

П.М. Коваль, Р.І. Полога, П.М. Сташук  
Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра будівельних конструкцій і мостів

## АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ БЕТОНУ ПРИ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

© Коваль П.М., Полога Р.І., Сташук П.М., 2004

*Подано результати дослідження роботи бетону при малоциклових навантаженнях з використанням методу акустичної емісії.*

**Постановка проблеми.** Багато уваги при вдосконаленні методів розрахунку будівельних конструкцій приділяється вивченню фізико-механічних властивостей матеріалів і, відповідно, своєчасному коригуванню нормованих значень їхніх міцнісних і деформативних характеристик, встановленню дійсного напружено-деформованого стану перерізів елементів при реальних умовах експлуатації. Не менш важливим є також поглиблене дослідження навантажень, на дію яких ці елементи розраховуються.

Всі навантаження та впливи у нормах проектування поділяють на постійні і тимчасові. Тимчасові навантаження представлені умовно-постійними (тривалими) та такими, що часто зустрічаються (короткочасними і особливими). 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. Отже, доцільно всі зовнішні навантаження розділити на постійні та змінні. Останні за характером дії можна подати монотонно-змінними – малоцикловими, періодичність повторення яких може сягати декількох десятків, сотень, а деколи і тисяч циклів, і багатоцикловими з періодичністю повторення більше ніж два мільйони циклів [1].

Аналіз характеру зовнішніх впливів дозволяє віднести до малоциклових такі навантаження: вітрові, снігові, навантаження, що спричиняються землетрусом і хвилебоєм, від ваги людей, меблів, складований матеріалів тощо.

**Аналіз останніх досліджень.** Відомо, що межа малоциклової втомленості або малоциклової пристосованості стиснутого бетону  $\sigma_{b,cyc}^{cr} = 0,85R_b$ . Це означає, що при високих рівнях відносних напружень  $\eta_b^{top} = \sigma_b / R > 0,85$  спостерігається розуцільнення бетону і малоциклової втомленості (коли ширина петлі гістерезису безперервно збільшується від циклу до циклу аж до руйнування). При відносних рівнях напружень  $\eta_b^{top} = \sigma_b / R < 0,85$  відбувається ущільнення бетону і наступна стабілізація, тобто спостерігається малоциклова пристосованість бетону [2, 3].

Неруйнівні методи досліджень конструкцій, які використовуються сьогодні в практиці діагностики реальних об'єктів як ультразвукові, тензометричні, радіографічні та інші, не дають оцінки впливу на стан конструкції дефектам типу тріщини, але кожен з цих методів має свої недоліки. Так тензометричні дослідження дає змогу досліджувати лише певну ділянку конструкції, а при ультразвуковій дефектоскопії існує ймовірність пропуску дефекту, окрім того, вона не дозволяє аналізувати його активність. Ці методи не дають достатнього уявлення про процеси тріщиноутворення, що відбуваються в бетоні [4].

Нині методом, що дозволяє судити про активність дефекту і класифікувати його не за розміром, а за ступенем небезпеки для роботи конструкції, є метод акустичної емісії (АЕ). Згідно з прийнятими уявленнями і існуючими визначеннями акустична емісія – це випромінювання матеріалом пружних хвиль, що спричинено перебудовою його структури [5]. При рості тріщини виділяється енергія у вигляді АЕ, навіть якщо дефект мікроскопічний. Під дією локального навантаження чи деформації він генерує хвилі напружень (АЕ). Ці хвилі можуть бути зафіксовані реєструючою апаратурою за допомогою п'єзоперетворювачів, що встановлюються на конструкцію. Метод АЕ в сукупності з іншими методами неруйнівного контролю дає змогу більш точно судити про фактичний стан досліджуваних конструкцій.

**Мета роботи.** В Національному університеті “Львівська політехніка” були проведені пошукові дослідження по використанню методу АЕ, які показали його достатню інформативність і достовірність отримуваних результатів [4]. Тут подано результати дослідження роботи бетону при малоциклових навантаженнях з використанням методу АЕ.

Об'єктом дослідження були бетонні куби розмірами 100×100×100 мм, 150×150×150 мм, призми 100×100×400 мм різних складів (всього 5 серій зразків (див. табл.1)), які були випробувані в м'якому режимі (при постійних напруженнях,  $\sigma = \text{const}$ ) 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  $\eta_b^{\text{low}} = \sigma_b / R = 0$ .

