

Д.Ю. СНЕЖКОВ¹, инженер;
С.Н. ЛЕОНОВИЧ^{1,2}, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (sleonovich@mail.ru);
Н.А. БУДРЕВИЧ¹, инженер

¹ Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

² Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

Методика испытаний буронабивных свай сейсмоакустическим и ультразвуковым методами

Изложены результаты натурных исследований буронабивных свай по комплексной методике, включающей испытания сейсмоакустическим методом и методом ультразвукового межскважинного мониторинга. Комплексные испытания позволили произвести оценку не только однородности ствола свай, наличия различного рода дефектов, но и дали возможность определить прочность при сжатии бетона ствола свай по всей ее длине. Это особенно важно, поскольку сваи будут подвергаться нагрузкам около 1000 т. Ультразвуковой межскважинный мониторинг в дополнение к сейсмоакустическому методу позволяет получить более реалистичную картину свайной конструкции, а также дать технологу и конструктору прочностные показатели конструкционного бетона свай с шагом 500 мм по длине ствола. Эта информация важна как для производителей работ, имеющих возможность сразу же отреагировать на недостатки бетонирования, так и для конструкторов, своевременно вносящих корректировки в расчет. Объектом исследования были выбраны буронабивные железобетонные сваи диаметром ~ 800 мм. Предмет исследования: сейсмоакустический (эхоимпульсный) метод контроля железобетонных буронабивных свай, межскважинный ультразвуковой мониторинг. Цель работы: исследование однородности структуры буронабивных свай; определение фактической длины свай; выявление дефектов свай; оценка прочности при сжатии бетона ультразвуковым импульсным методом.

Ключевые слова: сваи буронабивные, неразрушающий контроль, эхоимпульсный метод, межскважинный ультразвуковой мониторинг.

Для цитирования: Снежков Д.Ю., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Методика испытаний буронабивных свай сейсмоакустическим и ультразвуковым методами // Бетон и железобетон. 2022. № 2 (610). С. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-20-24>

D.Ju. SNEZHKOVA¹, Engineer;
S.N. LEONOVICH^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Foreign Academician of RAACS, (leonovichsn@tut.by);
N.A. BUDREVICH¹, Engineer (nellibudrevich@yandex.by)

¹ Belarusian National Technical University (65, Prospekt Nezavisimosti, 220013, Minsk, Belarus)

² Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

Methodology of Testing Bored Piles by Seismo-Acoustic and Ultrasonic Methods

The results of field studies of bored piles using a complex methodology, including tests by the seismo-acoustic method and the method of ultrasonic inter-well monitoring, are presented. Complex tests made it possible to assess not only the uniformity of the pile shaft, the presence of various kinds of defects, but also made it possible to determine the compressive strength of the concrete of the pile shaft along its entire length. This is especially important because the piles will be subjected to loads of about 1000 tons. Ultrasonic inter-well monitoring, in addition to the seismo-acoustic method, makes it possible to get a more realistic picture of the pile structure, as well as to give the technologist and designer strength indicators of structural concrete piles with a step of 500 mm along the length of the trunk. This information is important both for work producers who have the opportunity to immediately respond to the shortcomings of concreting, and for designers who make timely adjustments to the calculation. Bored reinforced concrete piles with a diameter of ~ 800 mm were selected as an object of the study. The subject of the study is a seismo-acoustic (echo-pulse) method of monitoring reinforced concrete bored piles, inter-well ultrasonic monitoring. The purpose of the work: is to study the uniformity of the structure of bored piles; to determine the actual length of piles; to identify pile defects, to assess the compressive strength of concrete by ultrasonic pulse method.

Keywords: bored piles, non-destructive control, echo-pulse method, inter-well ultrasonic monitoring.

