

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОРОСТЕЙ ИЗГИБНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

ASSESSING OF THE STONE STRUCTURE STRENGTH BY THE METHOD OF USING FLEXURAL ACOUSTIC WAVES` VELOCITIES

Рассмотрена методика контроля прочности материалов конструкций плитного типа, а именно кирпичной кладки с помощью скоростей изгибных волн при использовании метода ударных волн. Были проведены экспериментальные исследования на натуральных объектах с учетом информации о материалах конструкций (плотность, коэффициент Пуассона и т. д.). Представленный подход позволяет эффективно определить физико-механические характеристики плитной конструкции по дисперсионным кривым изгибных волн в ее материале. По результатам испытаний можно определить состояние конструкции и разработать рекомендации по ее усилению и реконструкции.

Ключевые слова: плитная конструкция, контроль качества, скорость изгибных волн, физико-механические характеристики.

The article considers the technique of controlling the strength of materials of slab-type structures, namely, the brickwork, taking into account the flexural wave velocities, at using the impact wave method. Experimental studies were carried out on full-scale objects, taking into account the information about the materials of the structures (density, Poisson's ratio, etc.). The presented approach makes it possible to effectively determine the physical and mechanical characteristics of a slab-type structure from the dispersion curves of flexural waves in its material. Based on the test results, it is possible to make a conclusion about the structure condition and develop recommendations for strengthening and reconstructing the structure.

Keywords: slab-type structure, quality control, velocity of flexural waves, physical and mechanical characteristics.

Главная цель обследования несущих конструкций зданий и сооружений — определить действительное техническое состояние конструкций, их способность воспринимать действующие в данный период нагрузки и обеспечивать нормальную эксплуатацию объекта [4]. Основной характеристикой при новом строительстве и реконструкции зданий является прочность несущих стен здания [15]. При этом многие кирпичные здания являются исторически ценными, другие удобны для проведения реконструкции с увеличением этажности [15–16]. На сегодняшний день при обследовании зданий и сооружений наиболее удобными и перспективными являются неразрушающие методы оценки состояния конструкции. Например, в работах [18–19] предлагается ис-

пользовать ультразвуковой метод, в работе [17] — метод пластической деформации. Но, на наш взгляд, метод ударных волн с использованием изгибных волн акустического диапазона частот показал свою эффективность благодаря способности распространять волны с малым затуханием по сравнению с ультразвуковым методом. Эта способность позволяет одновременно получать большой объем результатов испытаний на длинных участках измерений даже при одностороннем доступе к конструкции, так как до настоящего времени в соответствии с инструкциями различных институтов прочность наружных стен определялась только по наружной поверхности¹. Дан-

¹ Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1988. 36 с.

ный метод успешно применяется в России более 20 лет при обследовании зданий и сооружений различного назначения.

Методика испытаний контроля качества конструкций. Определение прочности кирпичной кладки выполняется методом ударных волн с использованием изгибных волн. Данный тип волн для классической упругой среды хорошо изучен [3, 10–11]. Идея метода основана на связи скорости распространения упругих волн различной длины волны с физико-механическими характеристиками материалов конструкций и их размерами.

Уиллисом Лэмбом было показано, что колебания таких волн распространяются со скоростью, которая зависит от частоты колебаний, а также от толщины и упругих свойств плит. Тогда при известном коэффициенте Пуассона плотности материалов и размере конструкции становится возможным определить физико-механические характеристики ее материалов с помощью дисперсионной кривой (зависимость скорости изгибной волны от ее длины). Форма дисперсионной кривой построена при решении уравнения распространения волны Лэмба [12–14] и описывается уравнением [7]:

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

где V_R — скорость рэлеевской волны; V_n — фазовая скорость изгибных волн; μ — коэффициент Пуассона; H — толщина конструкции; λ — длина волны.

Параметры волновых процессов определяются с помощью акселерометров, устанавливаемых на поверхности конструкции (стены, простенка) с постоянным шагом. Возбуждение поверхностных изгибных волн выполняется ударом по конструкциям тампером, который представляет

собой деревянный брус длиной 1,5 м и сечением около 100 см² (рис. 1). Примерная схема испытательной показана на рис. 2.

