

УДК 624.012.45:658.562.012.7

**ЕКСПЕРТНИЙ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРУ МІЦНОСТІ БЕТОНУ НА СТИСК В КОНСТРУКЦІЯХ МОНОЛІТНОГО СПОСОБУ ВИГОТОВЛЕННЯ***Анатолій Городжа, Сергій Ловеїкін, Володимир Ярас**Київський національний університет будівництва і архітектури,  
03037, Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна, e-mail: lovsej@meta.ua***EXPERT NON-DESTRUCTIVE TESTING COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE IN THE CONSTRUCTION OF MONOLITHIC METHOD OF MANUFACTURE***Anatoliy Horodzha, Serhiy Loveykin, Volodymyr Yaras**Kyiv National University of Construction and Architecture,  
03037, 31 Povitroflotsky Avenue, Kyiv, Ukraine, e-mail: lovsej@meta.ua*

*АНОТАЦІЯ.* Виконано аналіз існуючих способів контролю міцності бетону залізобетонних конструкцій монолітно-каркасного способу виготовлення. Обґрунтована методика проведення даного контролю на основі неруйнівних випробувань.

*Ключові слова:* міцність бетону на стиск, методи неруйнівного контролю, монолітно-каркасне будівництво.

*АНОТАЦИЯ.* Выполнен анализ существующих способов контроля прочности бетона железобетонных конструкций монолитно-каркасного способа изготовления. Обоснована методика проведения данного контроля на основе неразрушающих испытаний.

*Ключевые слова:* прочность бетона на сжатие, методы неразрушающего контроля, монолитно-каркасное строительство.

*ABSTRACT. Purpose.* Control the strength of concrete in structures made of monolith-frame method is a significant problem in modern construction, because in the monolithic-frame construction is a high risk of producing structures with low relative to the project, and passport data on concrete mix does not guarantee a sufficient level of compressive strength of concrete in construction. Methods based on the principle of the destruction of the concrete is too complicated for mass application. The use of non-destructive methods is constrained by the lack of effective methods adapted to the conditions of production monolithic-frame structures. *Methodology/approach.* Construction correlation dependencies for non-destructive testing methods based on testing by partial destruction of concrete structures. Research methods of measuring and constructing correlation dependencies is performed based on extensive field experiments in practice producing monolithic-frame structures. *Findings.* The procedure for nondestructive testing of concrete strength in compression in cast-frame construction, which allows for quality control at low complexity. *Research limitations / implications.* Results of this work can be used for controlling the compression strength of concrete NDT methods in concrete monolithic-frame structures and to further improve the procedure. *Originality/value.* The work has scientific and practical interest.

*Keywords:* compressive strength of concrete, non-destructive testing methods, monolithic-frame construction.

**ВСТУП**

Одним з основних контрольованих параметрів залізобетонної конструкції, що визначає її несучу здатність, є міцність бетону на стиск. При монолітно-каркасному будівництві ризик виготовлення конструкцій із пониженими, відносно проектних, значеннями міцності, як відомо, є вищим, ніж при виробництві збірних залізобетонних конструкцій. Це є наслідком значно

більш нестабільних умов виготовлення монолітних конструкцій, а саме складнішого і тривалішого процесу доставки бетонної суміші, менш ефективного способу ущільнення суміші, складністю реалізації на будівельному майданчику необхідних тепловологісних режимів її твердіння тощо. Серед двох сукупностей конструкцій з однаковим складом бетонної суміші, але різним способом виготовлення – збірним і монолітним, в останньому випадку статистичний

розподіл міцності бетону в готовій продукції характеризуватиметься меншим середнім значенням та більшою дисперсією, що відповідатиме нижчому класу бетону.

Щодо контролю параметру міцності бетону на стиск, то при монолітно-каркасному будівництві його складність зростає.

При виготовленні бетонної суміші на заводі з кожного замісу здійснюється формування серії контрольних кубічних зразків з довжиною ребра 100 мм, які після їх затвердіння в стандартних тепло-вологісних умовах випробовуються на пресі [1]. Дані випробування контрольних зразків однакової за складом бетонної суміші за аналізований період (від одного тижня до двох місяців) визначають клас даної бетонної суміші за міцністю [2].

При виготовленні збірної конструкції на заводі бетонна суміш після її заливки в опалубку ущільнюється за допомогою спеціалізованих заводських установок з незмінними параметрами вібрування, і після цього вона твердне, як і бетонна суміш контрольних зразків, в стандартних тепловологісних умовах. Таким чином, степінь ущільнення і умови твердіння бетонної суміші в контрольних зразках і збірних конструкціях виявляються максимально наближеними, і тому клас бетонної суміші за міцністю, визначений за контрольними зразками, відповідає класу бетону в готових збірних конструкціях.

Натомість, оцінка міцності бетону в монолітних конструкціях за паспортними даними поставленої бетонної суміші – її класом за міцністю, не є достатньо надійною через відмінність умов формування і твердіння конструкцій на будівельному майданчику від заводських. Згідно з ДСТУ [2], у цьому випадку прийнято уточнювати паспортні дані поставленої бетонної суміші шляхом випробування контрольних зразків, що виготовляються разом з конструкціями на будівельному майданчику. Однак, надійність цього способу контролю теж обмежується неможливістю забезпечення однакових умов ущільнення в зразках і конструкціях. Досвід проведення обстежень на багатьох об'єктах монолітного будівництва

в м. Києві свідчить про те, що даний вид контролю в переважній більшості випадків проводиться вельми недосконало.

Альтернативою вказаному способу контролю міцності бетону в монолітних конструкціях є контроль бетону власне конструкцій. Останній може здійснюватись за допомогою випробування зразків, вибурених з тіла конструкції, на основі використання методів часткового руйнування та інших методів неруйнівного контролю.