Таблиця 1

### Характеристики бетонних зразків

Серія	Склад бетонної суміші кг/м <sup>3</sup>			В/Ц	Марка цементу	Міцність бетону на стиск, МПа
	Ц	П	Щ			
I	220	814	1226	0,4	500	33
II	388	512	1398	0,4	400	35
III	466	464	1328	0,4	400	49
IV	500	720	1038	0,4	500	55
V	600	500	1170	0,3	500	67

**Виклад основного матеріалу.** Випробування зразків проводили на пресі типу П-250. Рівень навантаження контролювався по шкалі преса і фіксується електронним пристроєм, зв'язаним з ЕОМ. При випробуванні кубів реєстрували сигнали АЕ, що виникали в бетоні за допомогою програмно-технічного комплексу АКЕМ. Давач (п'єзоперетворювач) через шар акустопрозорого мастила кріпився за допомогою гумової стрічки до куба. 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 здійснювалось попереднім підсилювачем з чутливістю на вході 10 мкВ, частотним діапазоном 100–2000 кГц, коефіцієнтом підсилення 90 дБ і з динамічним діапазоном 40–65 дБ.

Кількість циклів, які витримали зразки (кубики) до руйнування, подано в табл. 2. Базою випробувань було прийнято 30 циклів завантажень-розвантажень. Зразки, що витримали базу випробування, доводились до руйнування одноразовим прикладанням сили для визначення руйнівного навантаження.

Таблиця 2

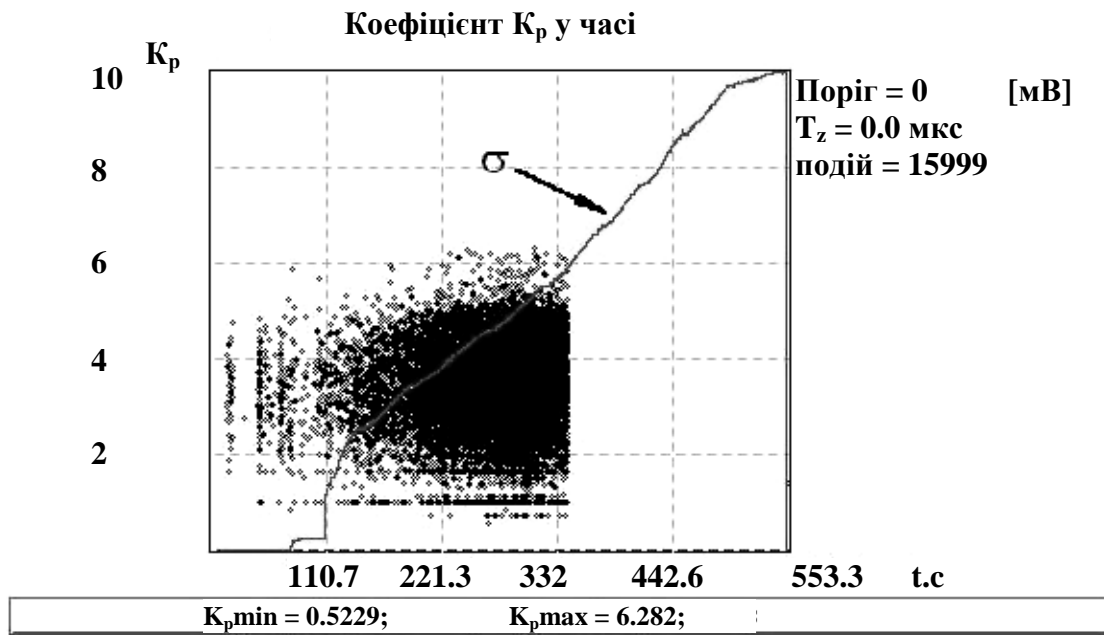
### Кількість циклів, які витримали зразки (кубики) до руйнування

Серія	$\eta_b^{\text{top}} = 0,96$	$\eta_b^{\text{top}} = 0,84$
1	2,2	13,6
2	2	--
3	3,7	28
4	3,11	30,30
5	12,30	30,30