Обработка результатов измерений выполняется следующим образом. Исходные реализации волновых процессов (рис. 3), полученные при прямом и обратном направлениях распространения волны (при ударах в ПУ1 и ПУ2, см. рис. 2), разделяются при обработке на моно-



Рис. 1. Возбуждение изгибных волн в конструкции с использованием тампера

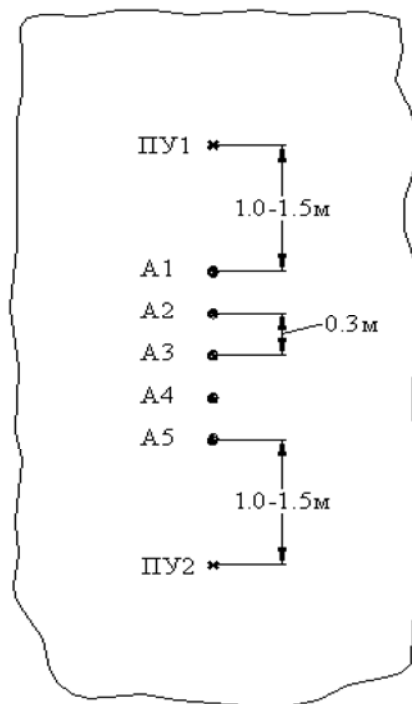


Рис. 2. Схема измерения поверхностных волн (А1–А5 — акселерометры; ПУ1, ПУ2 — пункты ударов)

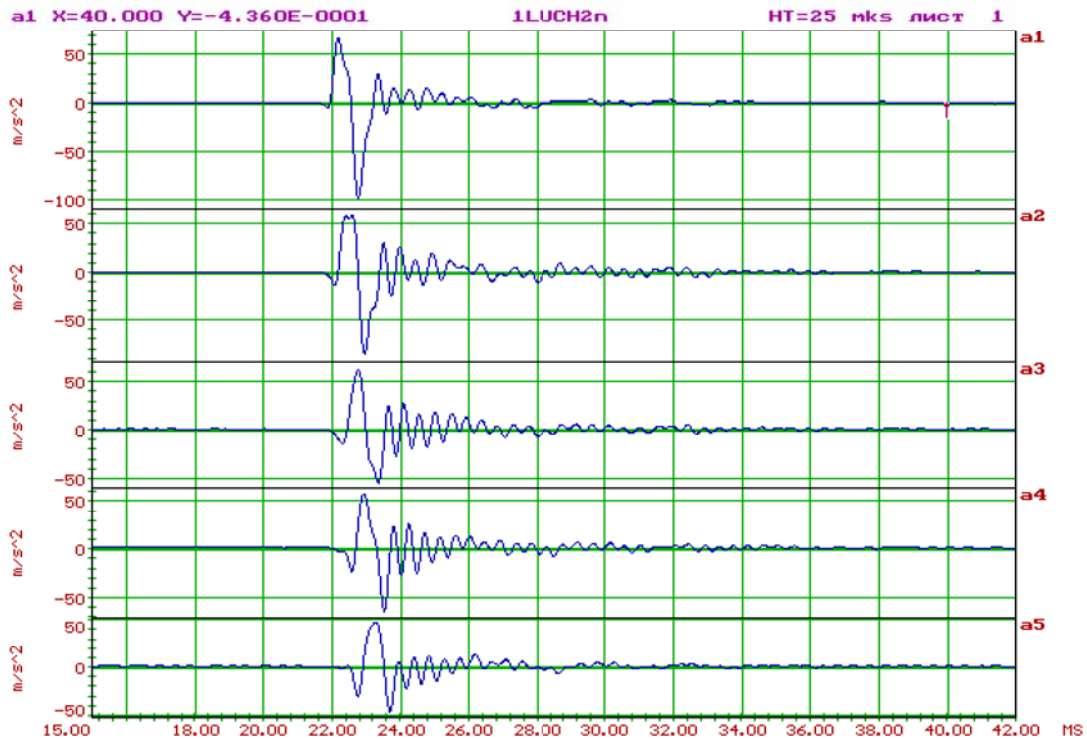


Рис. 3. Пример экспериментальных результатов распространения поверхностных волн

хроматические 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 [7–8]. По каждому выделенному пучку монохроматических волн определяют время распространения волны между точками измерения (рис. 4).

Фазовая скорость распространения волны V и длина волны λ определяются по результатам времени распространения монохроматического пучка волны между точками измерения:

$$V = L / t_{\text{пр}}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

$$\lambda = TV, \text{ м}, \quad (3)$$

где L — расстояние между точками измерения, м; $t_{\text{пр}}$ — время пробега этого расстояния поверхностной волной, с; T — период колебаний в пучке монохроматической волны, с.

Полученный массив данных фазовых скоростей изгибных волн и длин волн образует дисперсионную кривую, используемую для определения свойств материалов конструкций.