Щодо методів вибурювання зразків [3], то їх використання може призводити до помітного зменшення несучої здатності конструкції, через що вони застосовуються досить рідко, в основному для перевірки достовірності інших методів. Крім того, даний метод характеризується дуже високою трудомісткістю.

Методи часткового руйнування (відносяться до класу методів неруйнівного контролю [4]) пов'язані з руйнуванням незначного об'єму тіла конструкції, а відтак практично не впливають на її несучу здатність. Однак, дані методи досить трудомісткі і потребують проведення реставраційних заходів. З огляду на це при проведенні контролю міцності великого об'єму продукції застосування методів часткового руйнування є недоцільним.

Стосовно інших методів неруйнівного контролю міцності бетону, то вони є значно менш трудомісткими, але їх використання передбачає проведення попередніх робіт з побудови для даного об'єкту контролю так званої градууювальної залежності між непрямим показником методу та параметром міцності бетону на стиск [4, 5].

Зараз на практиці зведення монолітних будівель часто нехтують проведенням надійного статистичного контролю параметру міцності бетону на стиск, покладаючись на паспортні дані бетонної суміші та посилення виробничого контролю технологічних процесів виготовлення. У більшості ситуацій обмежуються експертним контролем, тобто перевірку міцності в готових конструкціях проводять лише в тих випадках, коли виникають сумніви щодо правильності проведення тих чи інших технологічних етапів. Такий підхід до контролю

якості бетону в монолітних конструкціях може бути виправданий тим, що попри вищу імовірність виникнення браку у порівнянні зі збірними конструкціями, значимість цього браку є нижчою завдяки монолітності всієї будівлі.

Як методи експертного контролю міцності бетону в монолітних конструкціях зазвичай застосовуються методи часткового руйнування, насамперед, метод відриву зі сколюванням. Щодо інших методів неруйнівного контролю, то їх застосування стримується відсутністю ефективних методик, адаптованих до умов монолітно-каркасного будівництва. Зважаючи на цілий ряд достоїнств цих методів, актуальним є завдання розробки таких методик на базі широких натурних досліджень.

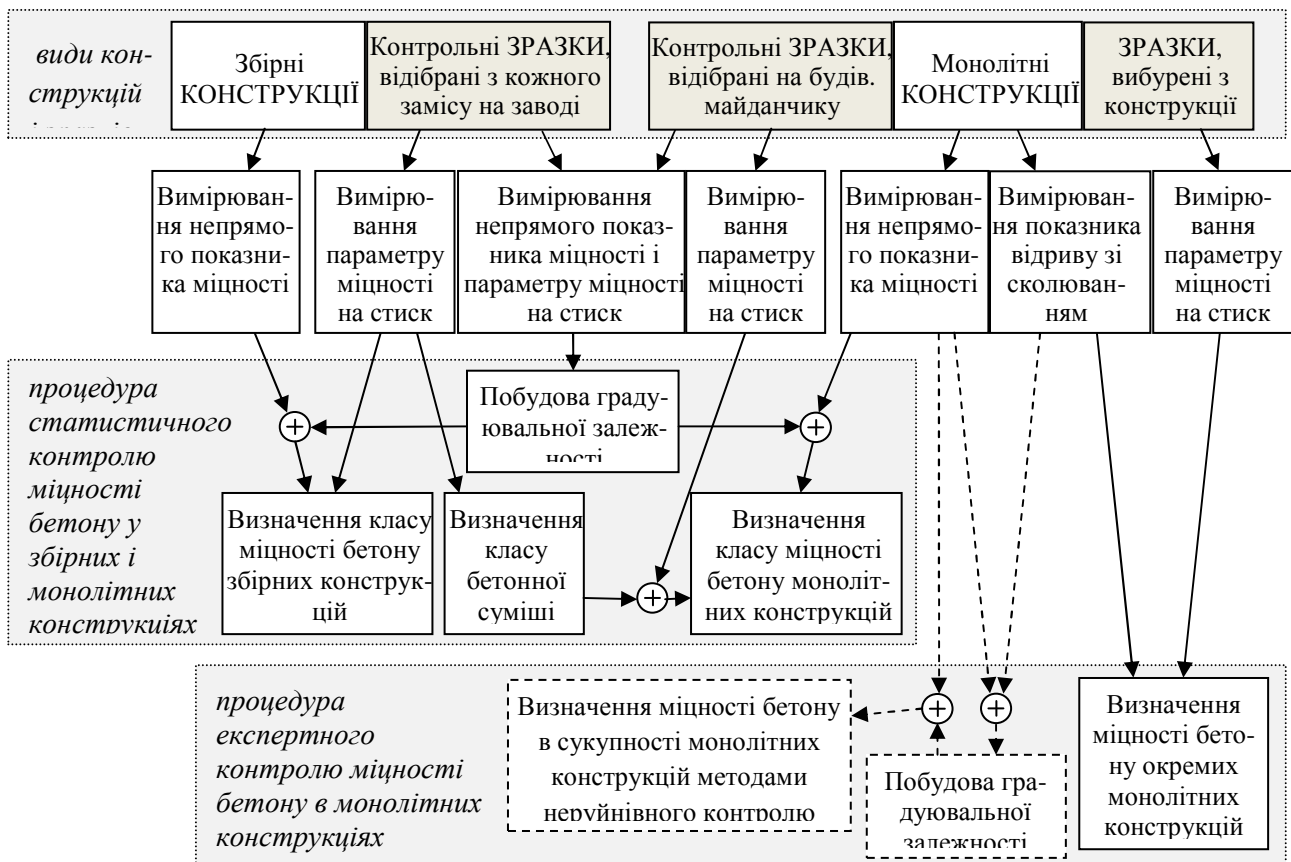
## МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є обґрунтування нової

