

УДК 620.1

© Ч. Д. Фан, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: phanchungduc@gmail.com

© Д. А. Савин, ст. научн. сотрудник
(23 Государственный морской проектный институт,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: pro100denisimo@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-3-28-34

© Ch. D. Fan, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: phanchungduc@gmail.com

© D. A. Savin, senior research worker
(23 GMPISS,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: pro100denisimo@mail.ru

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗГИБНЫХ ВОЛН

METHOD FOR ASSESSING THE RIGIDITY CHARACTERISTICS OF BUILDING STRUCTURES USING FLEXURAL WAVES

Статья посвящена способу контроля качества материалов строительных конструкций, в частности кирпичной кладки. Наиболее удобным и перспективным способом, по нашему мнению, является современный неразрушающий контроль, а именно метод с использованием изгибных волн, свободно возбуждаемых на поверхности строительной конструкции. Так, в частности, метод поверхностных волн для оценки интегральной прочности бетона и кирпичной кладки позволяет производить измерение при одностороннем доступе к конструкции без удаления покрытий, в том числе и металлоизоляции. Авторы статьи поставили задачу определить жесткостные характеристики кирпичных кладок путем обработки результатов испытаний с помощью линейной экстраполяции. Выполненный теоретический и экспериментальный анализ не только показал хорошую сходимость результатов, но и продемонстрировал возможности предложенного метода для определения прочности материала и наличия дефектов конструкций.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, кирпичная кладка, изгибные волны, жесткостные характеристики.

The article is devoted to the method of quality monitoring of building structures' materials, brickwork, in particular. According to the authors' opinion, the most convenient and promising method is the currently used non-destructive monitoring, namely, the method using flexural waves freely excited at the surface of building structure. Thus, inter alia, the method of surface waves for assessing the integral strength of concrete and brickwork makes it possible to carry out the monitoring with one-side access to the structure without removing the coverings including metal insulation. There has been set the task to assess the rigidity characteristics of the brickwork by processing the test results using linear extrapolation technique. The theoretical and experimental analysis performed has not only shown good convergence of the results, but also demonstrated the feasibility of the proposed method for assessing the strength of the material and discovering structural defects.

Keywords: non-destructive monitoring, brickwork, flexural waves, rigidity characteristics.

Введение

На сегодняшний день существует большое количество старых зданий и сооружений. Многие из этих объектов давно выработали проектный ресурс эксплуатации и нуждаются в оценке состояния своих несущих конструкций для определения условий их безопасной эксплуатации. При обследовании зданий фундамент и не-

сущая стена — самая сложная часть для оценки технического состояния и, как правило, требует определения прочности, локальных дефектных зон, реальных сечений и других характеристик материалов. Проблема обследования фундамента и фундаментных стен является весьма актуальной, так как эти конструкции наиболее на-

гружены и уязвимы при эксплуатации, особенно в условиях Санкт-Петербурга.

Разработка новых методов неразрушающего контроля строительных материалов и изделий, способных дополнить информацию о работе конструкции наряду с известными применяемыми методиками, является важной задачей [6–9]. Наиболее распространены звуковые, ультразвуковые [10–11] и механические [9–10, 12] методы определения модуля упругости материалов. Для обследования конструкций с одной доступной стороной, к которым относятся стены, плиты фундаментов и т. п., используется современный неразрушающий метод контроля, а именно метод изгибных волн. Такие волны в материале конструкций распространяются с разной фазовой скоростью и отличаются от ультразвуковых длиной волны, скоростью распространения и интенсивностью затухания. Это отличие, с одной стороны, снижает разрешающую способность основанных на их использовании методов, но с другой — позволяет снизить затухание волн и тем самым увеличить базы измерений, а также глубину зондажа при одностороннем доступе к конструкции.