For citation: Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Methodology of testing bored piles by seismo-acoustic and ultrasonic methods. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 2 (610), pp. 20–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-20-24>

Важным преимуществом технологии буронабивных свай с использованием непрерывного проходного шнека является высокая производительность и высокое качество заполнения скважины бетоном при

отсутствии вибрационных воздействий на окружающие здания и сооружения. К недостаткам технологии следует отнести отклонение ствола свай от проектного положения, остановку бурения при наличии в ос-

новании плотных грунтов с галечными и валунными включениями. При работе в слабых водонасыщенных грунтах на поверхность может извлекаться объем грунта, значительно превышающий геометрический размер скважины, что, помимо избыточного (до двух раз) расхода бетона, способствует выносу грунта из-под фундаментов близкорасположенных зданий и сооружений. Это может привести к их неравномерным сверхнормативным дополнительным осадкам. Невозможно также гарантировать защитную толщину слоя бетона вокруг арматурного каркаса: при длине сваи более 15 м затруднительно погрузить каркас на требуемую глубину даже при помощи вибропогружателя, особенно при остановке извлечения шнека в процессе бетонирования. При этом может возникнуть сложность контролирования гарантированных сплошности и проектных размеров бетонируемых стволов свай.

Основными задачами исследований явились: изучение однородности структуры буронабивных свай сейсмоакустическим (эхоимпульсным) методом (PEM – Pulse-Echo Method) и методом межскважинного ультразвукового мониторинга (CHUM – Crosshole Ultrasonic Method); определение фактической длины свай; анализ данных испытаний свай методами PEM и CHUM на предмет совпадения оценок состояния тела сваи; выявление дефектов сплошности свай.

Методика испытаний сейсмоакустическим методом и приборы контроля

Методика контроля соответствует рекомендациям ASTM («American Society for Testing and Materials») – Standard ASTM D5882–16: «Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations». Данный стандарт устанавливает минимальные требования к процедуре испытаний сваи путем приложения ударной нагрузки малой интенсивности. Испытания целостности конструкции осуществляются путем формирования импульса акустической волны и регистрации импульсов, возникающих при отражении зондирующего импульса от неоднородностей в теле сваи, – эхоимпульсный метод (Puls Echo Metod – PEM). Использовался прибор диагностики свай «Спектр-3» (НПП «Интерприбор» РФ), характеристики которого соответствуют требованиям [1]. Информационными параметрами являются измеренные колебательные скорости и ускорения зон контроля при прохождении акустической волны в теле сваи и характеристические временные интервалы, соответствующие глубине расположения участков отражения акустического импульса. Ориентировочное значение скорости распространения акустической волны в бетоне сваи определялось согласно [2] ультразвуковым прибором Пульсар-2.2.

Отражение волны от границы раздела сред происходит из-за изменения полного акустического импеданса сваи.

Акустический импеданс Z определяется как:

$$Z = S \cdot \sqrt{E \cdot \rho}, \quad (1)$$

где S – площадь сечения сваи; E – модуль упругости; ρ – плотность материала сваи.

Любое изменение S , E или ρ приведет к изменению импеданса и, как следствие, к отражению акустической волны. Отражения могут быть вызваны следующими причинами:

- достижением акустической волны конца сваи;
- уменьшением/увеличением поперечного сечения;
- потерей сплошности (попаданием грунта, воды, воздуха в тело сваи, образованием поперечных трещин);
- изменением физико-механических свойств бетона по длине сваи;
- контрастной сменой слоев грунта по глубине расположения сваи.

Не вызывают отражения следующие дефекты:

- постепенное (на протяжении нескольких диаметров) изменение диаметра сваи;
- изогнутая форма сваи;
- мелкие дефекты.

От знака изменения импеданса на границе раздела сред зависит знак отражения (рис. 1).

Длина сваи H при известной скорости распространения волны V рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{V \cdot t}{2}. \quad (2)$$

Полученные данные позволяют оценить длину, целостность и сплошность сваи, а также прочностные характеристики бетона сваи, хотя оценка является приблизительной. Рассматриваемый метод испытаний не дает информации о несущей способности сваи. Для повышения достоверности контроля акустическим методом в общем случае важно учитывать грунтовый профиль, технологию устройства свай и возможные отклонения от технологического регламента производства работ, схему армирования.