методики неруйнівного контролю міцності бетону монолітних конструкцій на основі ультразвукових методів або методу ударного імпульсу з побудовою градувальної залежності (залежність між непрямим показником методу і параметром міцності бетону на стиск) на базі випробувань бетону даних конструкцій методом відриву зі сколюванням.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

На рис. 1 представлено схеми проведення контролю параметру міцності бетону на стиск в монолітних та збірних залізобетонних конструкціях, описані у вступі. Пунктирною лінією позначено елементи процедури неруйнівного контролю монолітних конструкцій за пропонованою методикою, в рамках якої здійснюється побудова градувальної залежності на базі випробувань бетону обстежуваних конструкцій методом



**Рис. 1.** Схема виготовлення та контролю міцності бетону залізобетонних конструкцій при збірному та монолітно-каркасному способі їх виготовлення

**Fig. 1.** Scheme of production and control of concrete strength concrete structures with prefabricated and monolithic-frame mode of production



**Рис.2.** Схема неруйнівного контролю параметру міцності бетону на стиск в конструкціях монолітно-каркасного способу виготовлення

**Fig.2.** Scheme NDT parameter compression strength of concrete in structures cast-frame method of manufacture

відриву зі сколюванням. Повну схему даної процедури неруйнівного контролю представлено на рис. 2.

На першому етапі запропонованої методики проводиться вимірювання в кожній монолітній конструкції показника методу неруйнівного контролю з певним просторовим кроком, охоплюючи вимірюванням весь об'єм конструкцій.

На другому етапі на невеликій кількості ділянок обстежуваних конструкцій виконується попарне вимірювання показників методів часткового руйнування і неруйнівного контролю, за результатами якого будується градувальна залежність між непрямим показником і параметром міцності бетону на стиск.

Третій етап методики – уточнення градувальних залежностей, який проводиться в тому випадку, коли точність градувальної залежності, що була встановлена на другому етапі, виявилась недостатньою. При отриманні градувальної залежності

достатньої точності за її допомогою проводиться перерахунок показників неруйнівного методу в окремих зонах конструкцій, що визначались на першому етапі, в значення міцності бетону на стиск.

Досліджувані дані становлять результати вимірювань, які проводились Науково-дослідною лабораторією діагностики агрегатів, конструкцій і споруд Київського національного університету будівництва і архітектури на об'єктах монолітного будівництва в місті Києві з 2007 року до теперішнього часу з метою визначення міцності бетону в вертикальних монолітних конструкціях. Обстеженню підлягали конструкції, що виготовлялись в одну зміну з близьких за складом замісів бетонної суміші при однаковому способі ущільнення. Лабораторія мала на озброєнні прилади, що реалізують метод відриву зі сколюванням та неруйнівні методи – ударного імпульсу (УІ) і ультразвукового (УЗ) при поверхневому чи наскрізному прозвучуванні. В табл. 1 наве-

дено основні характеристики 24-х об'єктів, 21 з яких було обстежено за пропонованою методикою, а 3 – із застосуванням виключно методу часткового руйнування.

**Таблиця 1.** Розподіл об'єктів за параметрами конструкцій та методами їх обстеження

**Table 1.** Distribution objects options structures and methods of their examination.

<i>Розподіл за параметрами конструкцій</i>				
<i>Кількість конс- трукцій</i>	2-5	8-10	11-15	19-30
Кількість об'єктів	4	6	5	4
<i>Висота констру- кцій</i>	<i>до 2,2 м</i>	<i>до 3 м</i>	<i>до 4 м</i>	
Кількість об'єктів	16	6	3	
<i>Тип конструкцій</i>	<i>колона</i>	<i>пілон</i>	<i>стіна</i>	
Кількість об'єктів	18	4	10	
<i>Розподіл за параметрами обстеження</i>				
<i>Кількість відривів зі сколюванням на 10 конструкцій</i>	3-5	6-15	16-25	26-30
Кількість об'єктів	6	8	7	3
<i>Застосований метод неруйнівного контролю</i>	<i>УІ+УЗ</i>	<i>УІ</i>		-
Кількість об'єктів	12	9	3	

Згідно з ДСТУ на методи частково-руйнівного контролю [4] в одній вертикальній конструкції, що виготовляється з одного замісу бетонної суміші, для надійного контролю міцності бетону необхідно провести не менше 4-х випробувань. З табл. 1 видно, що використання неруйнівних методів за запропонованою методикою дозволило скоротити використання методу відриву зі сколюванням в 2...13 разів. При цьому більше відносне скорочення відповідає більшим за кількістю конструкцій об'єктам. Враховуючи те, що з метою дослідження методики на багатьох об'єктах число випробувань було більше за необхідне, кількість цих випробувань може бути скорочена щонайменше у 3 рази. На

об'єктах з великою кількістю контрольованих конструкцій таке зниження трудомісткості контролю є дуже відчутним і економічно вигідним.

Проведено аналіз методики неруйнівного контролю міцності бетону в конструкціях монолітно-каркасного способу виготовлення, схему якої представлено на рис. 2.

1. Першим етапом є вимірювання непрямих показників міцності в усіх обстежуваних конструкціях. Прилади, які реалізують вимірювання непрямих показників міцності, є легкими в застосуванні, тож ними можна обстежити конструкцію з високою просторовою щільністю вимірювання. Оскільки бетон в вертикальній конструкції зазвичай має значну неоднорідність за міцністю, значення непрямого показника усереднюють не по всій конструкції, а по її окремим зонам, в межах яких спостерігається відносна однорідність. Згідно з результатами обстежень розглянутих об'єктів, відхилення міцності бетону в вертикальній конструкції можуть сягати  $\pm 10\%$  відносно середнього значення міцності в даній конструкції.

