

Технічні науки

УДК 691.328:620.1

Антоненко Анатолій Михайлович

кандидат фізико-математичних наук,

доцент кафедри фундаментальних дисциплін

Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара

Антоненко Анатолій Михайлович

кандидат физико-математических наук,

доцент кафедры фундаментальных дисциплин

Днепроvский национальный университет имени Олеса Гончара

Antonenko Anatolii

PhD in Physics and Mathematics,

Associate Professor of the Department of Fundamental Disciplines

Oles Honchar Dnipro National University

Волнянський Дмитро Михайлович

кандидат фізико-математичних наук, доцент,

доцент кафедри фізики

Дніпровський національний університет

залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Волнянский Дмитрий Михайлович

кандидат физико-математических наук, доцент,

доцент кафедры физики

Днепроvский национальный университет

железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

Volnianskyi Dmytro

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Physics

Dnipro National University of Railway Transport

named after Academician V. Lazaryan

**ДО ПИТАННЯ ПРО ДИГІТАЛІЗАЦІЮ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ
МІЦНОСТІ БЕТОНУ
К ВОПРОСУ О ДИДЖИТАТИЗАЦИИ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПРОЧНОСТИ БЕТОНА
ON THE QUESTION OF DIGITALIZATION OF METHODS FOR
DETERMINING THE STRENGTH OF CONCRETE**

Анотація. У сучасному світі спостерігається стрімка дигіталізація багатьох процесів навколо нас, починаючи від різних фінансових послуг, здійснення покупок в інтернеті, оформлення документів тощо. Для промисловості вже не є новинкою так званий підхід Industry 4.0, коли для оптимізації і вдосконалення тих чи інших виробничих процесів проводиться наскрізний моніторинг необхідних параметрів, які створюють основу для Business Information Model (BIM) того чи іншого підприємства.

У зв'язку з цим здається вельми дивним той факт, що дигіталізація не дійшла до визначення міцності бетону при проведенні будівельних робіт. Це особливо дивно з урахуванням абсолютно очевидного чинника масштабності цього процесу, з комерційної точки зору, коли кожен раз, заливаючи свіжий бетон, необхідно визначати його міцність, викликаючи фахівців з сертифікованих лабораторій, які відбирають зразки і проводять їх випробування на пресі.

Виконано дослідження існуючих засобів контролю стану бетону, які ґрунтуються на виключно відкритих друкованих джерелах і знанні фізичних принципів, що стоять за кожним з існуючих методів визначення міцності бетону, задля розробки мультипараметричної апаратури. Виконано аналіз методів та апаратури для контролю та передбачення міцності бетону. Пропонуються шляхи комбінування методів для забезпечення надійності результатів.

Ключові слова: бетон, методи контролю, температура, ультразвук, електропровідність, міцність.

Анотація. В сучасному світі спостерігається стрімкий розвиток цифралізація багатьох процесів навколо нас, починаючи від різних фінансових послуг, покупок в інтернеті, оформлення документів і т.д. Для промисловості вже не є новинкою так званий підхід Industry 4.0, коли для оптимізації і удосконалення тих чи інших виробничих процесів проводиться скрозний моніторинг необхідних параметрів, що складають основу для Business Information Model (BIM) того чи іншого підприємства.

В цій зв'язі здається дуже дивним той факт, що цифралізація не дійшла до визначення міцності бетону при проведенні будівельних робіт. Це особливо дивно з урахуванням повністю очевидного фактора масштабності цього процесу, з комерційної точки зору, коли кожен раз, заливаючи свіжий бетон, необхідно визначати його міцність, викликаючи спеціалістів з сертифікованих лабораторій, відбираючих зразки і проводячих їх випробування на пресі.

Виконані дослідження існуючих засобів контролю стану бетону, заснованих на відкритих публічних джерелах і знанні фізичних принципів, що лежать в основі кожного з існуючих методів визначення міцності бетону, для розробки мультипараметричної апаратури. Проведено аналіз методів і апаратури для контролю і прогнозування міцності бетону. Пропонуються шляхи комбінування способів для забезпечення надійності результатів.

Ключевые слова: бетон, методы контроля, температура, ультразвук, электропроводность, прочность.