Анализ дисперсионных кривых заключается в процессе определения скорости рэлеевской волны в материале конструкций. Существует два метода определения значения этих скоро-

стей: путем экстраполяции в область коротких длин волн и по результатам испытаний в диапазоне частоты при выполнении условия $0,4 < V_{\text{н}}/V_{\text{Р}} < 0,7$ в реальных средах [1, 2, 5, 6]. В этом диапазоне можно определить связь $V_{\text{н}}/V_{\text{Р}}$ в зависимости от λ/H по уравнению

$$\frac{V_{\text{Р}}}{V_{\text{н}}} = 0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}. \quad (4)$$

Тогда среднее значение скорости рэлеевской волны определяется по формуле

$$\bar{V}_{\text{Р}} = \frac{1}{k} \frac{1}{b-a} \sum_{i=1}^k V_{\text{н}}^i \int_a^b (0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H} d(\frac{\lambda}{H})), \quad (5)$$

где k — количество отсчетов фазовых скоростей в диапазоне частоты при выполнении условия $0,4 < V_{\text{н}}/V_{\text{Р}} < 0,7$; a, b — значения отношения λ/H соответственно при $V_{\text{н}}/V_{\text{Р}} = 0,7$ и $0,4$.

Прочность и упругие характеристики материалов конструкций. Для исследуемой конструкции, которая может рассматриваться как однородная плита, дисперсионная кривая основных колебаний изгибных волн строится при решении аналитического уравнения (1). При заданном коэффициенте Пуассона полученным результатом решения трансцендентного урав-

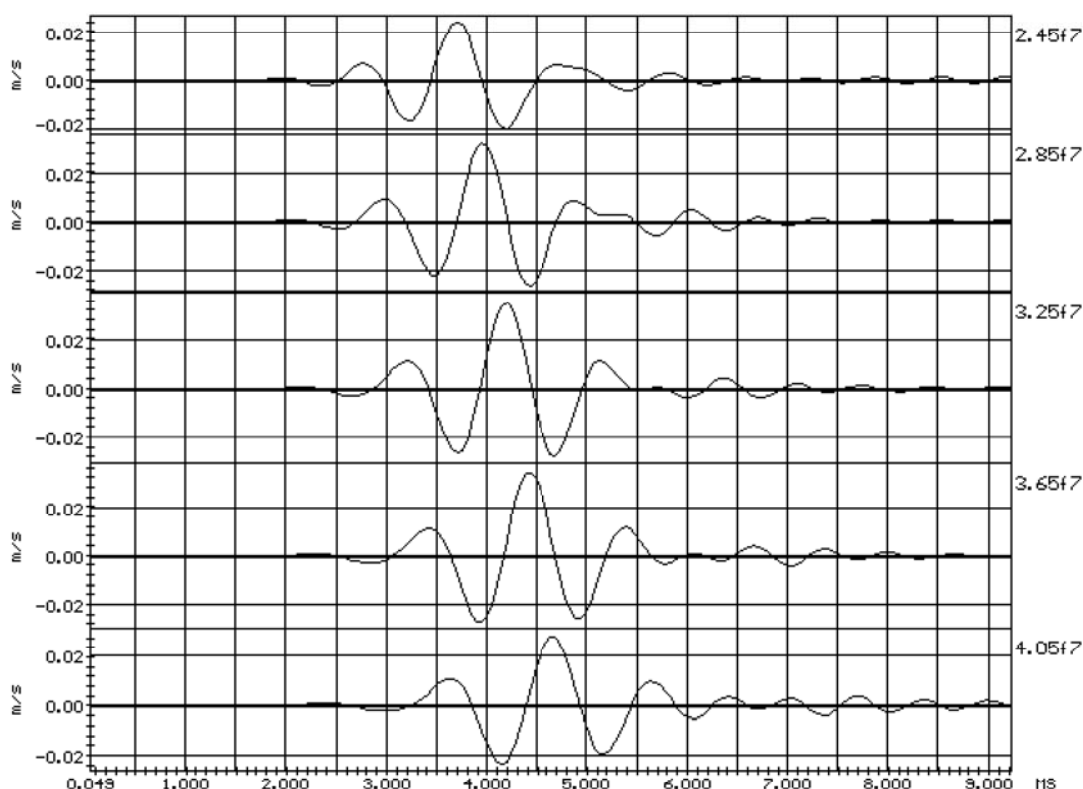


Рис. 4. Пример выделенного пучка монохроматической волны

нения является множество значений λ/H и соответствующих значений V_n/V_R . Дисперсионные кривые однородной плиты для различных значений коэффициента Пуассона приведены на рис. 5.

Согласно теории упругости жесткостные характеристики материалов строительных конструкций определяются с помощью скоростей распространения различных типов волн, полученных в результате испытаний, с учетом плотности, коэффициента Пуассона и т. д. по формулам

$$V_P = V_S \sqrt{\frac{2(1-\mu_d)}{1-2\mu_d}}; \quad (6)$$

$$V_P = V_R \sqrt{\frac{2(1-\mu_d)}{1-2\mu_d} \frac{\mu_d + 1}{0,87 + 1,12\mu_d}}; \quad (7)$$

$$E_d = \rho V_P^2 \frac{(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}{1-\mu_d} = \rho V_R^2 \frac{2(1+\mu_d)^3}{(0,87 + 1,12\mu_d)^2}; \quad (8)$$

$$G_d = \rho V_S^2 = \rho V_P^2 \frac{1-2\mu_d}{2(1-\mu_d)}, \quad (9)$$

где V_S , V_R , V_P — скорости поперечной, рэлеевской и продольной волн соответственно, м/с; E_d — модуль упругости, Па; G_d — модуль сдвига, Па; ρ — плотность, кг/м³; μ_d — динамический коэффициент Пуассона.