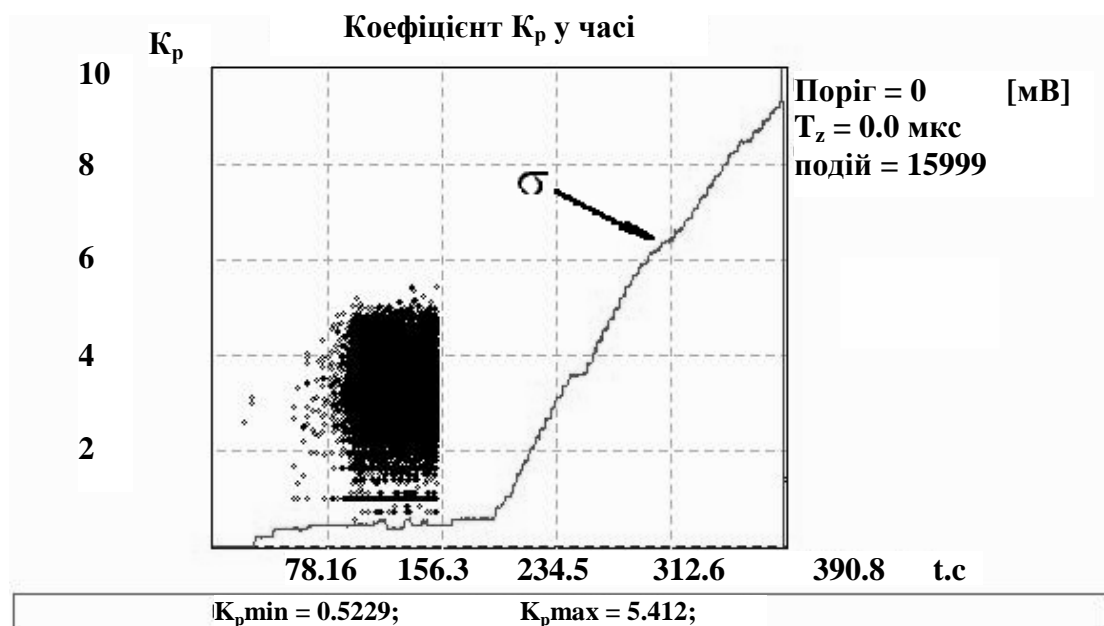
На перших циклах АЕ показує максимальну кількість сигналів (>16000 подій), після одного–трьох перших циклів кількість сигналів поступово зменшується. Так, для призми серії 5, яка була навантажена при відносному рівні напружень  $\eta_b^{\text{top}} = \sigma_b / R = 0,84$ , кількість подій зменшується до 200–400, для призми серії 1 – до 900–1000. Потім спостерігається період стабілізації, коли рівень сигналів АЕ коливається біля певного рівня. Безпосередньо перед руйнуванням кількість сигналів значно зростає. Характерно, що сигнали АЕ фіксуються не тільки при завантаженні, але і при розвантаженні зразків, тобто накопичення деформацій і пошкоджень відбувається постійно, що підтверджується результатами досліджень авторів із роботи [6]. На рис. 1 зображено експеримен-

тальні результати випробування зразків при різних режимах. Окрім кількості подій АЕ, на рисунку також зображена крива навантаження. В обох режимах навантаження є спільна картина – максимальна кількість сигналів спостерігається, коли навантаження доходить до свого максимального значення. Для зразка, який розуцільнюється, спостерігається більша кількість сигналів на витримці під навантаженням, ніж при завантаженні. Для зразка, який уцільнюється, ця картина не така чітка, кількість сигналів на завантаженні близька до кількості сигналів при витримці.

На рис. 2 зображений аналіз сигналів АЕ для зразка, який випробовувався в режимі  $\eta_b^{top} = \sigma_b / R = 0.96$ . Біля кожної кривої вказаний номер циклу, якому вона відповідає. Можна судити про значну дисперсність кількісних значень параметрів АЕ (накопичення сигналів і енергії). Для зразка, який був випробований в режимі  $\eta_b^{top} = \sigma_b / R = 0.84$  картина якісно відрізняється, і кількість сигналів значно менша (200-400), криві щільніше лежать одна біля одної.