Summary. *In today's world there is a rapid digitalization of many processes around us, ranging from various financial services, online shopping, paperwork, etc. The so-called Industry 4.0 approach is no longer a novelty in the industry, when to optimize and improve certain production processes, the necessary parameters that form the basis for the Business Information Model (BIM) of an enterprise are thoroughly monitored.*

In this regard, it seems very strange the fact that digitalization has not come to determine the strength of concrete during construction works. This is especially surprising given the absolutely obvious factor of scalability of this process, from a commercial point of view, when every time pouring fresh concrete, it is necessary to determine its strength, calling specialists from certified laboratories who take samples and test them in the press.

Objective is to study the existing means of monitoring the condition of concrete, based on exclusively open printed sources and knowledge of the physical principles behind each of the existing methods for determining the strength of concrete, for the development of multiparameter equipment. The analysis of methods and equipment for control and prediction of concrete strength is performed. Ways of combining methods to ensure the reliability of the results are proposed.

Key words: *concrete, control methods, temperature, ultrasound, electrical conductivity, strength.*

Увійшовши в інтернет, і зробивши пошук за висловом "sensor for concrete monitoring", ми знаходимо сотні посилань. В рамках даного огляду ми обмежилися найбільш поширеними 25 посиланнями, які, на нашу думку, є достатніми для формування загальної картини проблеми в цілому.

Спробуємо систематизувати ці посилання як по фізичним принципам роботи сенсорики, так і по їх комерційній доступності.

1. Отже, абсолютним чемпіоном є так званий метод "Maturity".

Саме про цей метод оцінки міцності бетону заявляють більше половини в усіх вищезазначених посиланнях.

Пропонуємо вашій увазі два сайти, де можна придбати ці датчики вже сьогодні [1; 2].

На чому побудований цей метод?

З фізичної точки зору, це є температурно-часова суперпозиція (ТЧС), яка корельована на реально отриману міцність бетону, виміряну на пресі. Або говорячи мовою ІТ галузі, необхідно створити look up table (LUT), що зв'язує інтеграл ТЧС від міцності, помістити все це на хмару та відправляти числові дані в реальному режимі часу, порівняти з LUT і інформувати будівельника про міцність бетону.

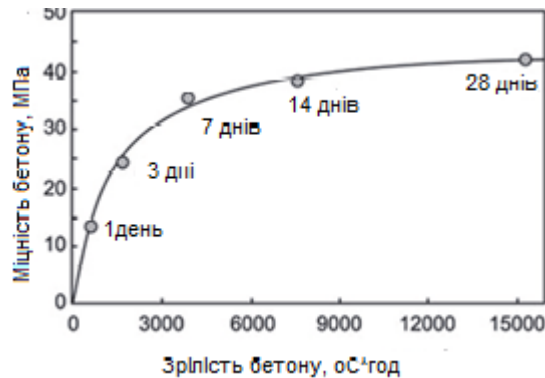


Рис. 1. Типова залежність міцності на стиск від зрілості

В зв'язку з тим, що бетон є надзвичайно неоднорідним середовищем і в ньому завжди присутні різні інгредієнти (цемент, пісок, щебінь, вода, добавки), зазвичай в різних співвідношеннях, різного складу і походження. Помножимо це на різні способи змішування і кліматичні умови на будівельному об'єкті в період застигання бетону, і нам стане зрозуміло, що кожен склад бетону вимагає так званого градування.

Іншими словами, спочатку необхідно розробити склад бетону, знайти для нього унікальний LUT, і поки ми використовуємо саме цей склад, то можна користуватися цим методом. Разом з тим, абсолютно очевидно, що з комерційної точки зору це або не реально, або дуже не просто.

Навіть якщо вертикально інтегрована компанія (ВІНК), що володіє як заводами з приготування готових бетонних сумішей, так і автопарком міксерів та навіть будівельними об'єктами, розробила бетонну рецептуру, то не зовсім зрозуміло, як можна гарантувати, що ця рецептура залишається без змін протягом скільки-небудь тривалого періоду часу і відповідно метод "Maturity" дає правильний результат щодо міцності бетону.

Наприклад, щебінку почали привозити з іншого кар'єру, пройшов дощ і цемент та/або пісок, що зберігаються на змішувальній ділянці, адсорбував вологу, авто міксер віз готову суміш до будівельного майданчика швидше звичайного, датчик "Maturity" був розміщений на південній стороні будівельного об'єкта, де ТЧС могла істотно відрізнитися від інших елементів будівлі.