Погрешность определения длины сваи напрямую зависит от того, насколько точно в ней задана скорость распространения волны [3–7]. Чтобы упростить интерпретацию акустического сигнала, он подвергается дополнительной обработке – усилению и фильтрации.

Плотный контакт боковой поверхности сваи с грунтом вызывает рассеивание энергии акустического сигнала при его прохождении вдоль тела сваи. Для компенсации этого ослабления сигнал дополнительно усиливается. При регистрации и анализе сигнала вводится дополнительное усиление k , которое дина-

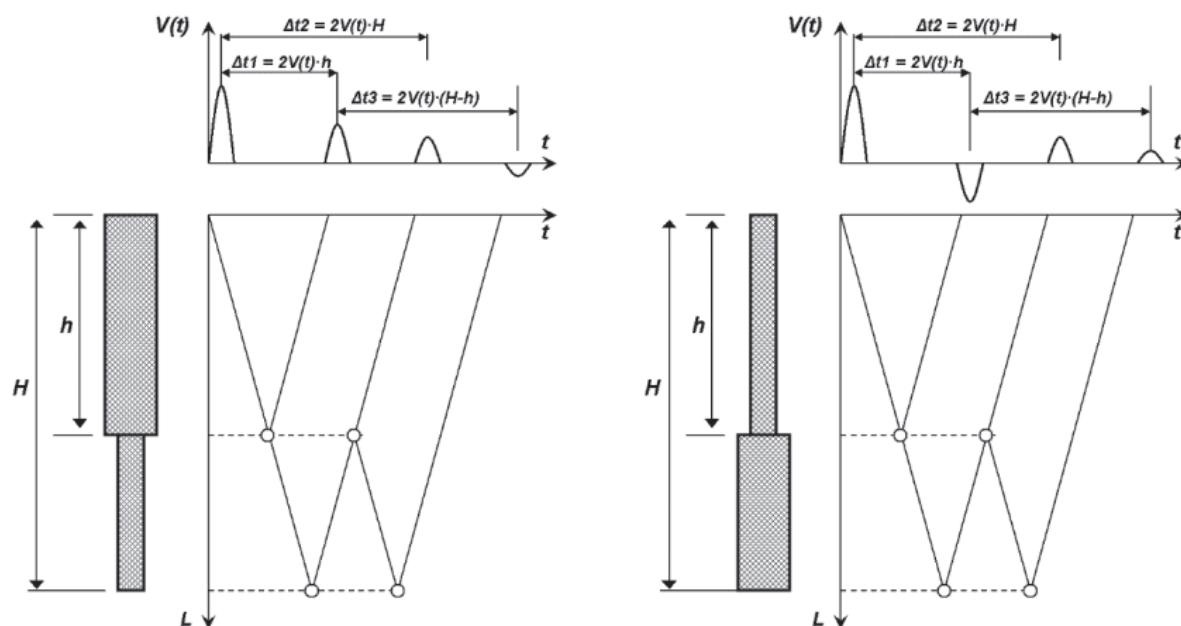


Рис. 1. Влияние формы сваи на форму акустического отклика
Fig. 1. Influence of the pile shape on the shape of the acoustic response

мически адаптируется к пройденному расстоянию или времени задержки по следующему алгоритму:

$$k = e^{B \cdot t}, \quad (3)$$

где B – коэффициент затухания (постоянная величина для каждой отдельной сваи).

Реальная рефлектограмма акустического сигнала часто отличается от идеализированной (рис. 1) из-за влияния разного рода помех. К таковым относятся паразитные колебания, возникающие вследствие колебательного резонанса выступающих из тела сваи стержней арматуры или каналаобразующих – для метода *CHUM* – стальных труб. Кроме того, паразитный колебательный процесс формируется при точечном ударном воздействии на поверхность оголовка сваи. В этом случае возникает затухающая стоячая поверхностная волна на оголовке сваи, длина волны колебательного процесса определяется диаметром сваи и скоростью распространения волны Релея. Для сваи диаметром 0,8 м длина волны первой моды колебаний составит величину такого же порядка. Частота колебаний f_R может находиться в полосе частот зондирующего импульса, в частности, для сваи диаметром $D=0,8$ м:

$$f_R = \frac{V_R}{D} = \frac{2500}{0,8} = 3125 \text{ Гц},$$

что сопоставимо с полосой частот зондирующего импульса при его возбуждении ударом длительностью 0,5 мс. Указанные акустические помехи значительно усложняют анализ рефлектограммы, не позволяя надежно выделить в ней импульсы, обусловленные дефектами однородности сваи. Кроме того, на формирование рефлектограммы оказывает влияние на-

личие контрастных (по акустическим параметрам) геологических слоев грунта, окружающего сваю. Сложность учета всех в совокупности указанных факторов не позволила к настоящему времени однозначно алгоритмизировать интерпретацию полученных рефлектограмм.

Характерными признаками присутствия в рефлектограмме импульсов отражения могут быть:

- резкие изменения амплитуды колебаний;
- смена фазы колебаний, выражающаяся в скачкообразном изменении периода соседних (по рефлектограмме) колебаний.

Методика испытаний

межскважинным ультразвуковым методом

Основу метода составляет продольное профилирование тела сваи путем регистрации скорости (времени) распространения ультразвукового импульса в направлении, поперечном по отношению к оси сваи (рис. 2). Генерацию и прием УЗ импульса производят отдельными преобразователями, которые размещают в так называемых трубах (каналах) доступа (ТД), заполненных водой. Оба преобразователя устанавливаются на одном горизонтальном уровне, после чего производится измерение скорости (времени) распространения УЗ импульса. После регистрации УЗ импульса преобразователи смещаются на один шаг профилирования и процедура измерения повторяется.

На каждом шаге регистрируется скорость/время распространения импульса. Дополнительным параметром может служить относительная энергия принятого импульса, которая оценивается обычно по амплитуде первого вступления УЗ импульса.

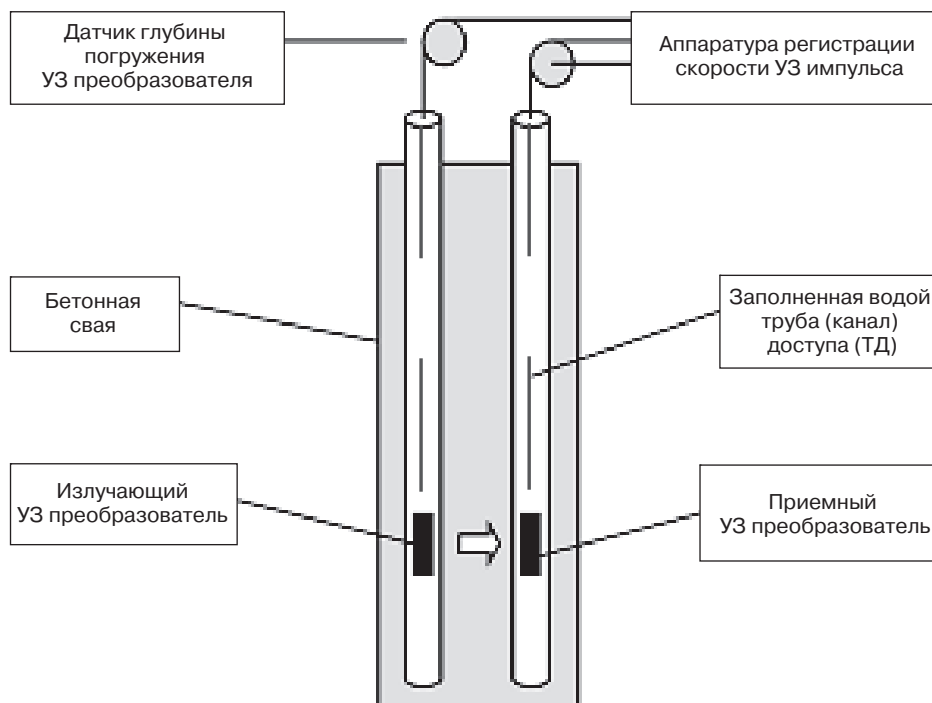


Рис. 2. Схема проведения испытаний методом CHUM
Fig. 2. Scheme of testing by the CHUM method

