

DOI 10.15826/rjctst.2024.1.002

УДК 69.058

*А. Х. Байбурин*¹, *С. Г. Акимов*², *Д. А. Байбурин*³

^{1,2,3} Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

e-mail: ¹ abayburin@mail.com, ² akimov08@mail.com, ³ dbayburin@mail.com

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-7432-5671>, ³ <https://orcid.org/0000-0002-5347-0001>

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

Аннотация: В статье приведены результаты сравнительных испытаний прочности бетона неразрушающими методами упругого отскока, ударного импульса и ультразвукового прозвучивания. Методы определения прочности соответствовали стандартным, описанным в ГОСТ и паспортах на приборы. Точность неразрушающих методов определялась по сравнению с разрушающими испытаниями образцов бетона на гидравлическом прессе. Было изготовлено 5 серий по 6 контрольных образцов-кубов тяжелого бетона класса В25. По результатам испытаний были построены доверительные интервалы средней прочности бетона. Предложен комбинированный метод в виде пересечения доверительных интервалов по двум наиболее точным методам упругого отскока и ультразвукового зондирования. Наложением пересечения интервалов на эталонный доверительный интервал прессовых испытаний определены статистические характеристики результатов испытаний: смещение среднего значения, разброс и доверительная вероятность комбинированного интервала прочности.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, свойства материала, прочность бетона, неразрушающие методы испытаний.

Для цитирования: *Байбурин А. Х., Акимов С. Г., Байбурин Д. А.* Анализ точности неразрушающих методов контроля прочности бетона // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2024. – Т. 10. – №1. – 1001002. – DOI 10.15826/rjctst.2024.1.002.

*A. H. Baiburin*¹, *S. G. Akimov*², *D. A. Baiburin*³

^{1,2,3} South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia

e-mail: ¹ abayburin@mail.com, ² akimov08@mail.com, ³ dbayburin@mail.com

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-7432-5671>, ³ <https://orcid.org/0000-0002-5347-0001>

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF NON-DESTRUCTIVE METHODS OF CONCRETE STRENGTH CONTROL

Abstract: The results of comparative tests of concrete strength by non-destructive methods of elastic rebound, impact pulse and ultrasonic sounding are presented. The testing strength methods corresponded to the standard ones described in state standards and standards for devices. The accuracy of non-destructive methods was determined by comparison with destructive tests of concrete samples on a hydraulic press. 5 series of 6 control samples cubes of heavy concrete of class B25 were produced. Based on the test results the confidence intervals of the average concrete strength were constructed. A combined method is proposed in the form of the confidence intervals intersection using two of the most accurate methods of elastic rebound and ultrasonic sounding. By superimposing the intervals intersection on the reference confidence interval of the press tests, the statistical characteristics of the test results were de-

terminated: the average offset value, the spread and the confidence probability of the combined strength interval.

Key words: reinforced concrete structures, material properties, concrete strength, non-destructive testing methods.

For citation: Baiburin A. H., Akimov S. G., Baiburin D. A. (2024) Analysis of the accuracy of non-destructive methods of concrete strength control. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 10(1). 1001002. (In Russ.) DOI 10.15826/rjct.2024.1.002.

1. Введение

Неразрушающие методы контроля прочности бетона разделяют на прямые и косвенные. Прямые методы отрыва, отрыва со скалыванием и скалывания ребра довольно трудоемки. Косвенные методы ударного импульса, упругого отскока, пластической деформации и ультразвуковой метод требуют построения градуировочной зависимости, что при обследовании зданий не всегда возможно. Применение косвенных методов без их градуировки целесообразно для выявления зон неоднородности прочности бетона и качественной оценки прочности. Для этого чаще всего рекомендуют использовать ультразвуковой метод, методы ударного импульса и упругого отскока, и их сочетания [1, 2]. Ультразвуковой метод удобен для неровных поверхностей, тонких швов, а также для увлажненных или промасленных поверхностей, которые вносят значительную погрешность в определение прочности бетона другими неразрушающими методами [3, 4]. Однако при этом следует учесть, что при использовании поверхностного прозвучивания толщина слоя бетона, влияющего на распространение волны, составляет 3–4 см, а свойства бетона в зоне пластических деформаций ограничиваются примерно двойным радиусом отпечатка индентора 6–10 мм [5].