У підсумку, цей метод, хоча і є на сьогоднішній день, найбільш популярним і доступним, проте не може бути комерціалізованим з необхідним чинником масштабності, з огляду на те, що вимагає, насамперед, попереднього градування.

2. Вологість (Humidity).

Цей метод заявлений багатьма виробниками, включаючи тих, хто комерціалізує і метод "Maturity", наприклад [3; 4].

Разом з тим, всі, без винятку, виробники цього типу датчиків, комерціалізують їх для того, щоб будівельнику було зрозуміло, коли можна починати заливку підлоги декоративними покриттями (flooring). Навіщо це потрібно?

Справа в тому, що якщо бетон не досяг певного значення вмісту вологи в ньому, то якщо залити його декоративним покриттям, можуть виникнути відшарування, утворення пухирів і інші візуальні дефекти, які вимагають їх подальшого усунення.

На жаль, даний метод не знайшов свого застосування з метою визначення міцності бетону.

3. Електропровідність (conductivity), наприклад [5].

З технічної точки зору цей метод дійсно не складно реалізувати.

Декілька електродів, поєднаних з відповідною електронікою безумовно буде видавати якісь дані, які можна відправляти в хмару.

Однак, також, як і в випадку з методом "Maturity", даний метод потребує градуювання.

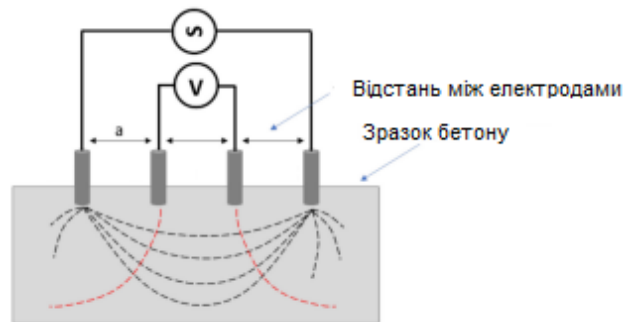


Рис. 2. Схема вимірювання електропровідності

Декілька електродів, поєднаних з відповідною електронікою безумовно буде видавати якісь дані, які можна відправляти в хмару.

Однак, також, як і в випадку з методом "Maturity", даний метод потребує градуювання.

Звідси, широке комерційне використання методу також вельми сумнівно, хоча він може успішно конкурувати з іншим методом, який буде розглянутий нижче.

4. Ультразвук (ultrasound).

На відміну від усіх вищезазначених методів, цей метод має явну перевагу.

Справа в тому, що існує формула, яка зв'язує швидкість поширення звуку в твердому тілі з його пружними властивостями (модулем Юнга),

$$E = \frac{\rho(1+\mu)(1-2\mu)V^2}{1-\mu} \quad (1)$$

де: E -модуль Юнга; ρ -густина речовини; μ -коефіцієнт Пуассона; V -швидкість ультразвуку в речовині.

В свою чергу модуль Юнга пов'язаний з міцністю бетону, емпіричними залежностями, описаними в різних галузевих стандартах (наприклад Eurocode 2):

$$E_c = 22 \left(\frac{f_c}{10} \right)^{0,3} \quad (2),$$

де: E_c - модуль Юнга, емпірично пов'язаний з міцністю бетону на стискання f_c .

Однак, і в цьому випадку ми стикаємося з низкою фізичних і комерційних проблем.

По-перше, зв'язок між швидкістю звуку та його модулем пружності аналітично відповідає однорідним середовищам, на жаль ми вже згадували, що бетон за своєю природою дуже неоднорідний.

По-друге, зв'язок між модулем Юнга і міцністю бетону на стискання (f_c) є емпіричним і відрізняється в різних галузевих стандартах [6].

По-третє, зв'язок швидкості поширення ультразвуку, навіть в однорідному середовищі, пов'язаний з модулем пружності з урахуванням коефіцієнта Пуассона та густини матеріалу, а це знову залежить від рецептури бетонної суміші. Іншими словами, мова знову йде про необхідність попереднього градування, яка обмежує широке використання цього методу в будівництві.

І нарешті, датчики й устаткування для точного вимірювання швидкості поширення звуку досить дорогі на сьогодні.

У всякому разі, істотно дорожче звичайної термопари для Maturity та/або пари електродів для електропровідності.

Тому, пошук ультразвукових рішень в інтернеті приводить нас до комерційно доступних, швидше придатних для дослідницької діяльності, таких як [7; 8], та/або для оцінки міцності бетону з використанням

переносного обладнання. Особливо приємно те, що є приклад, коли українська компанія виготовляє даний тип обладнання за цілком конкурентною ціною [9].