1.1. В ході проведення обстежень було помічено, що вертикальні конструкції неоднорідні за властивостями бетону по висоті конструкції і зберігають відносну однорідність по горизонталі. Верхні зони конструкції мають понижені значення міцності та неруйнівних показників, нижні – підвищені. Це відбувається за рахунок седиментації крупного заповнювача, різного ущільнення за рахунок ваги, характеру ущільнення – оскільки бульбашки повітря у бетонній суміші під дією ущільнюючих факторів прямують нагору, а відомо, що повітряні пори помітно знижують міцність бетону. З огляду на це, при обстеженнях було прийнято ділити конструкцію на зони по висоті. Висота зони приймалась стандартною для всіх об'єктів – близько 0,75м, коли конструкції висотою 2,0...2,5м ділились на три вертикальні зони, 2,5...3,5 м – на чотири зони, 3,5...4,5 м – на п'ять зон.

1.2. Метод ударного імпульсу та ультразвуковий метод при поверхневому прозвучуванні реалізують вимірювання своїх показників в поверхневому шарі бетону, тоді

як ультразвуковий метод при наскрізному прозвучуванні – в усій товщі конструкції. В конструкціях великого терміну твердіння бетону може спостерігатись ефект «карбонізації» поверхні, за рахунок якого помітно зростає твердість поверхневого шару бетону. В таких випадках показники поверхневих методів неруйнівного контролю показуватимуть завищені значення, і тому їх використання для контролю міцності бетону «старих» конструкцій є недоцільним.

Метод ударного імпульсу є аналогічним іншим методам поверхневої твердості – відбитку і відскоку, але більш зручний у використанні, оскільки має можливість цифрового запису результату вимірювання. Ультразвуковий метод при наскрізному прозвучуванні має, порівняно з поверхневим, як перевагу – розповсюдження сигналу в товщі самої конструкції, так і недолік – високу нестабільність бази прозвучування, яка суттєво знижує точність вимірювання. Оскільки наскрізний метод є також значно більш трудомістким, його використання для неруйнівного контролю міцності бетону монолітних конструкцій незначного віку є недоцільним.

1.3. Прилади ультразвукового поверхневого методу та методу ударного імпульсу реалізовані на основі цифрових пристроїв, в пам'ять яких здійснювався автоматичний запис усередненого значення непрямого показника після серії не більше 15-ти вимірювань. При невеликих перерізах конструкції (колони) і кроці вимірювання 10...20 см зону конструкції висотою 0,75 м можна охопити з різних сторін серією з 15-ти вимірювань поверхневими методами неруйнівного контролю. Якщо переріз конструкції є більшим (пілон), для обстеження зони використовують декілька серій по 15 вимірювань, результат яких усереднюють.

2. Побудова градуовальної залежності є найвідповідальнішим етапом, від правильності якого залежить точність результату неруйнівного контролю.

2.1. Для побудови градуовальної залежності на основі випробування виготовлених зразків, яка може використовуватись для статистичного контролю міцності – обстеження великого об'єму продукції, кількість

зразків має бути не менше 30, або не менше 15 серій по 2 зразки. Запропонована методика призначена для експертного контролю – обстеженню не дуже великого об'єму продукції. Початкова кількість відривів для градування за даною методикою обиралась тим більшою, чим більшим був об'єм контрольованої продукції і чим вищими були загальна неоднорідність властивостей бетону в усьому об'ємі продукції і по висоті конструкцій. На обстеженому 21-му об'єкті початкова кількість точок для градування призначалась від 5 до 17.

2.2. Під час вибору місць випробувань для побудови градуовальної залежності основною задачею є збереження у вибірці загального характеру неоднорідності, що має місце в сукупності контрольованих конструкцій як за показником міцності, так і за непрямим показником. Тому ділянки для відривів обирались таким чином, щоб вони представляли різні рівні по висоті конструкцій і належали конструкціям, рівномірно віддаленим одна від одної – тобто, рівномірно розміщених по площі свого розташування і тому залитих з максимально різних замісів бетонної суміші. Окрім того, обрані зони повинні були мати і високі, і середні, і низькі значення показників методів неруйнівного контролю, причому акцент вибору робився на зони із найслабшими показниками як на найбільш важливі в плані контролю.

2.3. На кожній ділянці, що була обрана для градування, здійснювалась серія з 10-ти вимірювань показника ударного імпульсу і швидкості розповсюдження ультразвуку, результати яких усереднювались.

2.4. На кожній ділянці, що була обрана для градування, здійснювався відрив зі сколюванням при глибині затискання анкера 30 або 35 см, за результатом якого визначалась міцність бетону на стиск даної ділянки.

2.5. Побудову градуовальної залежності можна здійснювати на основі даних парного вимірювання непрямого показника міцності і показника відриву зі сколюванням в окремих ділянках (точках) конструкцій, а можна – на основі усереднених даних цих вимірювань по зонам конструкцій. Майже

на всіх об'єктах виміряні значення непрямих і прямих показників міцності в окремих точках мали тіснішу кореляцію, ніж значення цих показників в окремих зонах.

Побудова градувальних залежностей здійснюється методом найменших квадратів в експоненціальному або лінійному вигляді. Для обох неруйнівних методів експоненціальний вигляд, майже в усіх випадках обстеження, виявився точнішим за лінійний. Для побудови і подальшого розрахунку параметрів градувальних залежностей використовувалась програма MS Office «Excel». На рис. 3 представлені градувальні залежності для методів ударного імпульсу та ультразвукового методу при поверхневому прозвучуванні в експоненціальному вигляді, що були встановлені на 10 об'єктах за результатом проведення вимірювання непрямого показника методу та показника відриву зі сколюванням не менше як на 13-ти окремих ділянках конструкцій.