1. Теоретическое решение для определения жесткостных характеристик кладки стен и фундаментов с использованием изгибных волн

Основными типами волн, встречающимися в строительных конструкциях, являются объемные (продольные и поперечные), а также каналовые (стержневые, пластинчатые, поверхностные и изгибные). Их скорость связана с коэффициентом Пуассона, что позволяет легко определять упругие характеристики строительных материалов. Теория упругости дает следующие соотношения между скоростями этих волн (рис. 1):

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}}; \quad (1)$$

$$\frac{V_R}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \cdot \frac{0,87+1,12\mu}{1+\mu}; \quad (2)$$

$$\frac{V_R}{V_s} = \frac{0,87+1,12\mu}{1+\mu}; \quad (3)$$

$$\frac{V_d}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{1-\mu}}(1+\mu); \quad (4)$$

$$\frac{V_{пл}}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{(1-\mu)^2}}; \quad (5)$$

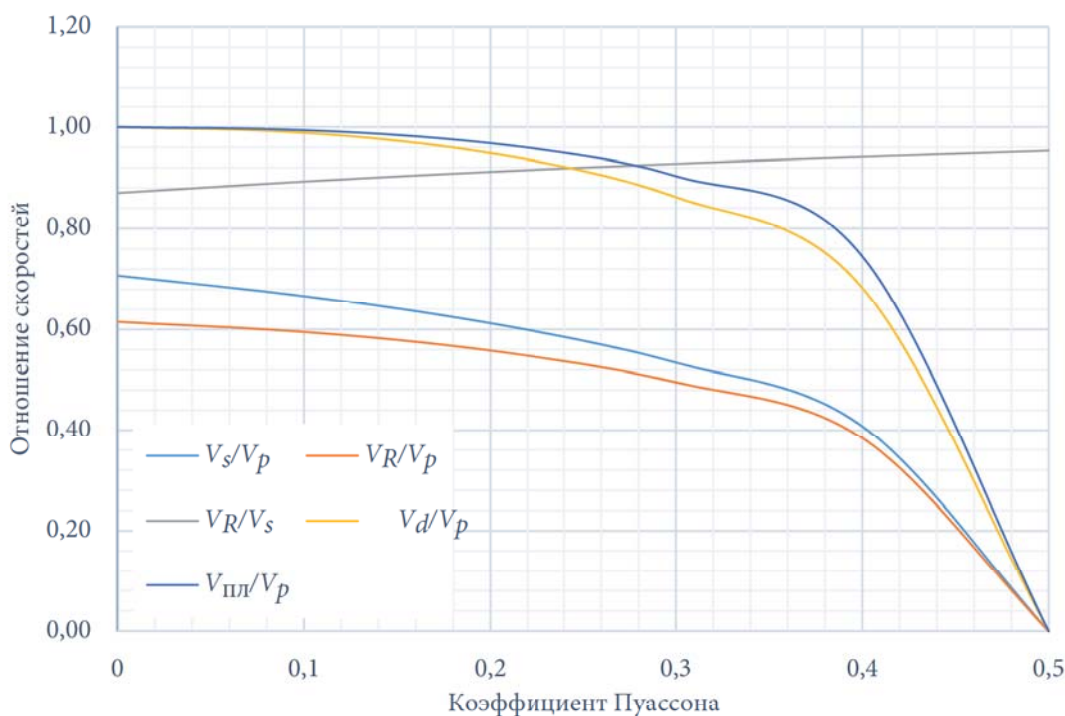


Рис. 1. Теоретические зависимости отношения скоростей от коэффициента Пуассона

где V_p — скорость продольной волны; V_s — скорость поперечной волны; V_R — скорость рэлеевской волны; V_d — скорость стержневой волны; $V_{пл}$ — скорость пластинчатой волны; μ — коэффициент Пуассона.

Для определения динамического модуля упругости E_d и модуля сдвига G_d по акустическим характеристикам применяются следующие формулы:

$$E_d = \rho V_p^2 \frac{(1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d}; \quad (6)$$

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)}. \quad (7)$$

В качестве примера принимаем наиболее простую конструкцию бесконечной свободно стоящей плиты. Тогда дисперсионную кривую для основных колебаний изгибных волн определяют из уравнения [3–4]

$$\frac{\text{th } \xi_L H / 2}{\text{th } \xi_T H / 2} = \frac{4\xi_L \xi_T}{\eta^2 \xi^2}, \quad (8)$$

в котором $\xi = 2\pi/\lambda$ — номер моды колебания (количество волн); $\xi_L = \xi \sqrt{1 - \frac{V_n^2}{V_p^2}}$; $\xi_T = \xi \sqrt{1 - \frac{V_n^2}{V_s^2}}$; $\eta = 2 - \frac{V_n^2}{V_s^2}$; V_n — фазовая скорость.