Известно, что динамический коэффициент Пуассона по величине больше чем статический. Определение динамического коэффициента Пуассона для кирпичной кладки длительно эксплуатируемого здания является серьезной проблемой, которую мы не рассматриваем в рамках этой статьи. Но учитывая, что $\mu_d = 0,25-0,30$, и используя формулу (7) и (8), можно утверждать, что ошибка в оценке скорости продольной волны и модуля упругости не может быть выше, чем $\pm 2-3\%$.

Нормативная прочность кладки по скорости продольной волны оценивается с помощью табл. 1 [8-9].

Расчетная прочность кладки определялась по формуле

$$R_p = R_n / K_n, \quad (10)$$

где K_n — коэффициент надежности, принимаемый для кладки из глиняного кирпича равным 1,4.

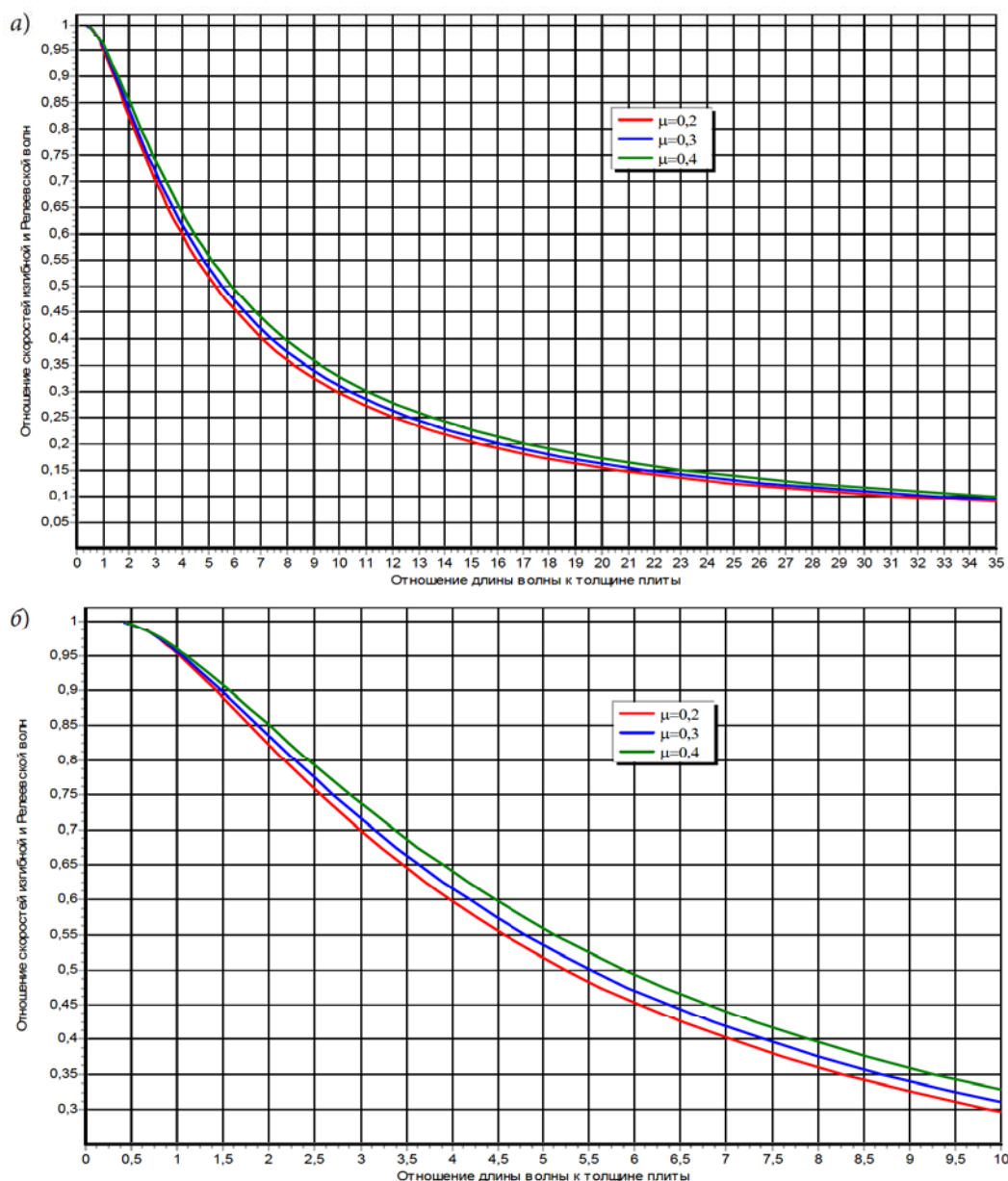


Рис. 5. Графики дисперсионных кривых при различных значениях коэффициента Пуассона: а — участок λ/H от 0 до 30; б — участок λ/H от 0 до 10