Комбинированные методы контроля прочности позволяют уменьшить погрешность [5, 6] за счет аддитивного объединения оценок с весовыми коэффициентами, обратно пропорциональными дисперсиям. Подобные подходы

с использованием простой и множественной регрессии предлагаются в зарубежной практике [7, 8]. Разработан также графический количественно-качественный метод контроля прочности бетона [9]. Известны исследования комбинации ультразвукового метода и ударного импульса [1, 2], ультразвукового метода и температурных моделей прогнозирования прочности бетона [10], сочетаний электромагнитных методов и ультразвукового контроля [11], метода упругого отскока и скорости ультразвукового импульса [12], сочетания неразрушающих методов с определением прочности бетона в ядре конструкции разрушающим методом [7].

Перспективно комбинирование методов неразрушающего контроля, некоторые из которых в основном чувствительны к механическим свойствам, а другие к содержанию в бетоне влаги, которая благоприятствует проникновению агрессивных веществ и развитию неблагоприятных внутренних реакций, влияющих на долговечность. К последним относят электрическое сопротивление, радиолокационный метод (GPR), ультразвуковые поверхностные волны и емкостной метод [11]. Диэлектрический метод, метод ядерного магнитного резонанса, ультразвуковые методы подходят для непрерывного измерения схватывания и твердения строительных растворов и бетонов [13–15].

Таким образом, исследование точности неразрушающих методов контроля прочности бетона актуально, как с точки зрения влияющих факторов, так и с целью разработки комбинированных методов, позволяющих компенсировать

влияние ошибок метода, состояния поверхности и изменения физико-механических свойств контролируемого бетона. Среди влияющих факторов следует отметить модуль упругости, динамическую вязкость, структурную неоднородность, состав бетон, температуру, влажность.

2. Методы исследования

При проведении испытаний применялись неразрушающие методы, которые сравнивались с контрольными разрушающими испытаниями. Примененные методы соответствовали требованиям государственных стандартов и руководств по эксплуатации приборов.

Основные характеристики измерительных средств и номер стандарта на метод испытаний представлены в табл. 1. Используемые средства имели свидетельства о поверке на момент проведения испытаний.

Методика разработки комбинированного метода определения прочности бетона неразрушающими методами включала:

- изготовление 5 серий по 6 контрольных образцов-кубов ребром 100 мм, класс тяжелого бетона В25;
- определение прочности бетона на сжатие ультразвуковым методом, двумя приборами ударного импульса, методом упругого отскока, а также испытания образцов до разрушения на испытательной машине WAW-600 kN;
- определение значений средней прочности, среднеквадратичного отклонения, коэффициента вариации и класса бетона (в серии и по пяти сериям);
- определение 95-ти процентных доверительных интервалов прочности для каждого метода;
- обоснование комбинированного метода неразрушающего контроля прочности, который обеспечивает результаты, максимально приближенные к опре-

деленным разрушающим испытаниям с учетом доверительной вероятности.

3. Результаты сравнительных испытаний

На рис. 1 представлены усредненные результаты определения прочности бетона по 5 сериям различными методами, описанными в табл. 1.

Как видим, приборы ударного импульса ИПС-МГ-4.03 и ОНИКС-2.5 показали несколько завышенные значения прочности по сравнению с испытаниями на гидравлическом прессе. Разброс значений прочности для косвенных неразрушающих и прямого прессового метода примерно одинаков: наблюдаемая вариация прочности изменялась от 5,2 до 8,7 %.

Сравнение прочности бетона на сжатие, усредненной по пяти сериям образцов, приведено на рис. 2. Наиболее близкие значения к эталонным разрушающим испытаниям показали ультразвуковой метод (Пульсар-1.2) и метод упругого отскока (молоток Шмидта).

Сравнение классов бетона на сжатие, усредненной по пяти сериям образцов, качественно повторяет график на рис. 2, так как вариации прочности для различных методов оказались примерно одинаковыми. Класс бетона по прессовым испытаниям – 22,3 МПа, ультразвуковым методом (Пульсар-1.2) – 23,9 МПа, методом упругого отскока (молоток Шмидта) – 24,5 МПа.

Далее были рассчитаны доверительные интервалы средней прочности и класса бетона на уровне доверительной вероятности 0,95. Графики доверительных интервалов средней прочности приведены на рис. 3. Пересечения доверительных интервалов ультразвукового метода (Пульсар-1.2) и метода упругого отскока (молоток Шмидта) дают наиболее близкое приближение к эталонным испытаниям на гидравлическом прессе.

