документі [14] для виділення сигналів АЕ від тріщин використовують критеріальну оцінку K_p [7]. На рис. 1 зображено значення K_p сигналів АЕ. Лінією позначено криву навантаження. Перші цикли характеризуються значною кількістю сигналів та величиною енергії (рис.1 а, г), ділянку стабілізації можна визначити за накопиченням сигналів та енергії, які коливаються в межах певного рівня (рис. 1, б, д). На передостанньому циклі картина якісно і кількісно відрізняється: якщо при ущільненні АЕ мало чим відрізняється від етапу стабілізації (рис.2 е), то при розущільненні параметри АЕ значно зростають (рис. 1, в).



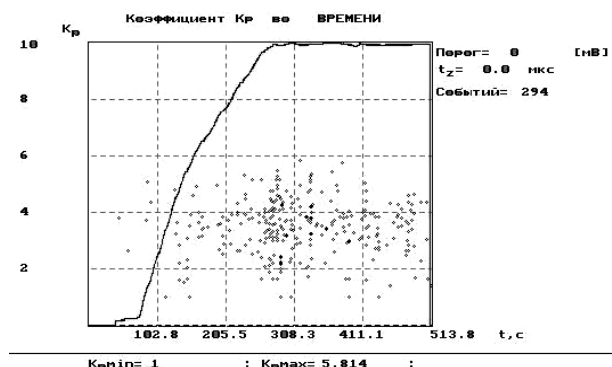
а)2-й цикл, серія II



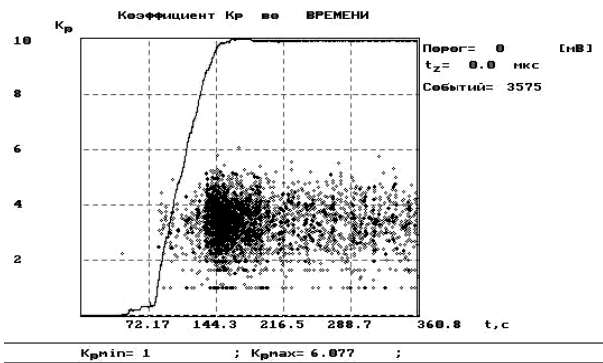
г)2-й цикл, серія V



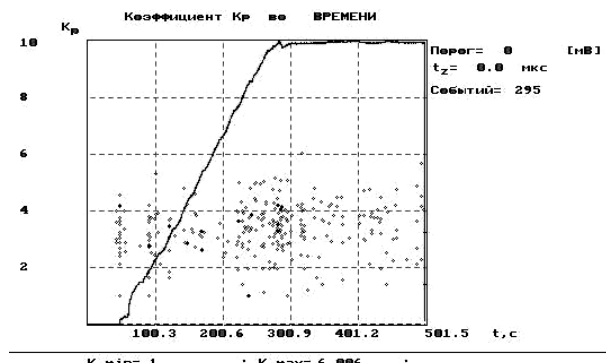
б)9-й цикл, серія II



д)20-й цикл, серія V



в)12-й цикл, серія II



е)39-й цикл, серія V

Рис. 1. Коефіцієнт K_p при розущільненні (а, б, в) та відповідно при ущільненні (г, д, е)

Як видно з графіків, найбільша кількість сигналів з'являється під час досягнення максимального рівня навантаження на циклі. Сигнали фіксуються також як під час завантаження, так і витримки під навантаженням. Останнє підтверджує дослідження науковців [15], що ефект Кайзера, який полягає у появі сигналів АЕ під час повторних навантажень тільки при досягненні попереднього максимального рівня, полягає не в зникненні сигналів АЕ, а в різкому зниженні рівня АЕ при подальшому навантаженні.

Накопичення сигналів АЕ для серії II на ділянці стабілізації коливається в межах 6,2–12,6 разів менше, ніж при першому циклі, для серії V – відповідно 5,8–40 разів. З 11-го завантаження для серії II спостерігається зростання показів аж до малоциклового руйнування.

Слід зазначити, що у разі і ущільнення, і розущільнення коефіцієнт Кр залишається високим на всіх циклах – 5,6 – 6,2, і певної закономірності його розподілу на даному етапі досліджень не виявлено. Тому стає очевидним, що висновок про напружено-деформаційний стан в зразку слід проводити з використанням кінетичного аналізу сигналів АЕ.

Релаксація напружень за рахунок перебудови внутрішньої структури матеріалу при постійному значенні навантаження відображується на кінетиці випромінювання АЕ [7].