Таблица 1

Качественная классификация нормативной прочности кладки по скоростям продольных волн сейсмоакустического диапазона частот

Характеристика кладки	R_n , МПа	V_p , м/с
Очень прочная	4...4,5	> 3000
Прочная	3...4	2000...3000
Пониженной прочности	2...3	1500...2000
Низкой прочности	1,5...2	1000...1500
Слабой прочности	1...1,5	500...1000
Очень слабой прочности	0,5...1	~500

Анализ результатов испытаний. Оценка прочности кирпичной кладки стен выполнялась в соответствии со схемой расположения измерительных створов (лучи 1–4), приведенной на рис. 6 и 7, для зданий по адресам: Санкт-Петербург, Пионерская ул., дом 61 и Малая Зеленина ул., дом 6А.

Дисперсионные кривые поверхностных волн в стенах показаны на рис. 7, а результаты оценок прочности кладки после обработки данных приведены в табл. 2.

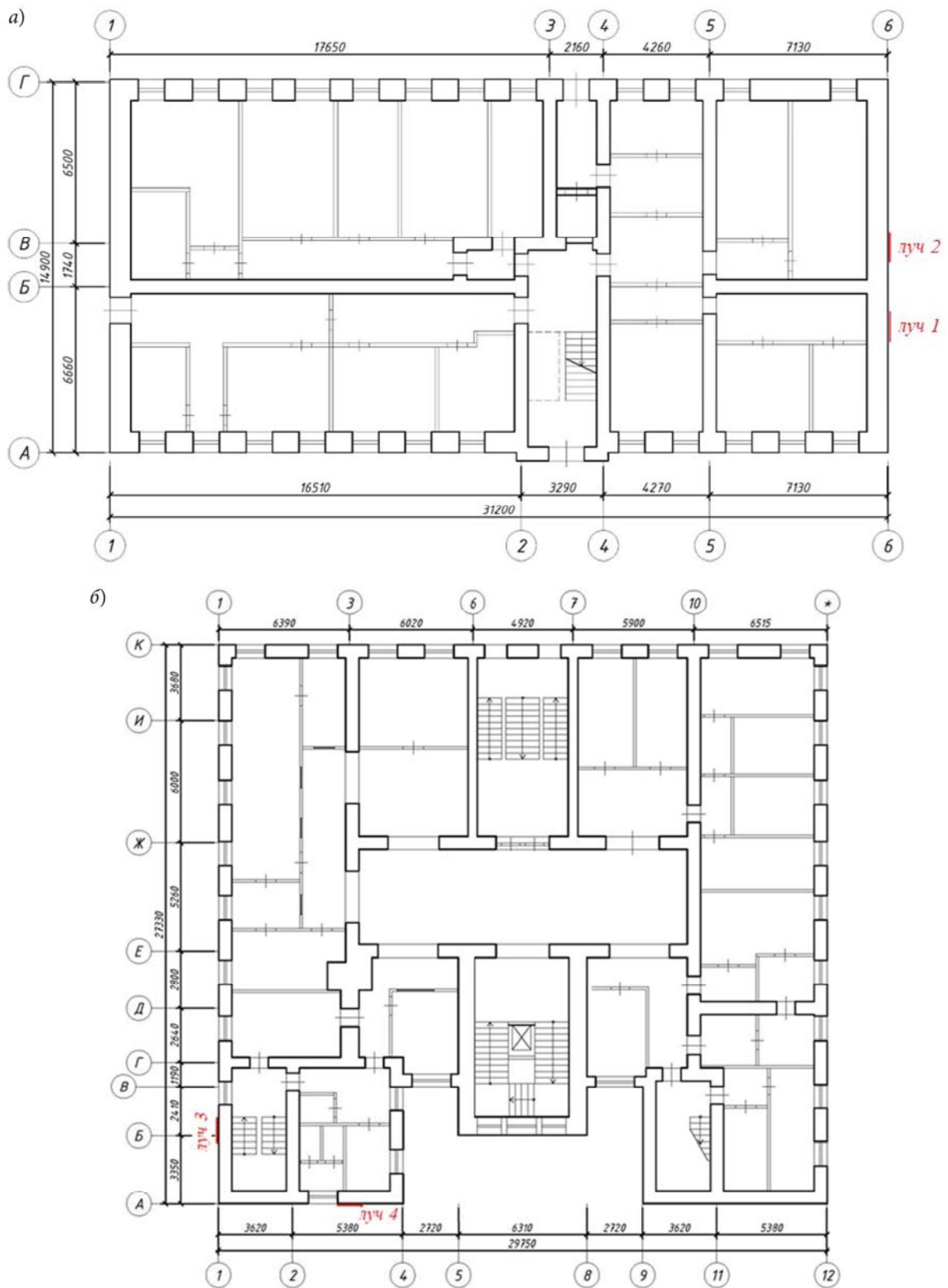