Таблица 1

Основные измерительные средства для исследования

Метод контроля прочности, ГОСТ	Основное и вспомогательное оборудование		
	Наименование, марка прибора	Погрешность по паспорту	Предел измерений
Ударного импульса ГОСТ 22690-2015	Измеритель прочности бетона электронный ИПС-МГ4.03	± 8%	3–100 МПа
Ударного импульса ГОСТ 22690-2015	Электронный склерометр ОНИКС-2.5	± 8%	1–100 МПа
Упругого отскока ГОСТ 22690-2015	Молоток для испытаний бетона SilverSchmidt PC N	–	10–100 Н/мм ²
Ультразвуковой метод ГОСТ 17624-2021	Прибор ультразвуковой Пульсар-1.2	± (0,01 · V + 10)	5–100 МПа
Разрушающий ГОСТ 28570-2019	Гидравлическая испытательная машина WAW-600 kN	± 1%	До 600 кН

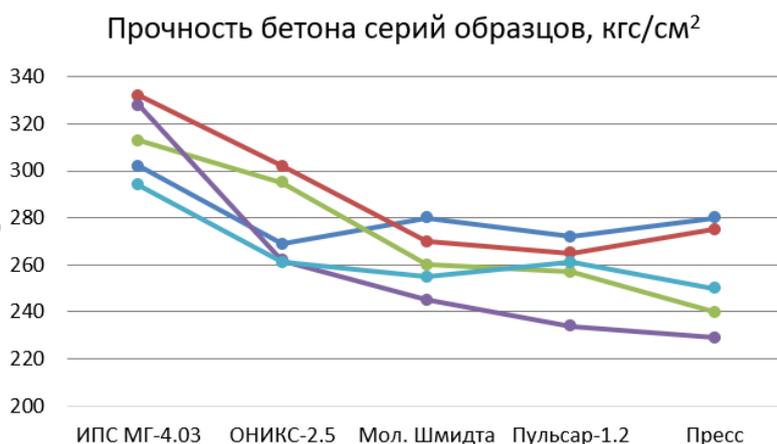


Рис. 1. Результаты испытаний прочности бетона различными методами (рисунок авторов)

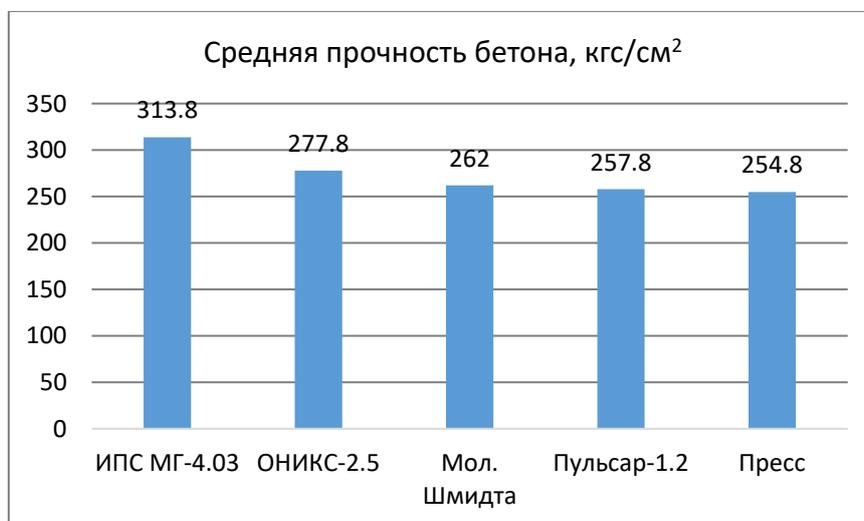


Рис. 2. Сравнение средней прочности бетона на сжатие (рисунок авторов)