2.6. Біля градувальних залежностей на рисунку вказані величини імовірності апроксимації  $R^2$ , що виводяться при побудові графіка в «Excel» і характеризують тісноту «скупчення» точок навколо побудованих за методом найменших квадратів залежностей. Знаходиться даний параметр як коефіцієнт детермінації (квадрат коефіцієнту кореляції) при переведенні міцності на логарифмічну, у випадку експоненціальних залежностей, шкалу:

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (\ln R_i - \overline{\ln R}) \cdot (X_i - \overline{X}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (\ln R_i - \overline{\ln R})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \overline{X})^2},$$

де  $n$  – кількість парних вимірювань ( $R_i$ ;  $X_i$ );  $R$  – показник методу відриву зі сколюванням (міцність бетону);  $X$  – показник неруйнівного методу. Згідно [6], даний параметр перераховується у величину похибки оцінки міцності за побудованою градувальною залежністю наступним чином:

$$\delta = \frac{\sqrt{D_R \cdot (1 - R^2)}}{\bar{R}} \cdot 100\% ,$$

де  $D_R$  – дисперсія міцності бетону. Значення даної похибки використовують для оцінки точності неруйнівного контролю.

В табл. 2 наведено значення похибок оцінки міцності для градувальних залежностей з усіх досліджуваних об'єктів при двох способах градування: за середніми значеннями показників в місцях відривів і за середніми значеннями показників в зонах конструкції, в яких знаходяться відриви.

Затемнені ділянки в табл. 2 відповідають інформації, що відображена на рис. 2.

Критерієм прийнятності градувальної залежності служила величина похибки оцінки міцності менша 10% – із запасом в порівнянні з 12%, що застосовується при градуванні на основі вимірювання зразків за стандартною методикою статистичного контролю. У випадку завищених похибок проводилось відбраковування нетипових для залежності «викидів» за процедурою, що описана в ДСТУ на методи неруйнівного контролю міцності бетону [4, 5].

3. Якщо відбраковування «викидів» не приводить до отримання прийнятної точності градувальної залежності, призначаються додаткові вимірювання методом відриву зі сколюванням для уточнення наявної градувальної залежності.

3.1. Додаткові вимірювання призначаються в зонах конструкції зі значенням непрямого показника, що відповідає «області невизначеності» градувальної залежності. Призначається від одного до чотирьох додаткових вимірювань – тим більше, чим більше перевищення похибки оцінки міцності та чим більший об'єм обстежуваної сукупності.

3.2. Вимірювання непрямих показників в додаткових точках аналогічне п. 2.3.

3.3. Вимірювання показника відриву зі сколюванням і встановлення значення міцності бетону на стиск в додаткових точках аналогічне п. 2.4.

**Таблиця 2.** Параметри градування

**Table 2.** Calibration settings

№ об'єкта	Кількість конструкцій	Кількість відривів	Кількість відбракувань	Кількість додаткових точок	метод ударного імпульсу		ультразвуковий поверхневий метод	
					$R^2$	$\delta$ , %	$R^2$	$\delta$ , %
1	30	14	6	0	0,8015	6,5	-	-
2	23	21	4	2	0,8975	5,4	0,7616	8,2
3	23*	7	0	0	0,9670	2,2	-	-
		5	0	0	0,8301	5,0	-	-
4	19	6	0	0	0,7734	9,6	-	-
5	15	20	8	4	0,6931	6,5	0,8740	4,2
6	15	6	0	0	0,7232	4,9	-	-
7	12	19	3	2	0,8575	6,3	0,8455	6,5
8	11	13	5	2	0,8997	5,6	0,6964	9,8
9	11	19	3	0	0,2629	5,9	0,7782	3,2
10	10	15	2	0	0,9000	4,0	0,6579	7,3
11	9	23	6	6	0,7307	9,3	-	-
12	9	10	0	0	0,7481	5,4	-	-
13	9	6	0	0	0,8908	7,2	0,9943	1,6
14	8	8	2	1	0,6425	5,1	-	-
15	8	16	4	2	0,8057	7,0	0,8443	6,2
16	8	16	2	0	0,7050	4,7	-	-
17	5	10	0	0	0,8179	8,0	-	-
18	3	8	1	1	0,7800	10,8	0,8641	8,5
19	3	9	0	0	0,6258	6,7	-	-
20	2	5	0	0	0,8239	6,7	0,7083	8,6
21	2	5	0	0	0,9786	4,3	-	-
<i>середні значення по всім об'єктам</i>								
-	11	12	2	1	0,7798	6,2	0,8025	6,4
<i>середні значення по «спільним» об'єктам</i>								
-	10	14	4	2	0,7811	6,5	0,8025	6,4

\* - дві яскраво виражені кореляції на об'єкті.

3.4. Після проведення вимірювань в додаткових точках процедура встановлення градувальної залежності повторювалась.