Рис. 6. Схемы зон инструментального обследования кирпичной кладки стен зданий на планах типового этажа: а — здание № 1 (Пионерская ул., 61); б — здание № 2 (Малая Зеленина ул., 6А)

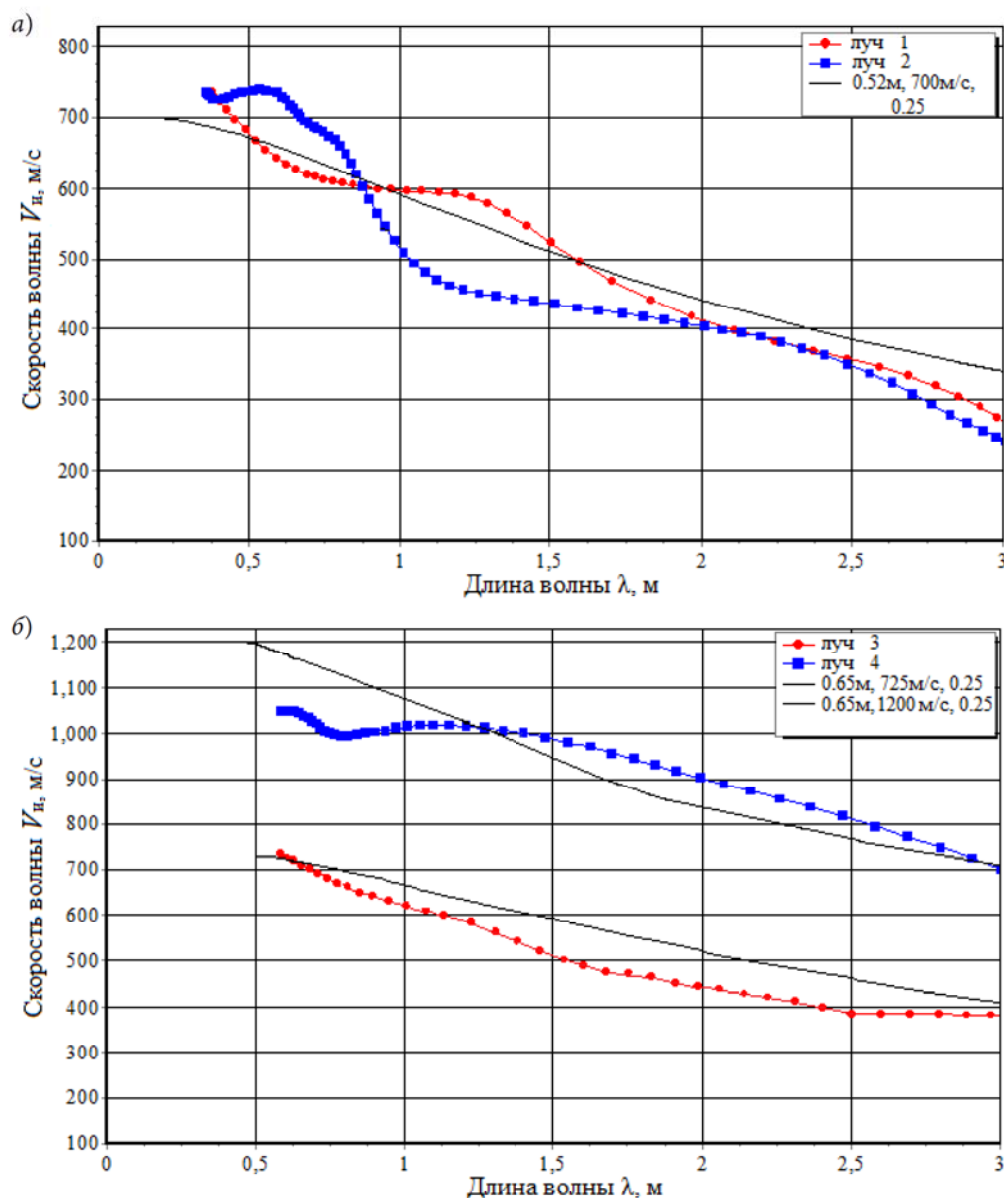


Рис. 7. Дисперсионные кривые поверхностных волн в кладке стен: а — здания № 1 (толщина кирпичных стен 520 мм); б — здания № 2 (толщина кирпичных стен 650 мм)

По результатам обследования построены дисперсионные кривые и определены скорости распространения рэлеевской волны. По скорости рэлеевской волны в материале стен, используя теорию упругости, легко найти значение скорости продольной волны и определить упругие характеристики материалов конструкций. Результаты измерений, приведенные в табл. 2, однозначно свидетельствуют об эффективности предложенной методики, особенно в части, ка-

сающейся стеновых конструкции (конструкций плитного типа).