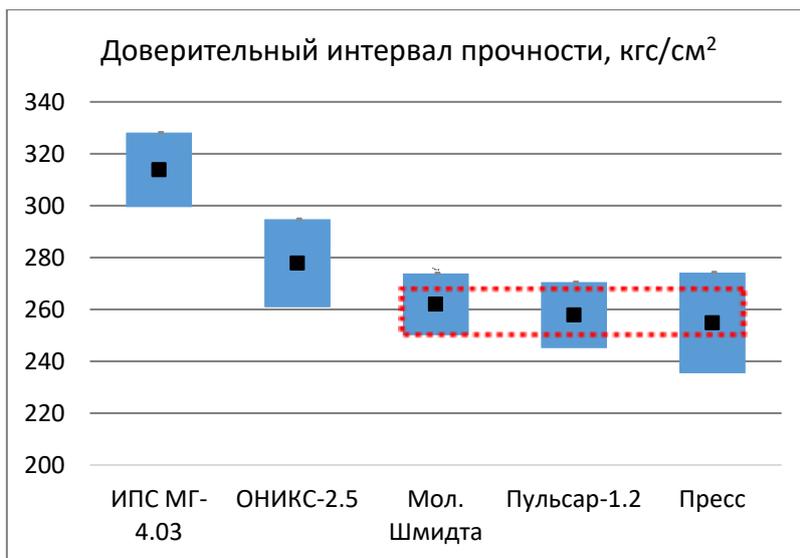


Рис. 3. Сравнение доверительных интервалов прочности бетона на сжатие (рисунок авторов)

4. Комбинированный метод

Доверительный интервал среднего значения прочности бетона для метода неразрушающего контроля на уровне доверия 0,95 находится по формуле:

$$\bar{R} - \frac{t_{\alpha v} \cdot S_R}{\sqrt{n}} \leq R \leq \bar{R} + \frac{t_{\alpha v} \cdot S_R}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

где $t_{\alpha v}$ – квантиль t -распределения уровня доверия α и степени свободы $v = n - 1$ (при большом числе измерений $t_{0,95} = 1,645$ при 10 измерениях $t_{0,95} = 1,833$);

S_R – стандартное отклонение прочности; n – количество измерений.

Квантиль определяется из соотношения $2\Phi(t) = \alpha$, где $\Phi(t)$ – табулированная функция стандартного нормального распределения (функция Лапласа). Выражение, задающее доверительный интервал, называют ошибкой среднего:

$$\varepsilon = \frac{t_{\alpha v} \cdot S_R}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Наиболее вероятное значение прочности будет находиться на пересечении доверительных интервалов двух методов неразрушающего контроля:

$$[\bar{R}_1 - \varepsilon_1; \bar{R}_1 + \varepsilon_1] \cap [\bar{R}_2 - \varepsilon_2; \bar{R}_2 + \varepsilon_2] \quad (3)$$

Наложением пересечения интервалов на доверительный интервал прессовых испытаний могут быть определены такие статистические характеристики результатов испытаний, как смещение среднего значения, разброс и доверительная вероятность комбинированного интервала прочности. Итоговый интервал $[R_{min}; R_{max}]$ будет пересечением интервала (3) с доверительным интервалом разрушающих испытаний, как это видно на рис. 3. При этом среднее значение интервала может быть смещено относительно средней прочности разрушающих испытаний на гидравлическом прессе. В этом случае оценка прочности комбинированным методом может характеризоваться смещением среднего значения по сравнению с эталонными прессовыми испытаниями:

$$\bar{R}_c = \bar{R} - \Delta R \quad (4)$$

С учетом смещения среднего доверительную вероятность интервала прочности, полученного пересечением доверительных интервалов по двум методам, возможно определить через квантиль t -распределения:

$$t_{\alpha v} = \frac{(\bar{R}_c - R_{min})\sqrt{n}}{S_R} \quad (5)$$

Зная $t_{\alpha v}$ и количество измерений $n = v + 1$, находим табулированную функцию Лапласа и определяем вероятность попадания прочности в доверительный интервал $2\Phi(t) = \alpha$.

5. Обсуждение

В проанализированных источниках чаще всего предлагается комбинировать ультразвуковое прозвучивание с методом упругого отскока или ударного импульса [1, 2, 7, 12]. В проведенных исследованиях наиболее точные результаты показало сочетание ультразвукового метода и метода упругого отскока. При этом статистическому анализу комбинированных методов уделено недостаточное внимание.

Как известно [5, 11, 13], на результаты неразрушающих испытаний (в англоязычной литературе NDT-методов) оказывает влияние состояние поверхности бетона, его состав, модуль упругости, динамическая вязкость, температура, влажность и пр. Поэтому для комбинации важно выбирать методы, обладающие свойством комплементарности (взаимной дополнителности) [5], выражающемся во взаимной компенсации

погрешностей при определении прочности бетона. Этому условию удовлетворяет ультразвуковое поверхностное или сквозное прозвучивание в сочетании с методами внедрения индентора (удара бойка). Для построения градуировочной зависимости ультразвукового испытания прочности используют его комбинацию с отрывом со скалыванием или скалыванием ребра.