Рис. 3. Прилад для вимірювання ультразвуковим методом

Відзначимо знову, що метод електропровідності, наприклад компанії Concretec безумовно може конкурувати з ультразвуковими рішеннями таких фірм як Ultratest і Schleibinger, проте це приклад застосування методів для досліджень, а не для реальних будівельних об'єктів.

5. Електромеханічний імпеданс (ЕМІ).

Хоча даний метод був описаний вже більше 15 років тому, на сьогоднішній день вдалося знайти лише одну компанію, яка пропонує апаратуру, яка заснована на цьому принципі [10], і ще одну університетську групу проф. Лу, які теж намагаються комерціалізувати це метод [11].

Про що, власне, йдеться з фізичної точки зору?

Якщо пластинку з п'єзоелектричного матеріалу, наприклад добре відомого ЦТС, занурити в бетонну суміш, відразу ж після її приготування, то виникає наступна ситуація.

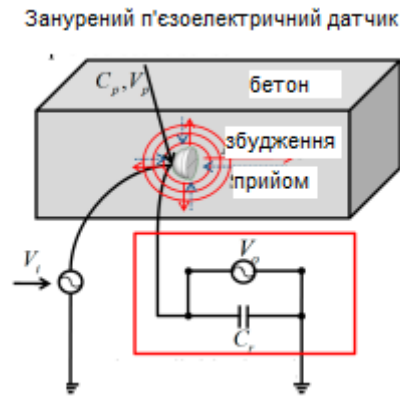


Рис. 4. Схема вимірювання електромеханічного імпедансу

Бетон при застиганні буде чинити певний механічний вплив на такий датчик, який, в свою чергу, буде генерувати електричний сигнал, що змінюється в залежності від стану бетону. Іншими словами, якщо приєднати до даного датчика прилад для визначення електричного імпедансу, що збуджує датчик змінним струмом у відповідному частотному діапазоні, то динамічний електромеханічний відгук п'єзоелектричного перетворювача можна аналізувати і пов'язувати з міцністю бетону.

Детальніше можна ознайомитися з цим методом, наприклад, тут [12-14].

Спробуємо розібратися з перспективами застосування цього методу для визначення міцності бетону.

По-перше, п'єзоелектричні матеріали на основі свинцю, як ЦТС, досить проблематичні з точки зору європейських директив ROHS і WEEE відповідно, це особливо важливо для України, з точки зору інтеграції в загальноєвропейські процеси. Тому, слід було б розглянути можливість застосування п'єзоелектричних матеріалів, які не містять свинець в якості датчиків для ЕМІ методу. В Україні є досвід у створенні таких матеріалів (наприклад, натрій-вісмутовий титанат), які можна порівняти за характеристиками з ЦТС.

По-друге, поки що не зовсім зрозуміло, наскільки можливо виготовити аналізатор імпедансу в дешевому і надійному виконанні. Стаціонарні прилади для вимірювання імпедансу зовсім не дешеві. Тому варто більш детально розібратися в цьому питанні.

По-третє, виникає все те ж питання про градування. Тобто припустимо, що ми змогли розробити метод на основі п'єзоелектричної кераміки, яка не містить свинцю, з дешевим приладом для вимірювання імпедансу. А чи буде цей метод універсальним, незалежно від рецепту бетонної суміші або ж знову ми зіткнемося з тим же, що і у випадку з методом Maturity .

6. Молоток Шмідта (Rebound Hammer).

Молоток Шмідта, який отримав у вітчизняних фахівців назву «склерометр», є приладом для вимірювання міцності за принципом пружного відскоку. Він був розроблений в середині минулого століття швейцарським інженером, на честь якого і був названий. Саме цей пристрій вперше надало можливість визначити міцність бетону безпосередньо на об'єкті будівництва.



Рис. 5. Склерометр

Дія методу ґрунтується на вимірі твердості бетонної поверхні. До бетону притискається спеціальний штамп, по якому наносяться удари молотком. Після цього система пружин забезпечує вільний відскік

ударника. А величина цього відскоку, яка вимірюється є непрямою характеристикою міцності матеріалу.

В Україні даний прилад теж доступний і за цілком прийнятною ціною [15].