Заключение

1. Разработана методика для оценки прочности материалов строительных конструкций с использованием фазовых скоростей изгибных волн по двум способам (путем экстраполяции в область коротких длин волн и по результатам испытаний в диапазоне частоты при выполнении условия $0,4 < V_n/V_R < 0,7$).

Оценка прочности кладки зданий по скоростям поверхностных волн

Обследуемые здания	Диспер. кривые	V_R , м/с	$-V_R$, м/с	Погрешность, %	V_p , м/с	V_p , м/с	R_n , МПа	R_n , МПа	Погрешность, %	Характеристика кладки
Пионерская ул., 61	Луч 1	700	683	2,5	1316	1284	1,82	1,78	2,2	Низкой прочности
	Луч 2	700	652	7,4	1316	1226	1,82	1,73	5,2	Низкой прочности
Малая Зеленина ул., 6А	Луч 3	725	672	7,9	1363	1363	1,86	1,76	5,7	Низкой прочности
	Луч 4	1200	1297	7,5	2256	2256	3,26	3,44	5,2	Прочная

2. Упругие и прочностные характеристики материала конструкции определяются следующим образом:

- первым этапом является построение теоретической модели реакции строительных конструкций на действие ударной силы;
- на втором этапе экспериментально определяют реакцию поверхности строительных конструкций на действие ударной силы;
- на последнем этапе проводится обработка результатов испытания, сравнение экспериментальных дисперсионных кривых изгибных волн с расчетными.

3. Предложена формула (5) для определения скоростей распространения рэлеевской волны. При сравнении с методом линейной экстраполяции полученные результаты сходятся с удовлетворительной погрешностью.

4. Приведены результаты обследования кирпичных стен в существующих зданиях и построены дисперсионные кривые скоростей распространения поверхностных волн в зависимости от длин волн. По корреляционным зависимостям между скоростью распространения продольной волны и прочностью определяются фактические прочностные характеристики кирпичных кладок, которые в качестве исходных данных используются для проектирования усиления или проведения реконструкции.

Библиографический список

1. Алейшин Н. Н. Электросейсмоакустические методы обследования зданий. М.: Стройиздат, 1982. 156 с.
2. Джонс Р., Фэжзоару И. Неразрушающие методы испытаний бетонов / пер. с рум. В. М. Маслобойщикова. М.: Стройиздат, 1974. 296 с.
3. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.

4. Кочнев Н. И., Чумак М. В. Обследование, испытание и усиление строительных конструкций зданий и сооружений. Краснодар: Кубанский гос. аграрный ун-т, 2013. 68 с.

5. Савин С. Н., Данилов И. Л. Сейсмобезопасность зданий и территорий. СПб.: Лань, 2015. 240 с.

6. 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.

7. Фан Ч. Д., Савин Д. А. Метод определения жесткостных характеристик строительных конструкций с использованием изгибных волн // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 3 (92). С. 28–34.

8. Савин С. Н. Использование упругих колебаний различных длин волн для оценки динамических параметров зданий и сооружений и прочности каменной кладки // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 4. С. 43–54.

9. Деркач В. Н., Жерносек Н. М. Методы оценки прочности каменной кладки в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений // Вестник Белорусско-Российского университета. 2010. № 3 (28). С. 135–142.

10. Гринченко В. Т., Мелешко В. В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. Киев: Наукова думка, 1981. 284 с.

11. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.

12. Ильяшенко А. В., Кузнецов С. В. Теоретические аспекты применения волн Лэмба в неразрушающей диагностике слоистых анизотропных сред // Дефектоскопия. 2017. № 4. С. 3–21.

13. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. 2-е изд. М.: Наука, 1973. 343 с.

14. Achenbach J. D. Wave propagation in elastic solids. Amsterdam; London: North-Holland PublCo, 1973. 430 с.

15. Желдаков Д. Ю. Анализ результатов обследования прочности наружных стен здания // International Scientific Review. 2016. № 12 (22). С. 16–19.

16. Ананьев А. И., Лобов О. И. Керамический кирпич и его место в современном строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 10. С. 62–64.

17. Житушкин В. Г., Кучеров В. Н. Определение прочности кладки из кирпича в натуральных условиях // Жилищное строительство. 2001. № 9. С. 11–12.