6. Заключение

Наиболее близкие значения прочности к эталонным испытаниям на прессе показали метод упругого отскока (молоток Шмидта) и ультразвуковой метод (Пульсар-1.2). Предложен комбинированный метод испытания бетона, реализуемый пересечением двух доверительных интервалов средней прочности. Описаны статистические характеристики комбинированного метода.

Дальнейшие исследования будут направлены на оценку влияния влажности, замораживания и замазывания поверхности бетона на точность неразрушающих методов испытаний прочности.

Список используемых источников

1. Улыбин А. В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4. С. 10–15.
2. Штенгель В. Г. Общие проблемы технического обследования неметаллических строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2010. №7(17). С. 4–9.
3. Бурмин А. В. Влияние влажности бетона на точность определения прочности // Вестник ТГАСУ. 2007. №4. С. 135–138.
4. Свинцов А. П., Николенко Ю. В., Харун М. И., Казаков А. С. Влияние вязкости нефтепродуктов на деформативные свойства бетона // Инженерно-строительный журнал. 2014. №7. С. 16–22.
5. Снежков, Д. Ю., Леонович С. Н. Повышение достоверности контроля прочности бетона неразрушающими методами на основе их комбинирования // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 25–32.
6. Латыш А. В., Леонович С. Н., Коледа Е. А. Контроль качества бетона монолитных железобетонных конструкций // Технология строительства и реконструкции: TCR-2015: сборник докладов Международной научно-технической конференции. Минск: БНТУ, 2017. С. 263–274.
7. Breyse D., Balayssac J., Biondi S., Corbett D., Goncalves A., Grantham M., Luprano V.A.M., Masi A., Monteiro A.V., Sbartai Z.M. Recommendation of RILEM TC249-ISC on non-destructive in situ strength assessment of concrete // Materials and Structures. 2019. Vol. 52. No. 4. P. 1–21. DOI: 10.1617/s11527-019-1369-2.

8. *Hannachi S., Guetteche M.* Application of the Combined Method for Evaluating the Compressive Strength of Concrete on Site // *Open Journal of Civil Engineering*. 2012. Vol. 2 No.1. DOI: 10.4236/ojce.2012.21003.
9. *Taubaldy I., Akhmetov D., Rakisheva A.* A comprehensive approach to concrete strength testing: combining destructive, non-destructive and wireless sensor methods // *Bulletin of the L.N. Gumilev Eurasian National University. Series: Technical Sciences and Technologies*. 2023. No. 1 (142). P. 98–106. DOI: 10.32523/2616-7263-2023-142-1-98-106.
10. *Kosar K., Khazanovich L., Salles L.* Evaluation of Early Age Concrete Pavement Strength by Combined Nondestructive Tests // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023. Vol. 13. No. 4. P. 2240. DOI: 10.3390/app13042240.
11. *Balayssac J. P., Laurens S., Breysse D. and Garnier V.* Evaluation of Concrete Properties by Combining NDT Methods // *Nondestructive Testing of Materials and Structures. Proceedings of NDTMS-2011, Istanbul, Turkey*. 2011. P. 187–192.
12. *Bensaber A., Boudaoud Z., Seghir N.T., Czarnecki S., Sadowski L.* The assessment of concrete subjected to compressive and flexural preloading using nondestructive testing methods, correlation between Concrete Strength and Combined method (SonReb) // *Measurement*. 2023. Vol. 222. P. 113659. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113659.
13. *Reinhardt H. W.* Characterization of Fresh and Early Age Concrete Using NDT // *Nondestructive Testing of Materials and Structures. Proceedings of NDTMS-2011, Istanbul, Turkey*. 2011. P. 407–422.
14. *Advanced concrete technology*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2011, 506 p.
15. *Schabowicz K.* Non-destructive testing of materials in civil engineering // *Materials*, 2019. vol. 12. No. 19. p. 3237.