На жаль, ми знову стикаємося з проблемою градування [16-18]

7. Акустичний метод.

Ось компанія, у якої можна придбати даний прилад [19].

Дивно, що цей метод навіть вдалося запатентувати [20], хоча, з фізичної точки зору, досить очевидний зв'язок резонансної частоти об'єкта і його пружних властивостей. Разом з тим сам виробник пише про свій прилад [21-22]:

«Спостерігалася кореляція між середніми значеннями за проектом для випробувань на стискання і випробувань Strike-it, особливо коли властивості матеріалів враховувалися в алгоритмі оцінки міцності Strike-it. Значення R-квадрата 0,7117 і стандартне відхилення 4,43 МПа було отримано, коли в алгоритмі Strike-it враховувалася тільки частота. Результати були значно кращими при використанні багатофакторного підходу. Рішення нейронної мережі з використанням резонансної частоти, щільності, поглинання і ваги в якості вхідних даних привело до моделі прогнозування міцності зі значенням R-квадрат 0,9445 і стандартним відхиленням 2,07 МПа. Цей результат є чудовим, враховуючи притаманну варіативність випробувань на стискання. Це рішення ідеально підходить для використання в тестових проектах, де вимірюються густина і поглинання. Також було представлено багатообіцяюче альтернативне рішення для нейронної мережі, в якій використовується інформація, яка доступна на момент виконання тесту Strike-it: значення R-квадрат склало 0,879, а стандартне відхилення - 2,78 МПа».

Іншими словами, знову потрібна градувальна залежність, як і в згаданих вище методах.

Проаналізувавши 7 комерційно доступних методів, ми приходимо до того, що або ці методи не підходять для оцінки міцності бетону в реальному режимі часу, або вони підходять, однак вимагають градування для кожної окремо взятої рецептури бетону, що обмежує ці підходи для їх широкого застосування в будівництві.

Висновки. На цьому автори статті хотіли було вже закінчувати свій огляд, як раптом згадали філософську фразу - "Майбутнє знаходиться в дуже маленькій концентрації вже в цьому, варто лише бути здатним виявити ці слідові кількості".

І ми вважаємо, що змогли це зробити.

Справа в тому, що всі без винятку фірми, які комерціалізують свої рішення, використовують один з методів, Maturity, електропровідність, ультразвук і т.д.

А чи можливо, що комбінація методів дасть кращий результат?

Ми знайшли лише одну зачіпку, але вона може пролити світло на те, як потрібно вирішувати цю задачу в недалекому майбутньому.

На початку 60 років минулого століття був запропонований метод SonReb, за своєю суттю, який поєднує в собі метод ультразвуку і молотка Шмідта [23-26].

Що ми спостерігаємо?

По суті, мова йде про те, що комбінація двох методів, дає кращий результат, ніж кожен з них окремо.

Вельми тривіальний висновок, проте дивним чином, на сьогоднішній день нами не знайдено жодного комерційно доступного датчика міцності бетону, що працює одночасно на комбінації декількох методів !

Звідси ми хочемо підсумувати наш огляд.

Знання міцності бетону в кожен конкретний момент часу є цінною інформацією для будівельної галузі.

Це дозволяє більш точно і правильно управляти процесами і, по суті, формувати Business Information Model (BIM) без якої неможливо вступити в еру Industry 4.0.

Разом з тим рішення для визначення міцності в реальному режимі часу не дозволяють робити це масштабно і повсюдно і, в першу чергу, через відсутність універсальності і необхідності проводити градування для кожної рецептури бетону.

Ми вважаємо, що головним вектором у розвитку розробки та створення датчиків для оцінки міцності бетону в реальному режимі часу, повинні стати датчики, що поєднують в собі не один, а кілька принципів одночасно. Такий підхід, можливо, забезпечить створення і комерціалізацію пристроїв, зручних в експлуатації і в першу чергу не потребують градування для кожної рецептури бетону.

Найбільш перспективними, на наш погляд, для комбінації ми вважаємо наступні методи (послідовність не відображає важливості методу) - температура, вологість, електропровідність, електромеханічний імпеданс, ультразвук, резонансна частота і інші.

Мультипараметрична суперпозиція вищевказаних методів найімовірніше дозволить створити універсальні методи визначення міцності бетону в реальному режимі часу.

ІТ галузь в Україні, з її багатими традиціями і висококваліфікованими кадрами, може кинути виклик цій, хоч і не простій, але цілком реальній задачі.