Оцінка небезпеки процесів тріщиноутворення [10,7,11], що відбуваються в структурі матеріалу конструкції під час навантаження, здійснюється із використанням методики, що базується на підходах термодинамічної природи руйнування твердих тіл [12]. Для порівняння та узагальнення результатів, незалежних від розмірності аналізованих параметрів, використовують їхню формалізацію із нормуванням шкал до одиничної за функціями:

$$\bar{N}_H = f(\bar{P}); \quad (1)$$

$$\bar{E}_H = f(\bar{P}). \quad (2)$$

де $\bar{N}_H = N_i / N_{i\max}$; $\bar{E}_H = E_i / E_{i\max}$; $\bar{P} = P_i / P_{i\max}$; N_i , E_i – значення накопичення кількості сигналів та енергії АЕ під час витримки під навантаженням на ступенях у обраному часовому перерізі; P_i – значення навантаження на ступені; $P_{i\max}$ – максимальне значення навантаження. $N_{i\max}$, $E_{i\max}$ – максимальні значення накопичення кількості сигналів та енергії АЕ під час витримки під навантаженням на ступенях у обраному часовому перерізі. Проведення аналізу із апроксимацією експериментальних даних відповідно до попередньо описаного виконують за формулами

$$\bar{N}_H = a_1 \bar{P}^{b_1} \quad (3)$$

$$\bar{E}_H = a_2 \bar{P}^{b_2}, \quad (4)$$

де a_1, a_2 , b_1 , b_2 – константи; $\bar{P} = P_i / P_{i\max}$; P_i – значення навантаження на ступені; $P_{i\max}$ – максимальне значення навантаження.

Висновок про небезпеку процесів, що відбуваються в структурі матеріалів при навантаженні об'єкта, здійснюється за абсолютним значенням показника степеня b_1 та b_2 . Шляхом проведених експериментальних досліджень встановлено, що для широкого кола матеріалів, значення $b_1 > 3$, $b_2 > 3$ свідчить про небезпечний розвиток дефектів.

Оскільки в нашому випадку йдеться про циклове прикладання навантаження, використаємо підхід з роботи [7] та проаналізуємо \bar{N}_H та \bar{E}_H залежно від кількості циклів прикладеного навантаження. Отже,

$$\bar{N}_H = f(\bar{n}) \quad (5)$$

$$\bar{E}_H = f(\bar{n}), \quad (6)$$

де $\bar{N}_H = N_i / N_{i\max}$; $\bar{E}_H = E_i / E_{i\max}$; $\bar{n} = n_i / n_{i\max}$; N_i , E_i – значення накопичення кількості сигналів та енергії АЕ у циклі під час витримки під навантаженням у обраному часовому перерізі; n_i – номер циклу; $n_{i\max}$ – максимальна кількість циклів. $N_{i\max}$, $E_{i\max}$ – максимальні значення накопичення кількості сигналів та енергії АЕ у циклі під час витримки під навантаженням у

обраному часовому перерізі. Проведення аналізу із апроксимацією експериментальних даних відповідно до попередньо описаного виконуємо за формулами

$$\bar{N}_H = a_1 n^{-b_1^n} \quad (7)$$

$$\bar{E}_H = a_2 n^{-b_2^n}, \quad (8)$$

де a_1^n , a_2^n , b_1^n , b_2^n – константи; $\bar{P} = P_i / P_{i_{\max}}$; n_i – номер i -го циклу; n_{\max} – максимальна к-ть циклів.

На рис. 2 показано результати аналізу кінетики накопичення енергії (а, в) та сигналів АЕ (б, г). Часовий переріз аналізу взятий на 10-й секунді витримки кожного циклу. Не беручи до уваги перших кілька завантажень-розвантажень, для обох зразків можна спостерігати лінію стабілізації – для розуцільненої призми – з 3-го циклу по 10-й (рис. 2 а, б), і для малоциклово-приспособованої призми – з 6-го по 39-й (рис. 2 в, г). У другому випадку на графіку можна спостерігати певні екстремуми, але загалом спостерігається стабілізація значень. Важливим є те, що показники степеня b_1^n , b_2^n підтверджують висновки про ущільнення чи розуцільнення. Для призми серії V вони становлять відповідно 0,09 та 0,06, тобто немає небезпеки руйнування зразка, для призми серії II – відповідно 6,13 та 5,15, що свідчить про небезпечний розвиток дефектів.