References

1. Ulybin A. V. (2011). O vybore metodov kontrolya prochnosti betona postroennykh sooruzheniy [On the choice of methods for controlling the strength of concrete of constructed structures]. *Civil Engineering Magazine*, 4, 10–15. (In Russian).
2. Shtengel' V. G. (2010). Obshchie problemy tekhnicheskogo obsledovaniya nemetallicheskih stroitel'nykh konstrukcij ekspluatiruemyykh zdaniy i sooruzheniy [General problems of technical inspection of non-metallic building structures of operated buildings and structures]. *Civil Engineering Magazine*, 7(17), 4–9. (In Russian).
3. Burmin A. V. (2007). Vliyanie vlazhnosti betona na tochnost' opredeleniya prochnosti [The effect of concrete moisture on the accuracy of strength determination]. *Bulletin of the TSACU*, 4, 135–138. (In Russian).
4. Svincov A. P., Nikolenko Yu. V., Harun M. I., Kazakov A. S. (2014). Vliyanie vyazkosti neftepro-duktoy na deformativnye svoystva betona [The effect of viscosity of petroleum products on the deformative properties of concrete]. *Civil Engineering Magazine*, 7, 16–22. (In Russian).
5. Snezhkov, D. Yu., Leonovich S. N. (2018). Povyshenie dostovernosti kontrolya prochnosti betona nerazrushayushchimi metodami na osnove ih kombinirovaniya [Increasing the reliability of concrete strength control by non-destructive methods based on their combination]. *Industrial and civil engineering*, 1, 25–32. (In Russian).
6. Latysh A. V., Leonovich S. N., Koleda E. A. (2017). Kontrol' kachestva betona monolitnykh zhelezobetonnykh konstrukcij [Quality control of concrete of monolithic reinforced concrete structures]. *Tekhnologiya stroitel'stva i rekonstrukcii: TCR-2015: sbor-nik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. [Technology of construction and reconstruction: TCR-2015: collection of reports of the International Scientific and Technical Conference] (pp. 263–274). Minsk: Publ. BNTU. (In Russian).
7. Breysse D., Balayssac J., Biondi S., Corbett D., Goncalves A., Grantham M., Luprano V.A.M., Masi A., Monteiro A.V., Sbartai Z.M. (2019). Recommendation of RILEM TC249-ISC on non-destructive in situ strength assessment of concrete. *Materials and Structures*, 52(4), 1–21. DOI: 10.1617/s11527-019-1369-2.
8. Hannachi S., Guetteche M. (2012). Application of the Combined Method for Evaluating the Compressive Strength of Concrete on Site. *Open Journal of Civil Engineering*, 2(1), DOI: 10.4236/ojce.2012.21003.
9. Taubaldy I., Akhmetov D., Rakisheva A. (2023). A comprehensive approach to concrete strength testing: combining destructive, non-destructive and wireless sensor methods. *Bulletin of the L.N. Gumilev Eurasian National University. Series: Technical Sciences and Technologies*, 142(1), 98–106. DOI: 10.32523/2616-7263-2023-142-1-98-106.

10. Kosar K., Khazanovich L., Salles L. (2023). Evaluation of Early Age Concrete Pavement Strength by Combined Nondestructive Tests. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(4), 2240. DOI: 10.3390/app13042240.
11. Balayssac J. P., Laurens S., Breyse D. and Garnier V. (2011). Evaluation of Concrete Properties by Combining NDT Methods. *Nondestructive Testing of Materials and Structures. Proceedings of NDTMS-2011* (pp. 187–192), Istanbul, Turkey.
12. Bensaber A., Boudaoud Z., Seghir N.T., Czarnecki S., Sadowski Ł. (2023). The assessment of concrete subjected to compressive and flexural preloading using nondestructive testing methods, correlation between Concrete Strength and Combined method (SonReb). *Measurement*, 222, 113659. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113659.
13. Reinhardt H. W. (2011). Characterization of Fresh and Early Age Concrete Using NDT. *Nondestructive Testing of Materials and Structures. Proceedings of NDTMS-2011* (pp. 407–422), Istanbul, Turkey.
14. *Advanced concrete technology* (2011). Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 506 p.
15. Schabowicz K. (2012). Non-destructive testing of materials in civil engineering. *Materials*, 12(19), 3237.

Получено: 23.05.24
Прошла рецензирование: 24.05.24
Принята к публикации: 27.05.24
Доступно он-лайн: 15.07.24

Received: 23.05.24
Revised: 24.05.24
Accepted: 27.05.24
Available on-line: 15.07.24