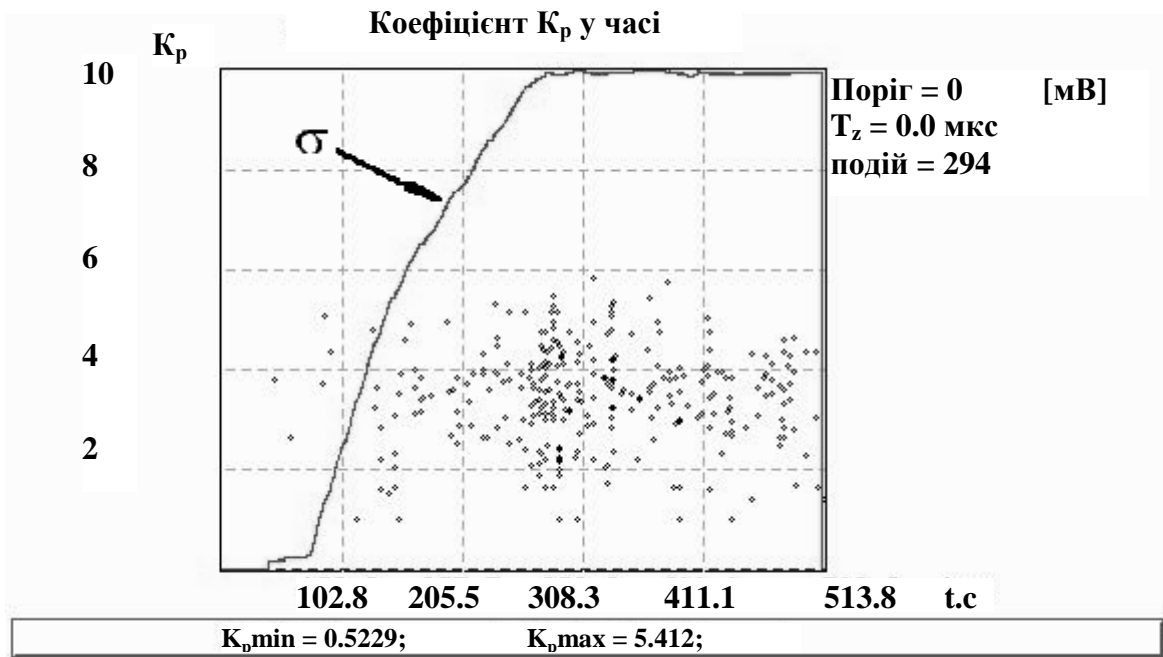


а)

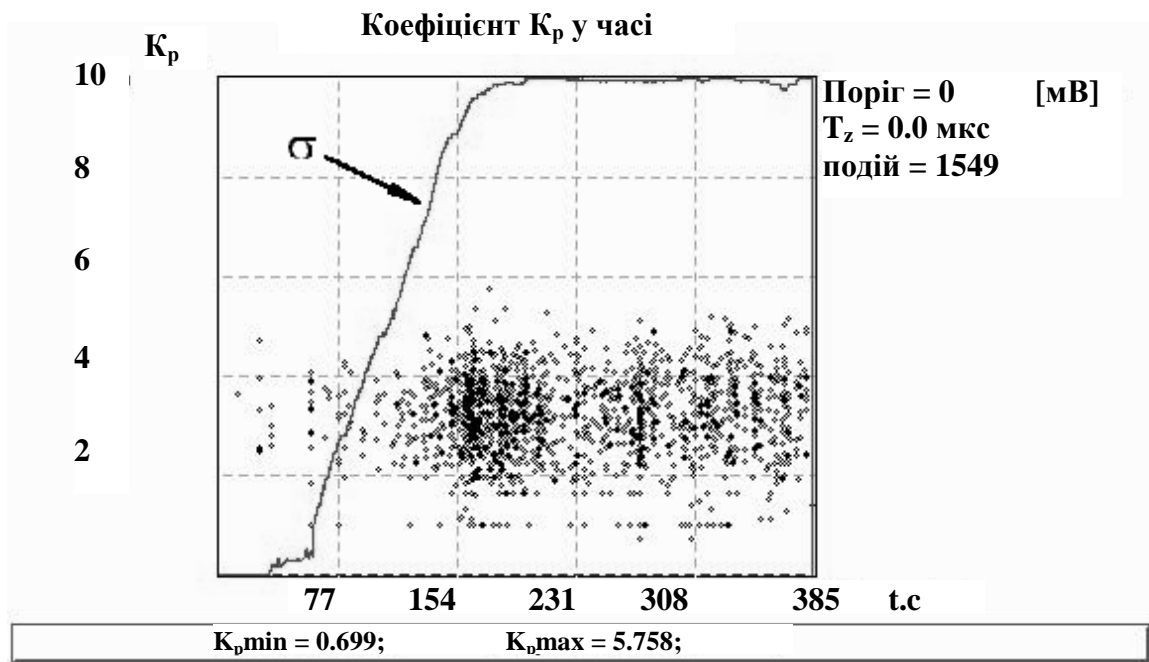


б)