Решением уравнения (8) является теоретическая зависимость между скоростью изгибной волны и ее длиной. Это может быть выражено как зависимость между безразмерными параметрами $\frac{V_n}{V_R}$ и $\frac{\lambda}{H}$:

$$(8) \Leftrightarrow \frac{\text{th}\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_n^2}{V_p^2}}\right)}{\text{th}\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_n^2}{V_s^2}}\right)} = \frac{4 \sqrt{\left(1 - \frac{V_n^2}{V_p^2}\right)\left(1 - \frac{V_n^2}{V_s^2}\right)}}{\left(2 - \frac{V_n^2}{V_s^2}\right)^2}; \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\text{th}\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_n^2(1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{2V_R^2(1-\mu)(1+\mu)^2}}\right)}{\text{th}\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{V_n^2(0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2(1+\mu)^2}}\right)} = \frac{4 \sqrt{\left(1 - \frac{V_n^2(1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{2V_R^2(1-\mu)(1+\mu)^2}\right) \times \left(1 - \frac{V_n^2(0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2(1+\mu)^2}\right)}}{\left(2 - \frac{V_n^2(0,87+1,12\mu)^2}{V_R^2(1+\mu)^2}\right)^2}. \quad (10)$$

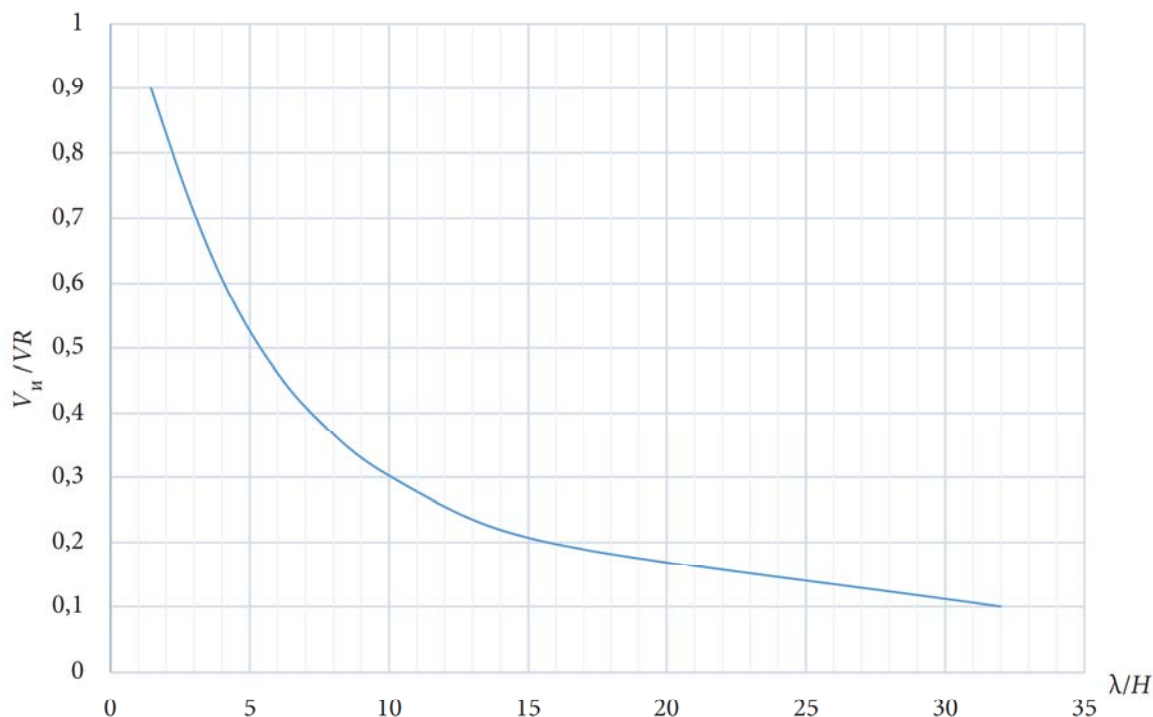


Рис. 2. Теоретическая зависимость V_n/V_R от отношения λ/H для кирпичной кладки при $\mu = 0,25$

Таблица 1

Точки координат дисперсионной кривой

V_u / VR	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
H/λ	0,064	0,099	0,139	0,186	0,245	0,326	0,448

По уравнению (10) легко доказать, что при $f = 0$ $V_u/V_R \rightarrow 0$, а при $f = \infty$ $V_u/V_R \rightarrow 1$, и тогда $V_u = V_R$. Для кирпичной кладки при $\mu = 0,25$ получаем дисперсионную кривую (рис. 2), как это следует из уравнения (10) и табл. 1.