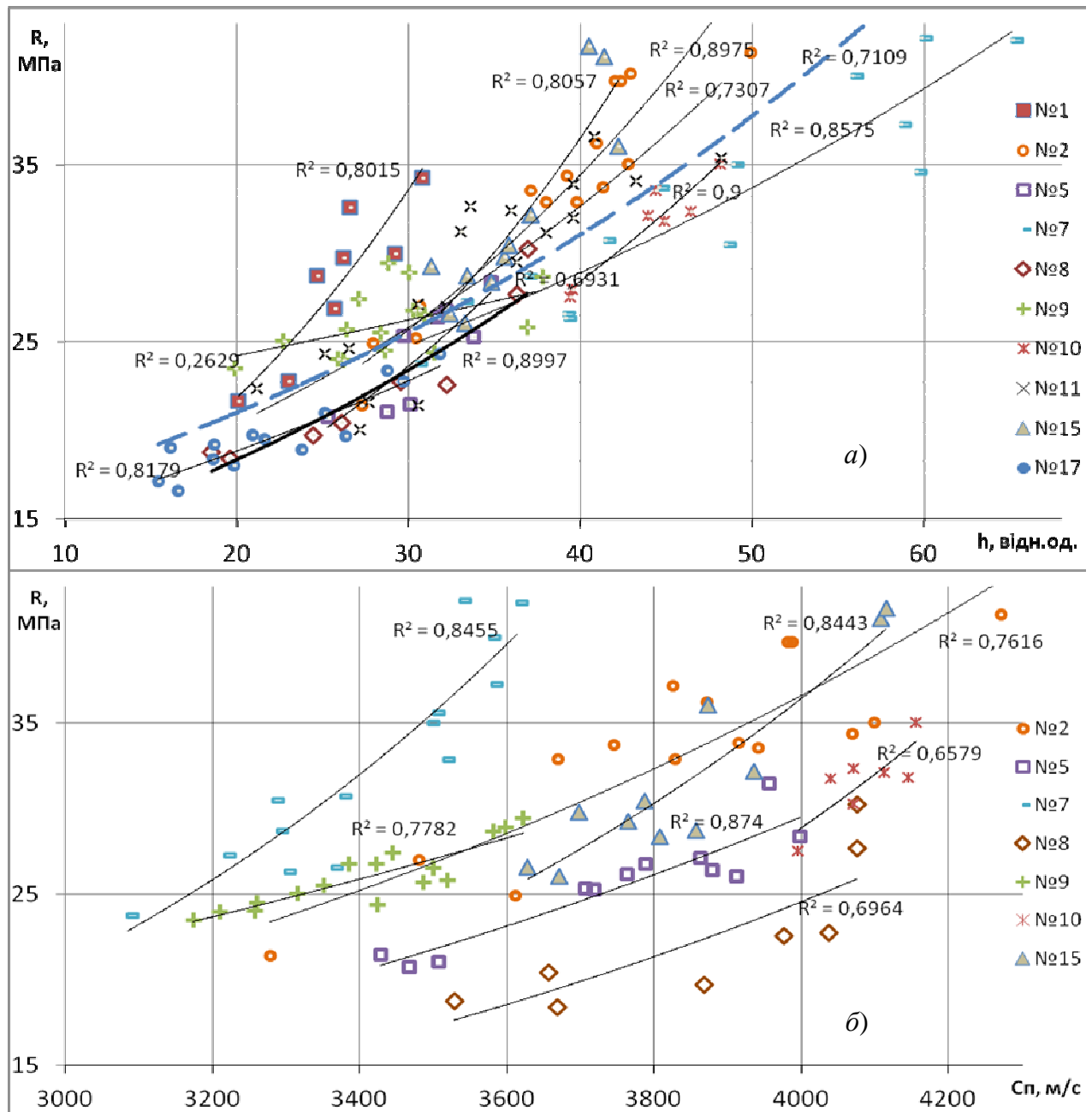
Здійснювалось відбраковування «викидів», і оцінювалась точність визначення міцності за новою градувальною залежністю.

У випадку, коли точність градувальної залежності виявлялась недостатньою (більше 10%), знову призначались додаткові вимірювання в зонах конструкцій, що за значенням непрямого показника відповідають найбільш «сумнівній» області на градувальній залежності. Дана процедура повторювалась, поки точність градувальної залежності не ставала прийнятною.

Проаналізуємо результати отриманих в кінцеву підсумку параметрів градувальних залежностей та розподілів міцності на досліджуваних об'єктах.

Для порівняння точності різних методів та різних способів неруйнівного контролю знайдемо середні значення похибок лише по тим об'єктам, в яких застосовувались обидва методи неруйнівного контролю – ультразвуковий і метод ударного імпульсу. В результаті підрахунку для методу ударного імпульсу значення похибки оцінки міцності склали 6,5% при способі градування за значенням в місцях відривів і 10,2% при способі градування за середніми значенням в зонах; для ультразвукового поверхневого методу 6,4% та 7,8% відповідно. Звідси видно, що спосіб градування за значеннями вимірюваних показників в місцях відривів дає значно вищу точність, ніж градування за середнім значенням показників в зонах конструкцій. Також видно, що ультразвуковий поверхневий метод є більш точним, хоч і не набагато, за метод ударного імпульсу.





**Рис.3.** Градувальні залежності для методів ударного імпульсу (а) та ультразвукового при поверхневому прозвучуванні (б): №1,2,5,7,8,9,10,11,15,17 – номери об'єктів, згідно з табл.2

**Fig. 3.** Depending calibration methods for shock pulse (a) and surface ultrasound method (b): №1,2,5,7,8,9,10,11,15,17 - accommodation facilities, according to table 2

Змінюваність градувальних залежностей пояснюється, в першу чергу, суттю кореляційного зв'язку між непрямим показником і міцністю на стиск, величина і характер якого залежать від того, яка саме структурна неоднорідність має місце в обстежуваній сукупності конструкцій. Наприклад, збільшення вмісту крупного запо-

внювача приводить до помітного збільшення швидкості ультразвуку, тоді як міцнісні показники бетону при цьому можуть майже не змінюватись. Тому при значній варіації в сукупності вмісту заповнювача порівняно з іншими технологічними факторами швидкість ультразвуку змінюватиметься в великих межах, тоді як міцність

бетону – в незначних, і градувальна залежність вийде «розтягнутою» по горизонталі. Характер залежності буде іншим, коли основним змінюваним технологічним фактором буде активність чи вміст цементу, дозування води, інтенсивність ущільнення, вік бетону та ін. Метод ударного імпульсу має свої особливості – він, навпаки, мало чутливий до кількості крупного заповнювачу, як і до його якості.