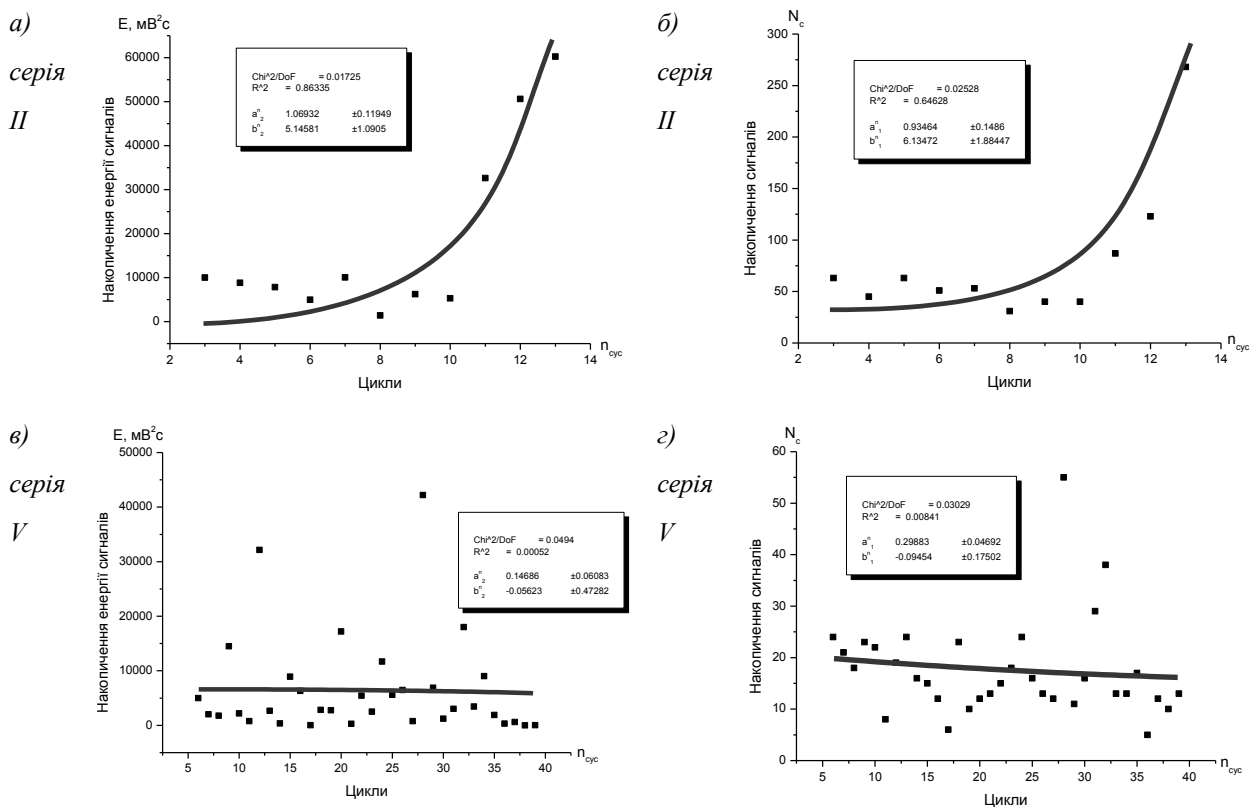


Рис.2. Аналіз кінетики накопичення сигналів та енергії АЕ при розуцільненні (а, б) та відповідно при ущільненні бетону призм (в, г)

Вище було зазначено про спостереження певних екстремумів, які можуть під час аналізу кінетики випромінювання нового циклу видати значення $b_1^n, b_2^n > 3$ на фоні загальної стабілізації (рис. 3, а). Та при аналізі наступного циклу значення показників степені повертаються до рівня < 3 (рис. 3, б). У разі ж розуцільнення бетонного зразка $b_1^n, b_2^n > 3$ фіксуються до руйнування у кількох підряд останніх циклах (рис. 3, в, г).