Но из литературных источников [1–2] следует, что для реальных сред при распространении изгибных волн должно выполняться условие $0,4 < V_u/V_R < 0,7$. Следует подчеркнуть, что в этом диапазоне значений кривая на графике представляет собой отрезок прямой линии. При этом мы можем написать уравнение прямой с использованием табл. 1 и рис. 2:

$$\frac{V_R}{V_u} = 0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}. \quad (11)$$

Тогда динамический модуль упругости кладки вычисляются по уравнению:

$$E_d = 2,95\rho V_u^2 \left(0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}\right)^2. \quad (12)$$

2. Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Для проверки теоретической зависимости скоростей изгибных волн и жесткостных характеристик материала кладки по представленной схеме (рис. 3) были проведены экспериментальные исследования.

Исследуемые образцы представляют собой три вида кирпичных кладок, которые изготовлены из керамического полнотелого кирпича пластического прессования. Первый (толщиной 520 мм) изготовлен из кирпича М100 и цементного раствора М50, второй (толщиной 650 мм) — из кирпича М100 и цементного раствора М75, третий (толщиной 520 мм) — из кирпича М125 и цементного раствора М75. Количество и тип первичных измерительных преобразователей, шаг их расстановки вдоль измерительного луча,



Рис. 3. Схема измерений скорости изгибных волн в конструкции

Таблица 2

Оценка жесткостных характеристик кирпичной кладки

Образцы	E , МПа (по СП 15.13330.2020)	E_d , МПа (по предложенной формуле (12))	E_d , МПа (по линейной экстраполяции)
№ 1	2550	2775 (при $\lambda = 2,2$ м)	2460
№ 2	3400	3570 (при $\lambda = 2,0$ м)	3215
№ 3	3800	4035 (при $\lambda = 1,5$ м)	3625