Проектні технології виготовлення на обстежуваних об'єктах відрізнялись незначним чином – бетонні суміші класу В30-В40 із високою рухливістю (ОК близько 8 см) та ущільненням глибинним вібратором. Відмінність середнього значення міцності на різних об'єктах пояснювалась, в основному, окрім як відмінністю по класу бетону, різним віком обстежуваних конструкцій – від 12 днів до 6 місяців.

Іншою причиною відмінностей градувальних залежностей на різних об'єктах є апаратурні похибки – нестабільність параметрів вимірювальних пристроїв. Під час даних обстежень прилади методів відриву зі сколюванням та ударного імпульсу мали стабільні параметри, які були незмінними на різних об'єктах. В ультразвуковому поверхневому методі від об'єкту до об'єкту в межах 10% змінювалась база прозвучування, і для її точного врахування необхідно було проводити вимірювання часу розповсюдження на еталонному зразку, що не виконувалось з метою економії часу. Це не впливало на точність оцінки міцності кожного окремого об'єкта, оскільки кожного разу будувалась нова градувальна залежність, але дана апаратурна нестабільність пояснює більший діапазон змінюваності градувальних залежностей ультразвукового поверхневого методу, що спостерігається на рис. 2. Отже, через відсутність процедури калібрування приладу перед кожним вимірюванням, універсальна градувальна залежність для ультразвукового методу (пунктирна лінія на рис.2.б, похибка 20,6%) не має змісту.

Похибка універсальної градувальної залежності для методу ударного імпульсу (пунктирна лінія на рис.2.а) складає 12,3%. Це вище рівня допустимої похибки навіть

для стандартного статистичного контролю (12%). Проілюструємо неможливість застосування даної універсальної залежності на приладі об'єкту з кількістю 11 конструкцій і 13 відривів (восьмий зверху об'єкт в табл. 2 та ромбічні точки і більш «жирна» крива зі значенням коефіцієнту детермінації 0,8997 на рис.2, а). Даний об'єкт важливий тим, що, при проектному класі бетону колон першого поверху десятиповерхового будинку В40, результати неруйнівного контролю міцності бетону в 11-ти колонах (віком 14...21 діб) показали середнє значення 26,7 МПа, що в перерахунку на вік 28 діб (за наближеними залежностями) складає 34,9 МПа. Жодна колона даного об'єкту не повинна була мати міцність в проектному віці менше 40,0 МПа, тому за результатами контролю на даному об'єкті було зрізано 10 колон.

В верхній зоні найслабшої колони на даному об'єкті проводилось вибурювання кернів, зразки з яких показали міцність 19,05 МПа. Відриви в даній зоні показали міцність 19,1 МПа, результати контролю методом ударного імпульсу – 18,6 МПа. Якби контроль здійснювався методом ударного імпульсу за універсальною залежністю, міцність даної зони визначилась би як 21,5 МПа, а замість середнього значення по об'єкту в проектному віці 34,9 МПа вийшло б 37,4 МПа. Це досить суттєва різниця в результатах контролю, яка дозволила б у випадку використання універсальної залежності відбракувати значно меншу кількість конструкцій.

Підсумовуючи результати дослідження, окреслимо найбільш ефективну загальну процедуру експертного неруйнівного контролю параметру міцності бетону на стиск в сукупності монолітних вертикальних конструкцій.

При кількості конструкцій меншій трьох застосовується напівруйнівний експертний контроль (проведення 4 відривів зі сколюванням на конструкцію). В іншому випадку конструкції діляться на зони висотою близько 0,7 м, і визначається швидкість ультразвуку для кожної зони за одну серією з 15 випробувань – для невеликих за перерізом конструкцій (наприклад, колон), і за двома

серіями – для більших. Усі зони конструкцій розбиваються на 3 групи – з низьким значенням швидкості, середнім і високим. Початкова кількість відривів для градування призначається рівною шести для об'єктів з кількістю конструкцій 3...10, рівною 12 – для об'єктів з кількістю конструкцій більше 10. Вибір зон для градування повинен здійснюватись таким чином, щоб близько 40% зон входили до слабшої групи, 35% до середньої і 25% до вищої. При цьому вони повинні відноситись до зон, різних за висотою розміщення в конструкціях, а також розміщуватись в конструкціях, рівномірно віддалених одна від одної в будівлі. Також обрані для проведення вимірювань методом відриву зі сколюванням конструкції повинні бути максимально різні за датами формування (термінам твердіння). У кожній з вибраних для градування точках проводиться по 1 серії з 10 вимірювань швидкості розповсюдження ультразвуку при поверхневому прозвучуванні і вимірювання сили відриву анкера методом відриву зі сколюванням, за яким знаходиться значення міцності на стиск в даних точках. За результатами даних парних випробувань методом найменших квадратів будується експоненціальна градувальна залежність при попередньому відбракуванні нетипових «викидів». Якщо відносна кількість викидів складає більше за 15%, або похибка оцінки міцності за градувальною залежністю складає більше 10%, призначаються додаткові випробування методом відриву зі сколюванням в зонах зі значенням непрямого показника, що відповідає «області найбільшої невизначеності» градувальної залежності. Додаткові випробування проводяться до тих пір, поки обидва із зазначених критеріїв не будуть задоволені.