Рис. 1. Кількість подій АЕ для зразка, що уцільнюється (а, в) та зразка, що розуцільнюється (б, г) (див. також с. 96)



в)



г)

Рис. 1. Продовження: в – на 20-му циклі, 2 – на 8-му циклі

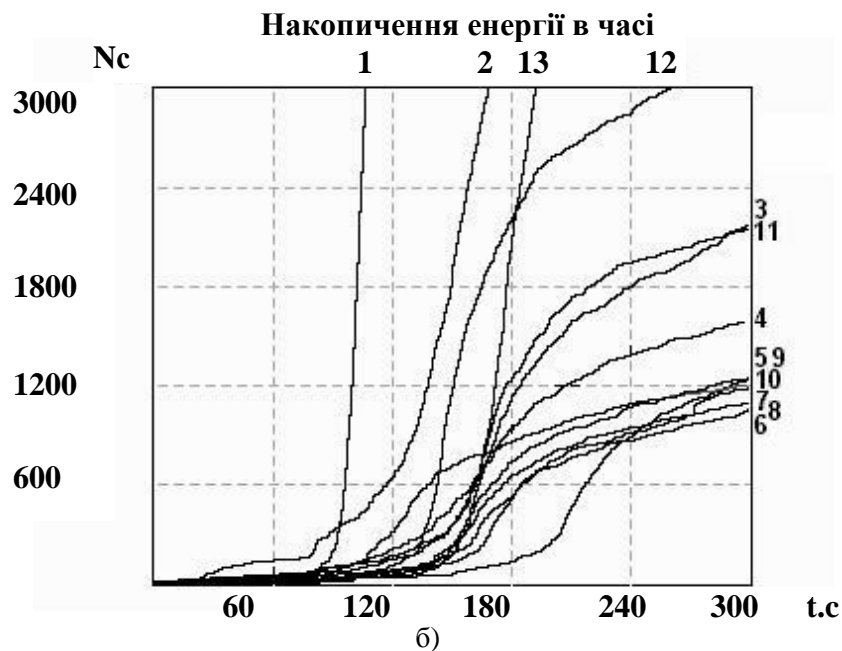
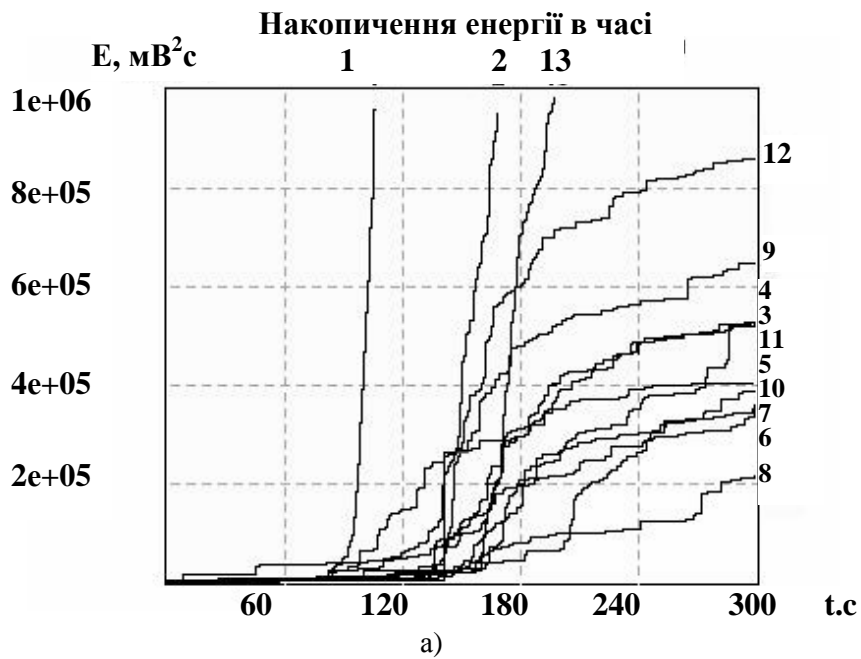