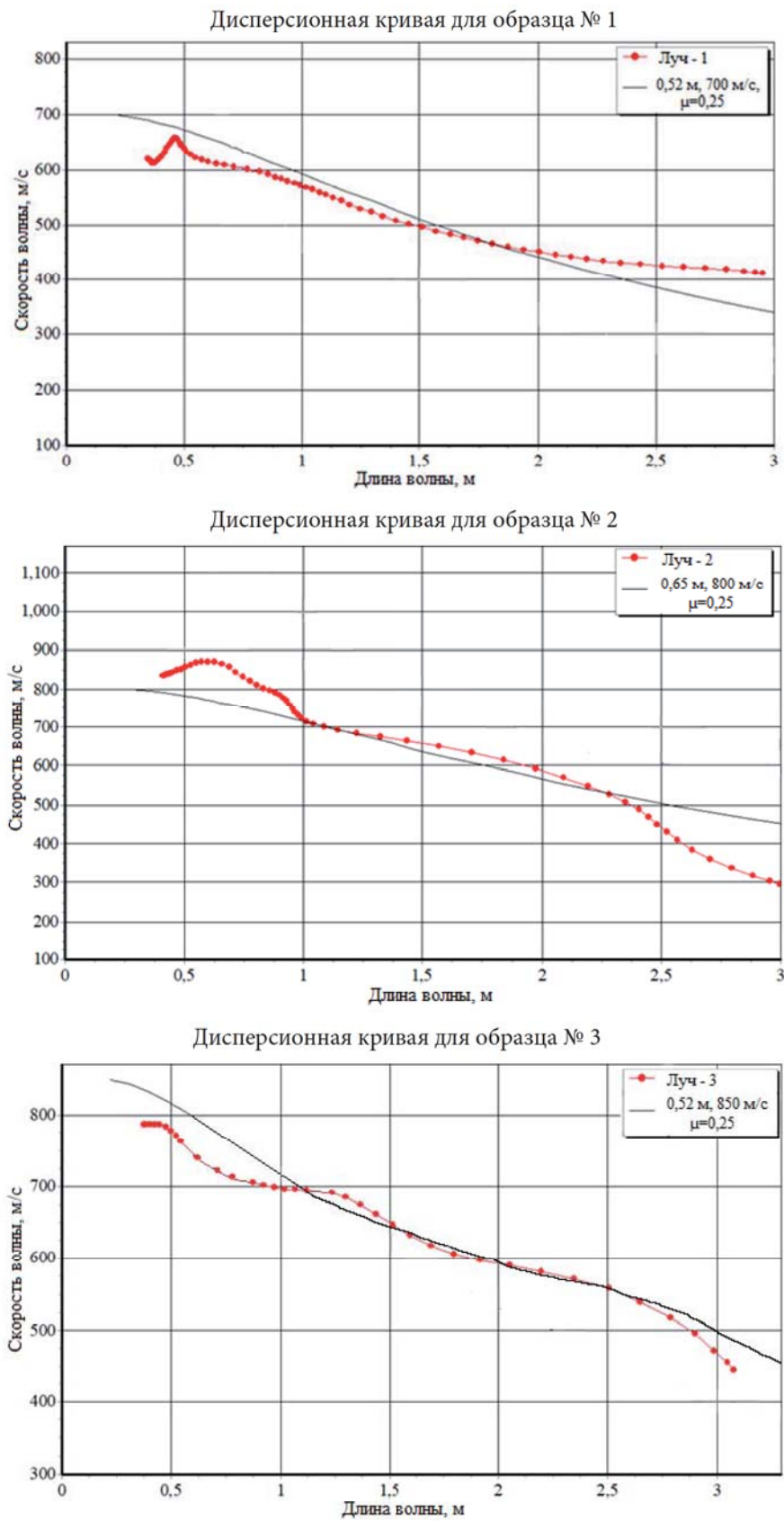


Рис. 4. Результаты эксперимента для трех видов образцов

а также места приложения импульсной ударной нагрузки и тип ударника выбирают с таким расчетом, чтобы наиболее полно выявить акустические характеристики обследуемого образца. Акселерометры расставляются в линию с постоянным шагом (образуют измерительный луч), а точки приложения нагрузки выбираются в створе измерительного луча в его начале и конце.

Обработка результатов измерений выполняется следующим образом. Исходные реализации волновых процессов, полученные при прямом и обратном направлениях распространения волны, разделяются при обработке на монохроматические пучки с помощью группы полосовых фильтров, полосы пропускания которых расположены на частотной оси с шагом 0,5 октавы и шириной полосы пропускания 0,5 октавы. По каждому отсчету времени распространения монохроматического пучка волны определяем фазовую скорость распространения волны $V_{\text{ф}}$ и длину волны λ . Фазовая скорость этой волны имеет порядок фазовой скорости изгибной волны [5].

Результаты эксперимента приведены на рис. 4, на котором показана кривая измерения отношения скоростей изгибных волн в зависимости от их длины, и в табл. 2.

Как видно из таблицы, наблюдается хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими данными. Весьма важно отметить, что для указанных выше условий эксперимента погрешность измерения не превышает 5 %.

Выводы

- Предложена формула (12) для определения динамического модуля упругости кладки с использованием изгибных волн. При решении уравнения распространения волн Лэмба определена теоретическая зависимость $V_{\text{ф}}/V_{\text{Р}}$ от отношения λ/H для кирпичной кладки при $\mu = 0,25$.

- Проведенные экспериментальные исследования находятся в удовлетворительном соответствии с результатами теоретических данных, и погрешность измерения не превышает 5 %.

- Получены аналитические и экспериментальные данные для оценки жесткостных характеристик кладки стен и фундамента по скоростям изгибных волн при линейной экстраполяции.

- Необходимо отметить, что использование предложенного подхода позволит не только оце-

нивать физико-механические характеристики материала каменных конструкций, но и эффективно определять их состав, наличие пустот и ослабленного материала при одностороннем до-
ступе.