## ВИСНОВКИ

Розроблено методику експертного неруйнівного контролю параметру міцності бетону в сукупності монолітних вертикальних конструкцій, яка базується на використанні ультразвукового методу при поверх-

невому прозвучуванні або методу ударного імпульсу при застосуванні для побудови градувальної залежності методу відриву зі сколюванням.

Розглянуто особливості побудови градувальних залежностей. Зокрема, визначено зв'язок початкової кількості випробувань методом відриву зі сколюванням з обсягом контрольованої продукції та неоднорідністю непрямого показника.

На основі виконаних досліджень показано, що застосування універсальної градувальної залежності між показником ударного імпульсу і параметром міцності бетону на стиск може призводити до суттєвих похибок у визначенні міцності конструкцій.

Зіставлення двох методів неруйнівного контролю – ультразвукового при поверхневому прозвучуванні і ударного імпульсу показує, що застосування ультразвукового методу дає трохи вищу точність оцінки міцності бетону в конструкціях.

Для ультразвукового методу також встановлено як впливає на виникнення апаратної складової похибки відсутність перед кожним новим вимірюванням калібрування приладу на еталонному зразку, що є важливим при обстеженні великих за обсягом об'єктів, коли вимірювання проводиться в декілька підходів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *ДСТУ Б В.2.7-214:2009* Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
2. *ДСТУ Б В.2.7-224:2009* Будівельні матеріали. Бетони. Правила контролю міцності.
3. *ДСТУ Б В.2.7-223:2009* Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій.
4. *ДСТУ Б В.2.7-220:2009* Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю.
5. *ДСТУ Б В.2.7-226:2009* Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності.
6. *Ловейкін С.О., Ярас В.І.* Способи побудови градувальної залежності та оцінки її параметрів при неруйнівному контролі міцності бетону на стиск. – «Строительные материалы и изделия» №4 (69), стор. 23-25, Київ, 2011.

7. Ужполявичюс Б.Б. Неразрушающие методы контроля и оценка прочности бетона в железобетонных конструкциях. – Вильнюс: Моклас, 1982, – 194с..
8. Методические рекомендации по статистическому контролю прочности бетона с учетом эффективности испытаний. – К.: НИИСК, 1981.
9. Вольф І.В., Лихачов В.Д., Хомутченко С.Я. Випробування міцності бетону в конструкціях комплексним методом. – Київ: Будівельник, 1969. – 35с.
10. Човнюк Ю. Концептуальні основи кінематичного аналізу лінійних дискретно-континуальних вібраційних систем: застосування інтегрального перетворення Лапласа / Ю. Човнюк, К. Почка, В. Кравчук, М. Діктерук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2015. – №85. – С. 15-19.
11. Човнюк Ю. Вдосконалення методу кепстра в акустичній діагностиці технічного стану будівельних машин і механізмів / Ю. Човнюк, М. Діктерук, К. Почка // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2014. – №84. – С. 5-10.
6. Loveykin S.O., Yaras V.I., 2011. Spособy pobudovy hraduyuvail'noyi zalezhnosti ta otsinky yiyi parametriv pry neruynivnomu kontroli mitsnosti betonu na stysk [Methods of building the calibration dependence and estimation of its parameters in non-destructive testing of concrete compressive strength]. Stroitelnye materialy i izdeliya [Building materials and products], No 4 (69), 23-25, Kyiv, 2011. – (in Ukrainian).
7. Uzhpolyavychyus B.B., 1982. Nerazrushayushchye metody kontrolya i otsenka prochnosti betona v zhelezobetonnykh konstruktsiyakh. [Nondestructive testing methods and evaluation of concrete strength in reinforced concrete structures]. Vilnius, Mokslas, 194. – (in Russian).
8. Metodicheskie rekomendacii po statisticheskomu kontrolju prochnosti betona s uchedom jeffektivnosti ispytaniy, 1981. [Methodical recommendations for statistical control of strength of concrete taking into account the effectiveness of tests]. Kyiv, NIISK Publ. – (in Russian).
9. Vol'f I.V., Lykhachov V.D., Khomutchenko S.Ya., 1969. Vyprobuvannya mitsnosti betonu v konstruktsiyakh kompleksnym metodom [Test the strength of concrete in structures complex method]. – Kyiv: Budivel'nyk, 35. – (in Ukrainian).

#### REFERENCES

1. DSTU B V.2.7-214:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrol'nymy zrazkami [Building materials. Concrete. Methods for determining the strength of control samples]. – (in Ukrainian)
2. DSTU B V.2.7-224:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Pravyla kontrolyu mitsnosti [Building materials. Concrete. Regulations controlling strength]. – (in Ukrainian)
3. DSTU B V.2.7-223:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za zrazkami, vidibranyu z konstruktsiy [Building materials. Concrete. Methods for determining the strength of samples taken from designs] – (in Ukrainian).
4. DSTU B V.2.7-220:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Vyznachennya mitsnosti mekhanichnymu metodamy neruynivnoho kontrolyu [Building materials. Concrete. Determination of strength mechanical methods of nondestructive testing] – (in Ukrainian).
5. DSTU B V.2.7-226:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Ul'trazvukovyy metod vyznachennya mitsnosti [Building materials. Concrete. The ultrasonic method for determining the strength]. – (in Ukrainian)
10. Chovnyuk Yu, Pochka K., Kravchuk V., Dykteruk M., 2015. [Conceptual bases of the kinematic analysis of linear discrete and continual vibration systems: use of integrated transformation of laplace]. Girnichi, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and agricultural machines], No.85, 15-19. – (in Ukrainian).
11. Chovnyuk Yu, Dykteruk M., Pochka K., 2014. [Improvement of a method of a kepstr in acoustic diagnostics of technical condition of construction cars and mechanisms]. Girnichi, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and agricultural machines], No.84, 5-10. – (in Ukrainian).