В практике контроля свай по методу CHUM используют продольные волны (волны сжатия–растяжения), скорость которых для зрелого конструкционного бетона лежит в пределах 3000–4500 м/с. Наличие дефектов сплошности – трещин, пустот, участков повышенной пористости и прочего – приводит к увеличению времени распространения УЗ импульса от излучающего преобразователя к приемному, а также к снижению энергии импульса, достигшего приемника. Указанные показатели являются информационными параметрами метода. Для анализа состояния сваи по данным испытаний строятся диаграммы распределения скорости (времени) распространения УЗ импульса и его относительной энергии по длине сваи (рис. 3) – так называемый ультразвуковой профиль [8–11].

Значения скорости (времени) распространения УЗ импульса и его энергия сильно коррелированы, но в ряде случаев могут заметно отличаться, в частности при образовании пористых областей бетонного массива энергия импульса может заметно снизиться, а его скорость при этом изменится незначительно.

Крепление труб к каркасу должно обеспечивать их вертикальность и неизменяемость положения во время бетонирования. Отклонение труб доступа от вертикали не должно превышать 1–1,5% по длине ствола. Нижний торец труб должен находиться на уровне нижнего торца сваи. На нижних торцах труб были установлены заглушки для обеспечения герметичности канала доступа. Для верхних торцов труб

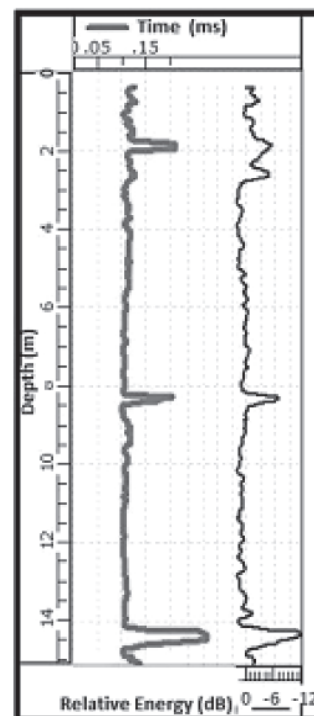
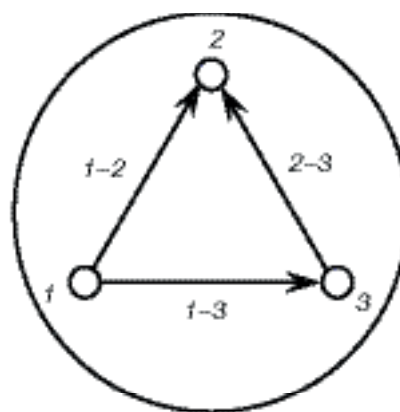


Рис. 3. Распределение скорости (времени) распространения УЗ импульса и его относительной энергии по длине сваи
Fig. 3. Distribution of the speed (time) of propagation of an ultrasonic pulse and its relative energy along the length of the pile



1-2 – направление трасс испытаний бетона опытных свай

Рис. 4. Схемы расположения труб доступа (ТД) и трасс (сечений) по методу CHUM

Fig. 4. Layout of access pipes (AP) and routes (sections) according to the CHUM method

были предусмотрены съемные (срезаемые) заглушки для предохранения трубы от попадания в них бетона и посторонних предметов (рис. 4).

Вывод

Предложена комплексная методика диагностики буронабивных свай комбинацией сейсмоакустического и межскважинного ультразвукового методов, доведенная до разработки Стандарта предприятия.