Методи математичного моделювання, засновані на принципах Big Data, Deep Learning and Artificial Intelligence будуть надійною підмогою для датчиків, заснованих на комбінації вищезазначених фізичних принципів.

Література

1. Concrete sensors. URL: <https://www.hilti.com/content/hilti/W1/US/en/services/tool-services/internet-of-things/concrete-sensors.html>. (дата звернення: 15.09.2021).
2. URL: <https://www.commandcenterconcrete.com/pricing/> (дата звернення: 20.09.2021).
3. Rapid RH® and Concrete Moisture Products. URL: <https://www.wagnermeters.com/product-category/rapid-rh-and-concrete/> (дата звернення: 16.09.2021).
4. Humidity Monitoring. Real-Time Monitoring of Relative Humidity and Temperature in Concrete. URL: <https://maturix.com/solution/humidity-monitoring/> (дата звернення: 17.09.2021).
5. Contest-8 scientific background and equipment. URL: <http://concretec.biz/scientific-background.html> (дата звернення: 14.09.2021).
6. Influence of Selected Factors on the Relationship between the Dynamic Elastic Modulus and Compressive Strength of Concrete. Krystian Jurowski and Stefania Grzeszczyk. *Materials*, 2018. Vol. 11. P. 477. DOI: 10.3390/ma11040477. URL: https://mdpi-res.com/d_attachment/materials/materials-11-00477/article_deploy/materials-11-00477-v2.pdf (дата звернення: 21.09.2021).
7. IP-8 Ultrasonic Measuring System for Precise Measurement of Setting Processes. URL: <https://www.ultratec.de/produkte-leistungen/ip-8-messsystem/> (дата звернення: 10.09.2021).
8. Ultrasonic Setting Measurement. URL: http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Setting_and_Maturity:Ultrasonic_Setting_Measurement (дата звернення: 20.09.2021).

9. Измеритель прочности строительных материалов ИПСМ. URL: <https://novotest.ua/katalog-priborov/izmeritel-prochnosti-stroitelnykh-materialov-ipism.html> (дата звернення: 09.09.2021).
10. Canada's Device for Scanning Concrete Quality and Strength in Real-Time. URL: <https://concretemri-can.com/product/> (дата звернення: 10.09.2021).
11. In situ concrete maturity sensors save construction time, money. URL: <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues/magazine-issue/article/2021/04/in-situ-concrete-maturity-sensors-save-construction-time-money> (дата звернення: 11.09.2021).
12. Nondestructive Concrete Strength Estimation based on ElectroMechanical Impedance with Artificial Neural Network. Tae-Keun Oh, Junkyeong Kim, Changgil Lee, Seunghee Park. Journal of Advanced Concrete Technology, 2017. Vol 15. P. 94-102. DOI: 10.3151/jact.15.94. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/15/3/15_94/_pdf/-char/en (дата звернення: 21.09.2021).
13. Embeddable Piezoelectric Sensors for Strength Gain Monitoring of Cementitious Materials: The Influence of Coating Materials. Yen-Fang Su, Guangshuai Han, Zhihao Kong, Tommy Nantung and Na Lu. *Engineered Science*, 2020. Vol 11. P. 66-75. DOI: 10.30919/es8d1114. URL: https://www.espublisher.com/uploads/article_pdf/es8d1114.pdf (дата звернення: 20.09.2021).
14. Real-Time Strength Monitoring for Concrete Structures Using EMI Technique Incorporating with Fuzzy Logic. Sang-Ki Choi, Najeebullah Tareen, Junkyeong Kim, Seunghee Park and Innjoon Park. *Appl. Sci.* 2018. Vol. 8. P. 75-87. DOI: 10.3390/app8010075. URL: https://www.researchgate.net/publication/322318693_Real-Time_Strength_Monitoring_for_Concrete_Structures_Using_EMI_Technique_Incorporating_with_Fuzzy_Logic/fulltext/5a5421820f7e9bbc105a080

d/Real-Time-Strength-Monitoring-for-Concrete-Structures-Using-EMI-Technique-Incorporating-with-Fuzzy-Logic.pdf?origin=publication_detail (дата звернення: 21.09.2021).