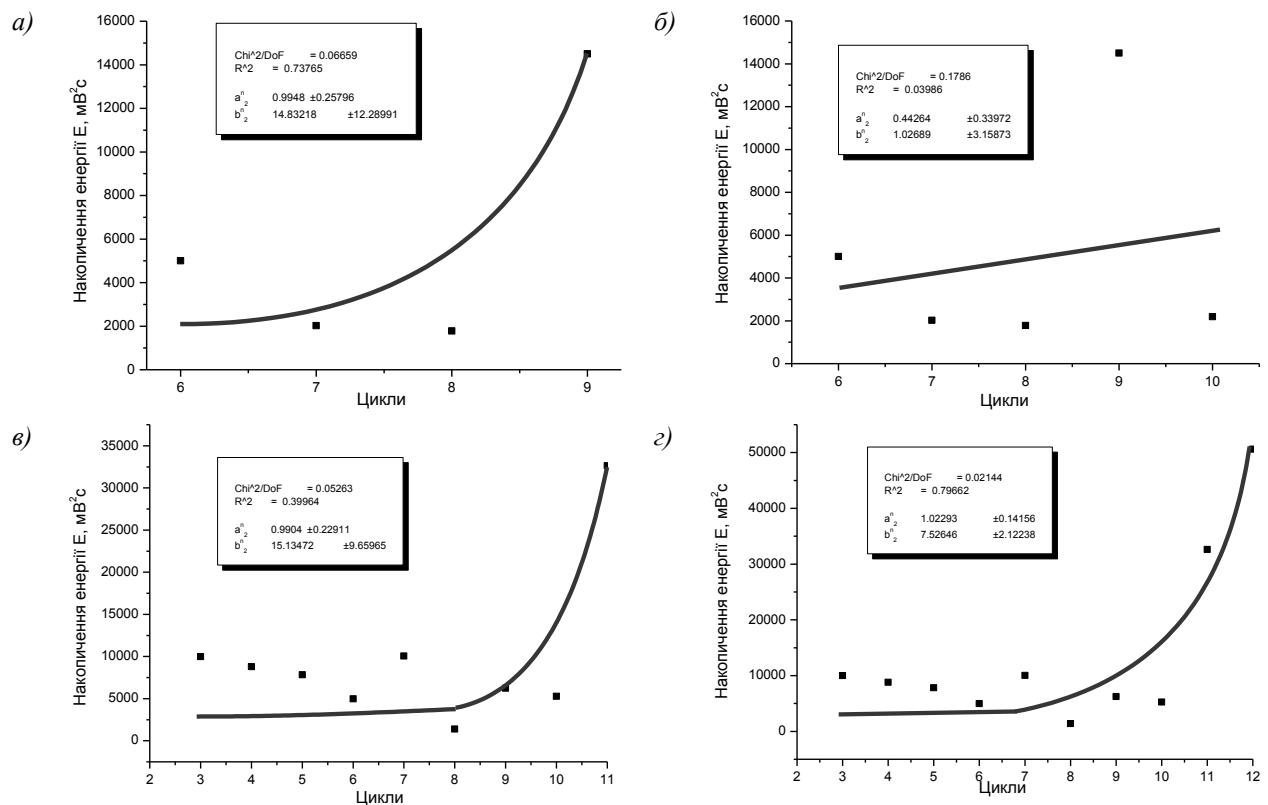


Рис. 3. Аналіз кінетики накопичення енергії АЕ призм на проміжних циклах:

значення $b_1^n = 14,83$ на 9-му (а) та $b_1^n = 1,02$ на 10-му (б) циклі

при ущільненні бетону призми, значення $b_1^n = 15,13$ на 11-му (в)

та $b_1^n = 7,53$ (г) на 12-му циклі при розуцільненні бетону призми

Висновки. Проведені дослідження виявили, що метод АЕ дає змогу отримати значний обсяг інформації про процеси тріщиноутворення, які відбуваються при малоциклових навантаженнях, що підтверджує перспективність використання методу АЕ для технічної діагностики бетонних конструкцій. За допомогою запропонованого підходу можна не лише фіксувати, а й передбачати розвиток цих процесів.

1. СнП 2.01.07-85. *Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования.* – М.: Стройиздат, 1986.–36 с. 2. Бабич Є.М., Крись Ю.О. *Бетонні і залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень: Монографія.* – Рівне: Вид-во РДТУ, 1999. – 119с. 3. Бабич Е.М., Погореляк А.П. *Прочность бетона после воздействия малоциклового сжимающей нагрузки // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура.* – 1976. – № 4. – С. 33–36. 4. Яковлев С.К., Кожухов А.С., Тотосов В.Н. *Работа сжатого бетона при повторно-статическом нагружении / Изд. вузов. Сер. Строительство и архитектура.*-1990. – № 8. – С. 124–127. 5. Коваль П.М., Сташук П.М. *Діагностика стану бетонних та залізобетонних конструкцій за характеристиками тріщиностійкості. / Наук. пр. семінару. “Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення.”* Київ, УТУ-2000. – с. 106–109. 6. ГОСТ 27655-88 *Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.* 7. Филоненко С.Ф. *Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика.* – К:Изд-во КМУГА, 1999. – 305 с. 8. ASTM E 1316-94 *“Standard Definitions of Terms Relating to Acoustic Emission”.* 9. ДСТУ 2374-94 *Розрахунки на міцність та випробування технічних виробів. Акустична емісія. Терміни та визначення.* 10. Филоненко С.Ф. *Анализ кинетики развития процессов разрушения методом акустической эмиссии // Международная научная конференция “Синергетика 2000. Самоорганизующиеся процессы в системах и технологиях”:* Материалы конференции, – г. Комсомольск-на-Амуре, 2000. – С. 94–97.