Библиографический список

1. Савин С. Н., Данилов И. Л. Сейсмобезопасность зданий и территорий. СПб.: Лань, 2015. 240 с.
2. Ситников И. В., Жиленков А. Г., Титова Л. И. Применение метода поверхностных волн для обследования строительных конструкций зданий и сооружений // Строительство и архитектура. Серия: Сейсмостойкое строительство. 1996. Вып. 6. С. 35–40.
3. Аleshин Н. Н. Электросейсмоакустические методы обследования зданий. М.: Стройиздат, 1982. 156 с.
4. Джонс Р., Фэкзоару И. Неразрушающие методы испытаний бетонов / пер. с рум. В. М. Маслобойщикова. М.: Стройиздат, 1974. 296 с.
5. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
6. Абашин Е. Г. Определение начального модуля упругости бетона по основной частоте колебаний железобетонных балок // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 4 (48). С. 21–28.
7. Добромыслов А. Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений. М.: МГСУ; АСВ, 2006. 256 с.
8. Землянский А. А. Обследование и испытание зданий и сооружений. М.: АСВ, 2004. 240 с.
9. Козачек В. Г., Нечаев Н. В., Хотенко С. Н., Римшин В. И., Ройтман А. Г. Обследование и испытание зданий и сооружений. М.: Высшая школа, 2004. 447 с.
10. Гроздов В. Т. Техническое обследование строительных конструкций зданий и сооружений. СПб.: Фонд «Центр качества строительства», 1998. 127 с.
11. Гунгер Ю. Р., Тарасов А. Г., Чернев В. Т. Ультразвуковой и вибрационный контроль состояния железобетонных стоек опор и фундаментов воздушных линий электропередачи // Электроинфо. 2005. № 11. С. 40–43.
12. Кашкаров К. П. Контроль прочности бетона и раствора в изделиях и сооружениях. М.: Стройиздат, 1967. 96 с.

References

1. Savin S. N., Danilov I. L. *Seysmbezopasnost' zdaniy i territoriy* [Seismic safety of buildings and sites]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2015, 240 p.

2. Sitnikov I. V., Zhilenkov A. G., Titova L. I. *Primenenie metoda poverkhnostnykh voln dlya obsledovaniya stroitel'nykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy* [Applying the method of surface waves for the surveying the structural units of buildings and structures]. *Stroitel'stvo i arkhitektura. Seriya: Seysmostoykoe stroitel'stvo – Construction and architecture. Series: Earthquake-resistant construction*, 1996, no. 6, pp. 35–40.
3. Aleshin N. N. *Elektroseismoakusticheskie metody obsledovaniya zdaniy* [Electroseismo-acoustic methods for surveying buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 156 p.
4. Dzhons R., Fekeoar I. *Nerazrushayushchie metody ispytaniy betonov* [Non-destructive methods of testing concrete]. Transl. by Masloboyshchikov V. M. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974, 296 p.
5. Viktorov I. A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh* [Sound surface waves in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 287 p.
6. Abashin E. G. *Opredelenie nachal'nogo modulya uprugosti betona po osnovnoy chastote kolebaniy zhelezobetonnykh balok* [Determination of the initial modulus of elasticity of concrete according to the fundamental vibration frequency of reinforced concrete beams]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury – Scientific journal of construction and architecture*, 2017, no. 4 (48), pp. 21–28.
7. Dobromyslov A. N. *Diagnostika povrezhdeniy zdaniy i inzhenernykh sooruzheniy* [Technical diagnostics of damage to buildings and engineering structures]. Moscow, MGSU; ASV Publ., 2006, 256 p.
8. Zemlyanskiy A. A. *Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzheniy* [Survey and testing of buildings and structures]. Moscow, ASV Publ., 2004, 240 p.
9. Kozachek V. G., et al. *Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzheniy* [Inspection and testing of buildings and structures]. Moscow, Vysshaya shkola, 2004, 447 p.
10. Grozdov V. T. *Tekhnicheskoe obsledovanie stroitel'nykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy* [Technical inspection of building structural units of buildings and structures]. St. Petersburg, Fond Tsentra kachestva stroitel'stva Publ., 1998, 127 p.
11. Gunger Yu. R., Tarasov A. G., Chernev V. T. *Ul'trazvukovoy i vibratsionnyy kontrol' sostoyaniya zhelezobetonnykh stoek opor i fundamentov vozdukhnykh liniy elektropredachi* [Ultrasonic and vibration monitoring of the condition of reinforced concrete pillars of supports and foundations of overhead power lines]. *Electroinfo*, 2005, no. 11, pp. 40–43.
12. Kashkarov K. P. *Kontrol' prochnosti betona i rastvora v izdeliyakh i sooruzheniyakh* [Monitoring the strength of concrete and mortar in products and structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1967, 96 p.