Рис. 2. Накопичення енергії (а) та подій (б) в часі для зразка, що розуцільнився

Поряд з методом АЕ використовувався ультразвуковий прилад УП-14П. Прозвучування ультразвуком відбувалось на початку циклу під час витримки під навантаженням (близько 2 хв) і після розвантаження. Аналіз результатів показує, що процес розуцільнення триває неперервно з кожним циклом. Але характер розуцільнення при різних режимах відрізняється. При режимі  $\eta_b^{top} = \sigma_b / R = 0,96$  фіксується швидке наростання швидкості ультразвуку аж до руйнування. При режимі  $\eta_b^{top} = \sigma_b / R = 0,84$  наростання відбувається також, але значно меншою мірою, з тенденцією до загасання (рис. 3). Один із зразків був випробуваний упродовж двох днів. На другий день в показах ультразвуку відобразилося ущільнення бетону (скачок на діаграмах 1, 2, 3.)

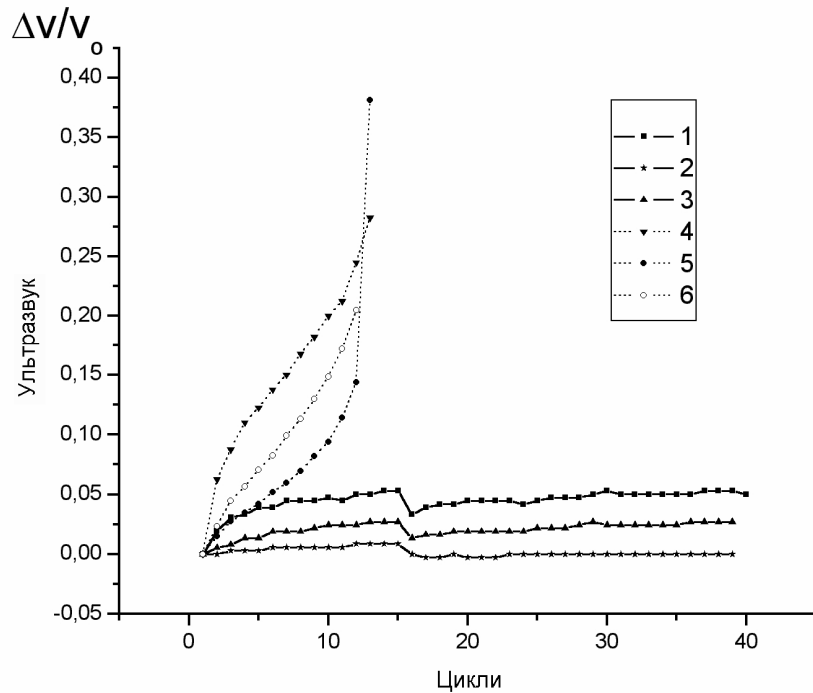


Рис. 3. Результати досліджень бетонних зразків ультразвуковим методом:

1–режим  $\eta_b^{top} = \sigma_b / R = 0,84$ , перед завантаженням, 2–те саме, після розвантаження,  
 3–те саме, під завантаженням, 4–режим  $\eta_b^{top} = \sigma_b / R = 0,96$ , перед завантаженням,  
 5–те саме, після розвантаження, 6–те саме, під завантаженням

**Висновки.** Проведені дослідження виявили, що метод АЕ дає змогу отримати значний обсяг інформації про процеси тріщиноутворення, які відбуваються при малоциклових навантаженнях. Ці результати узгоджуються з даними, отриманими при аналогічних дослідженнях іншими авторами, що підтверджує перспективність використання методу АЕ для технічної діагностики бетонних конструкцій.

1. Бабич Є.М., Крусь Ю.О. Бетонні і залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень: Монографія. – Рівне: Вид-во РДТУ, 1999. – 119 с. 2. Бабич Е.М., Погореляк А.П. Прочность бетона после воздействия малоциклового сжимающей нагрузки // Изв. Вузов. – Сер. Строительство и архитектура. – 1976. – №4. – С. 33–36. 3. 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. 4. Коваль П.М., Сташук П.М. Диагностика stanu бетонних та залізобетонних конструкцій за характеристиками тріщиностійкості // Наукові праці семінару. “Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення.” Київ, УТУ-2000. С.106–109. 5. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика.– К.: Изд-во КМУГА, 1999. – 305 с. 6. Ставров Г.Н., Руденко В.В., Федосеев А.А. Прочность и деформативность бетона при повторно статических нагружениях // Бетон и железобетон. – 1985. – №1. – С. 33–34.