18. Дзенис В. В. Применение ультразвуковых преобразователей с точечным контактом для неразрушающего контроля. Рига: Зинатне, 1987. 263 с.

19. Brozovsky J., Zach J. Non-destructive Testing of Solid Brick Compression Strength in Structures // IV Conferencia Panamericana de END. Buenos Aires. Octubre 2007. URL: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/1.pdf> (дата обращения 26.10.2022).

References

1. Aleshin N. N. *Elektroseismoakusticheskie metody obsledovaniya zdaniy* [Electro-seismo-acoustic methods for surveying buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 156 p.

2. Dzhons R., Fekeoar I. *Nerazrushayushchie metody ispytaniy betonov* [Non-destructive methods of testing concrete]. Transl. from Romanian by Masloboyshchikov V. M. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974, 296 p.

3. Viktorov I. A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh* [Sound over-surface waves in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 287 p.

4. Kochnev N. I., Chumak M. V. *Obsledovanie, ispytanie i usilenie stroitel'nykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy* [Inspection, testing and strengthening of structures of buildings and structures]. Krasnodar, Kubanskiy gos. agrarniy un-t Publ., 2013, 68 p.

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

6. Sitnikov I. V., Zhilenkov A. G., Titova L. I. *Primenenie metoda poverkhnostnykh voln dlya obsledovaniya stroitel'nykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy* [Application of the method of over-surface waves for the inspection of buildings' and structures' designs]. *Stroitel'stvo i arkhitektura. Seriya: Seysmostoykoe stroitel'stvo – Construction and architecture. Series: Earthquake-resistant construction*, 1996, no 6, iss. 6, pp. 35–40.

7. Fan Ch. D., Savin D. A. *Metod opredeleniya zhestkostnykh kharakteristik stroitel'nykh konstruksiy s ispol'zovaniem izgibnykh voln* [Method for assessing the rigidity characteristics of building structures using flexural waves]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 3 (92), pp. 28–34.

8. Savin S. N. *Ispol'zovanie uprugikh kolebaniy razlichnykh dlin voln dlya otsenki dinamicheskikh parametrov zdaniy i sooruzheniy i prochnosti kamennoy*

kladki [The using of elastic oscillations of various wavelengths to assess the dynamic parameters of buildings and structures and the strength of masonry]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Seismic-resistant construction. Safety of structures*, 2017, no. 4, pp. 43–54.

9. Derkach V. N., Zhernosek N. M. *Metody otsenki prochnosti kamennoy kladki v otechestvennoy i zarubezhnoy praktike obsledovaniya zdaniy i sooruzheniy* [Methods for assessing the strength of masonry in domestic and foreign practice of surveying buildings and structures]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta – Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2010, no. 3 (28), pp. 135–142.

10. Grinchenko V. T., Meleshko V. V. *Garmonicheskie kolebaniya i volny v uprugikh telakh* [Harmonic oscillations and waves in elastic bodies]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981, 284 p.

11. Novatskiy V. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Mir Publ., 1975, 872 p.

12. Il'yashenko A. V., Kuznetsov S. V. *Teoreticheskie aspekty primeneniya voln Lemba v nerazrushayushchey diagnostike sloistykh anizotropnykh sred* [Theoretical aspects of applying the Lamb waves in non-destructive diagnostics of layered anisotropic media]. *Defektoskopiya – Defectoscopy*, 2017, no. 4, pp. 3–21.

13. Brekhovskikh L. M. *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered media]. 2-nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1973, 343 p.

14. Achenbach J. D. *Wave propagation in elastic solids*. Amsterdam; London, North-Holland Publ., 1973, 430 p.

15. Zheldakov D. Yu. *Analiz rezul'tatov obsledovaniya prochnosti naruzhnykh sten zdaniya* [Analysis of the results of the external walls durability survey]. *International Scientific Review*, 2016, no. 12 (22), pp. 16–19.

16. Anan'ev A. I., Lobov O. I. *Keramicheskii kirpich i ego mesto v sovremennom stroitel'stve* [Ceramic brick and its place in modern construction practice]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2014, no. 10, pp. 62–64.

17. Zhitushkin V. G., Kucherov V. N. *Opredelenie prochnosti kladki iz kirpicha v naturnykh usloviyakh* [Assessing the strength of brick masonry in natural conditions]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2001, no. 9, pp. 11–12.

18. Dzenis V. V. *Primenenie ul'trazvukovykh preobrazovateley s tochechnym kontaktom dlya nerazrushayushchego kontrolya* [Application of ultrasonic transducers with point contact for non-destructive testing]. Riga, Zinatne Publ., 1987, 263 p.

19. Brozovsky J., Zach J. *Non-destructive Testing of Solid Brick Compression Strength in Structures*. Proceedings of the IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Octubre 2007. Available at: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/1.pdf> (accessed: 26.10.2022).