Список литературы

1. Standard ASTM D5882–16: «Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations».
2. Межгосударственный стандарт ГОСТ 17624–2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. Введ. 01.01.2014. М.: НИИЖБ. 16 с.
3. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю., Будревич Н.А. СТП 002.03.0–2020. Контроль неразрушающий. Методика выполнения измерений. Разработка тестирования свай на сплошность. Минск: УП «БЕЛТЕХНОЛОГИЯ», 2021. 37 с.
4. Попов О.В. Экспериментально-теоретические основы и практическое применение современных технологий изготовления свай в дилатирующих грунтах Республики Беларусь. Минск: БНТУ, 2022. 304 с.
5. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю., Доркин В.В. Мониторинг возводимых и эксплуатируемых зданий: Монография. М.: ИНФРА-М, 2019. 286 с.
6. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Автоматизированный мониторинг высотного здания с учетом фактора температуры. *Проблемы современного бетона и железобетона: Сборник научных трудов*. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, РУП «Институт БелНИИС». Минск: Колорград, 2018. Вып. 10. С. 233–249.
7. Леонович С.Н., Черноиван В.Н., Снежков Д.Ю., Полейко Н.Л., Цуприк В.Г., Ким Л.В. Реконструкция сооружений: Учебное пособие для вузов. Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федер. ун-т, 2017. 136 с.
8. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2017. № 1. С. 13–21.
9. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Комбинирование неразрушающих методов испытания бетона // *Вестник Брестского государственного технического университета. Сер. Строительство и архитектура*. 2017. № 1. С. 87–92.
10. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Автоматизированный мониторинг состояния несущих конструкций зданий // *Вестник Брестского государственного технического университета. Сер. Строительство и архитектура*. 2017. № 1. С. 92–97.
11. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона // *Наука и техника*. 2017. № 4. С. 289–297.

References

1. Standard ASTM D5882–16: «Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations».
2. Interstate standard GOST 17624–2012. Concrete. Ultrasonic method for determining strength. Introduction 01/01/2014. Moscow: NIIZhB. 16 p. (In Russian).
3. Leonovich S.N., Snezhkov D.Yu., Budrevich N.A. STP 002.03.0–2020. The control is non-destructive. Measurement technique. Development of testing piles for continuity. Minsk: UE «BELTECHNOLOGIA». 2021. 37 p. (In Russian).
4. Popov O.V. Eksperimental'no-teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye sovremennykh tekhnologiy izgotovleniya svay v dilatiruyushchikh gruntakh Respubliki Belarus' [Experimental and theoretical foundations and practical application of modern technologies for manufacturing piles in dilating soils of the Republic of Belarus]. Minsk: BNTU. 2022. 304 p.
5. Leonovich S.N., Snezhkov D.Yu., Dorkin V.V. Monitoring vozvodimyykh i ekspluatiruyemykh zdaniy: monografiya [Monitoring of erected and operated buildings: monograph]. Moscow: INFRA-M. 2019. 286 p.
6. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Automated monitoring of a high-rise building, taking into account the temperature factor. *Problems of modern concrete and reinforced concrete: a collection of scientific papers*. Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, RUE «Institute BelNIIS». Minsk: Kolorgrad, 2018. Iss. 10, pp. 233–249. (In Russian).
7. Leonovich S.N., Chernouvan V.N., Snezhkov D.Yu., Poleiko N.L., Tsuprik V.G., Kim L.V. Rekonstruktsiya sooruzheniy: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Reconstruction of structures: textbook for universities]. Vladivostok: Far Eastern Federal University. 2017. 136 p.
8. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Multiwave ultrasonic testing of concrete. *Vestnik of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technology*. 2017. No. 1, pp. 13–21. (In Russian).
9. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Combination of non-destructive methods of testing concrete. *Vestnik of the Brest State Technical University. Series "Construction and architecture"*. 2017. No. 1, pp. 87–92. (In Russian).
10. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Automated monitoring of the condition of the supporting structures of buildings. *Vestnik of the Brest State Technical University. Series "Construction and architecture"*. 2017. No. 1, pp. 92–97. (In Russian).
11. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Multiwave ultrasonic testing of concrete. *Nauka i tekhnika*. 2017. No. 4, pp. 289–297. (In Russian).