15. Молоток Шмидта (склерометр) МШ-225. URL: <https://novotest.ua/katalog-priborov/molotok-shmidta-sklerometr-msh-225.html> (дата звернення: 22.09.2021).
16. H-2987 Concrete Rebound Hammer. URL: https://www.humboldtmg.com/manuals/H-2987_man_1213.pdf (дата звернення: 21.09.2021).
17. Characteristic Curve and Its Use in Determining the Compressive Strength of Concrete by the Rebound Hammer Test. Dalibor Kocáb, Petr Misák and Petr Cikrle. *Materials*, 2019. Vol. 12. P. 2705-2721. DOI: 10.3390/ma12172705. URL: https://mdpi-res.com/d_attachment/materials/materials-12-02705/article_deploy/materials-12-02705-v2.pdf (дата звернення: 20.09.2021).
18. Calibration and Reliability of the Rebound (Schmidt) Hammer Test. Antonio Brencich, Giancarlo Cassini, Davide Pera, Giuseppe Riotto. *Civil Engineering and Architecture*, 2013. Vol. 1(3). P. 66-78. DOI: 10.13189/cea.2013.010303. URL: <https://www.hrpub.org/download/201310/cea.2013.010303.pdf> (дата звернення: 10.09.2021).
19. The next generation of Concrete Strength Testing. URL: <https://soundqa.com/about/> (дата звернення: 12.09.2021).
20. Method and apparatus for non-destructive measurement of modulus of elasticity and/or the compressive strength of masonry samples. Cox, et al.. URL: https://uspto.report/patent/grant/10,648,952?__cf_chl_jschl_tk__=pmd_zam5OtM53ltdbsw0WdC5WPJFcx0lysAvY8M.bv0hY-1630688410-0-gqNtZGzNAiWjcnBszQgR (дата звернення: 15.09.2021).

21. Calibration of Strike-it Strength Estimation. URL: https://drive.google.com/file/d/1sWNVZBKXbgYgrrsKWvXRaBA_atKonEwq/view?usp=sharing (дата звернення: 18.09.2021).
22. Preliminary results in evaluation of a new non-destructive method for estimating the compressive strength of concrete masonry using acoustics. Cox, Neil; Huttemann, Nicholas and Cox, Spencer. 14th Canadian Masonry Symposium, Montreal, Canada, may 16th – may 20th, 2021. URL: <https://drive.google.com/file/d/1hWTB5cK6RhygCNdwmWN1CGDgx7yuHDYt/view?usp=drivesdk> (дата звернення: 16.09.2021).
23. Assessment of the concrete compressive strength using non-destructive methods. Costel Chingălată, Mihai Budescu, Radu Lupășteanu, Vlad Lupășteanu and Maria-Cristina Scutaru. *Buletinul institutului politehnic din Iași*. Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Volumul 63 (67), Numărul 2, 2017. Secția Construcții. Arhitectură. P. 43-56. URL: <http://www.bipcons.ce.tuiasi.ro/Archive/596.pdf> (дата звернення: 21.09.2021).
24. Parametric Regression Model and ANN (Artificial Neural Network) Approach in Predicting Concrete Compressive Strength by SonReb Method. Lucio Nobile and Mario Bonagura. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, August 2016. Vol. 5, No. 3. P. 183-186. URL: <http://www.ijscer.com/uploadfile/2016/0629/20160629041335502.pdf> (дата звернення: 20.09.2021).
25. Accuracy in predicting the compressive strength of concrete using sonreb method. Costel Chingălată, Mihai Budescu and Radu Lupășteanu. *Buletinul institutului politehnic din Iași*. Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, 2017. Secția Construcții. Arhitectură. Volumul 63 (67), Numărul 3. P. 97-106. URL: <http://www.bipcons.ce.tuiasi.ro/Archive/610.pdf> (дата звернення: 17.09.2021).

26. In-situ Concrete Strength Assessment based on Ultrasonic (UPV), Rebound, Cores and the SONREB Method. Frank Papworth, David Corbett, Reuben Barnes, Joseph Wyche and Jonathon Dyson. Conference Paper · August 2015. DOI: 10.1201/b18972-37. URL: https://www.researchgate.net/profile/Jonathon-Dyson/publication/284723035_In-situ_Concrete_Strength_Assessment_based_on_Ultrasonic_UPV_Rebound_Cores_and_the_SONREB_Method/links/56577fda08aeafc2aac106ef/In-situ-Concrete-Strength-Assessment-based-on-Ultrasonic-UPV-Rebound-Cores-and-the-SONREB-Method.pdf (дата звернення: 18.09.2021).