

Оценка прочностных характеристик кирпичной кладки с использованием изгибных волн

С.Н. Савин¹, Ч.Д. Фан¹, А.О. Хегай¹, В.Т. Ле²

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург

²Данангский архитектурный университет

Аннотация: По результатам экспериментальных исследований распространения изгибных волн рассмотрена способность разработанной методики к оценке прочности кирпичной кладки. Проведен сравнительный анализ прочностей кладки по разным методикам (формула Л.И. Онищика, Еврокод 6). Исходя из корреляционных зависимостей между скоростью распространения упругих волн и прочностью кладки, представленные практические данные позволили перспективно оценить метод изгибных волн в обследовании зданий и сооружений.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, изгибные волны, упругие волны, скорость изгибных волн, прочность кладки.

Введение

На сегодняшний день проблема обследования зданий и сооружений заключается в сборе необходимой информации для определения технического состояния конструкций, что позволяет обеспечить их безопасную эксплуатацию, реконструкцию или усиление. В настоящее время оценка физико-механических характеристик кирпичных кладок может осуществляться на основе анализа отдельных компонентов. Согласно СП 15.13330.2020, для определения прочности каменных кладок при сжатии используется формула, предложенная профессором Л.И. Онищиком [1]. Также по Eurocode 6 представлен расчет прочности каменной кладки на сжатие по прочности составляющих.

Для приблизительного контроля прочности кирпичной и растворной смеси используются различные неразрушающие методы. В настоящее время, согласно действующим стандартам, существуют методы на основе ультразвуковых волн, но используются они только для силикатных кирпичей. Кроме того, существует также популярный метод контроля прочности

кирпича и раствора – метод ударного импульса [2, 3]. Но экспериментальные исследования показали, что точность результатов прочности по этой методике не очень высока [4]. При использовании метода ударного импульса прочностные характеристики определяются только на наружной поверхности. А данные показатели могут существенно различаться по разным причинам (циклические процессы заморозки и оттаивания, частные резкие перепады влажности и температурного режима, эрозия в числе неблагоприятных факторов).

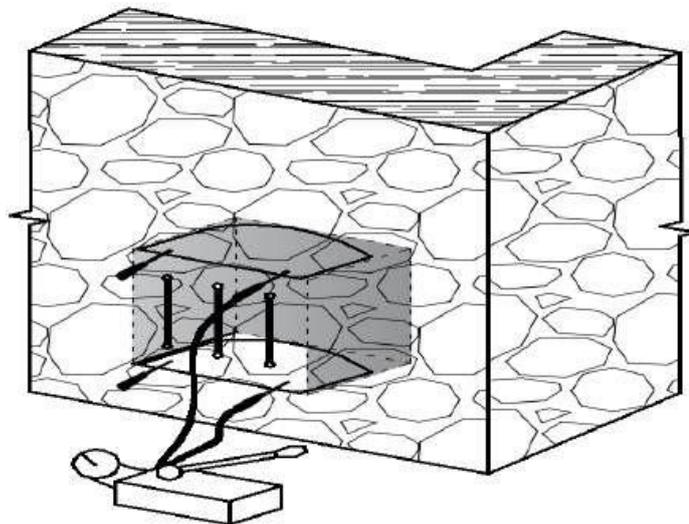


Рис. 1. Схема испытаний кладки методом «Flat-Jack-Tests»

В разных работах, например, в исследованиях С.В. Зубкова, А.В. Улыбина, С.Д. Федотова [5], М. Guadagnuolo, М. Aurilio, А. Basile, G. Faella [6] предлагается использовать метод плоских домкратов (рис. 1). Большинство ученых считали, что при использовании метода с помощью плоского прессы (Flat – Jack – Test) можно получить наиболее достоверные данные о характеристиках кладки. Тем не менее, имеются существенные препятствия, ограничивающие его использование, например, метод значительно повреждает целостность участка измерения. Для проведения этого метода также тратятся необходимые высокие расходы на оборудование и подготовительные работы [4].

Проведенный анализ преследует цель выявить наиболее сильные стороны используемых методов, чтобы применить их на практике.

Материалы и метод

Метод, основанный на изгибных волнах, предполагает связь физико-механических характеристик материалов со скоростями распространения упругих волн. Нормативная прочность кладки по скорости продольной волны определяется с помощью таблицы 1 [7].

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

Расчетное сопротивление кладки определяется по формуле

$$R_p = R_n / K_n, \quad (1)$$

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

Согласно теории упругости и исследованиям английского ученого Г. Лэмба, скорости основных упругих волн представляются по следующим соотношениям [8, 9]:

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

$$V_P = V_R \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}} \cdot \frac{\mu+1}{0,87+1,12\mu} \quad (3)$$

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

где V_S , V_R , V_P — скорости поперечной, рэлеевской и продольной волн; V_u — скорость изгибных волн; μ — коэффициент Пуассона; H — толщина конструкции; λ — длина волны.

Решение уравнения (4) представлено в виде графика зависимости скорости от длин волн (см. рис. 2). Из уравнения (4) также можно определить скорости рэлеевской волны в диапазоне $0,4 < V_u/V_R < 0,7$ по следующим формулам [9]:

$$\frac{V_R}{V_u} = 0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H} \quad (5)$$

$$\bar{V}_R = \frac{b-a}{k} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k V_u^i}{\int_a^b \frac{1}{0,63 + 0,26 \frac{\lambda}{H}} d\left(\frac{\lambda}{H}\right)} \quad (6)$$

Где: k - количество отсчетов фазовых скоростей в диапазоне частоты при выполнении условия $0,4 < V_u/V_R < 0,7$; a , b - значения отношения λ/H , соответственно, при $V_u/V_R = 0,7$ и $0,4$.

В случае $0,2 < V_u/V_R < 0,8$ по (5) и (6) также можно использовать для определения скорости распространения рэлеевской волны с погрешностью менее 2-3%.

На основе теоретического анализа была проведена разработка методики испытания для оценки прочностных характеристик строительных материалов конструкций. При этом экспериментальное исследование

распространения изгибных волн в виде графика дисперсионных кривых изгибных волн выполняется по следующим этапам:

- импульсное возбуждение и регистрация изгибных волн в конструкции;
- Обработка данных для определения времени распространения волны между точками измерения, фазовой скорости и, соответственно, периода волны.

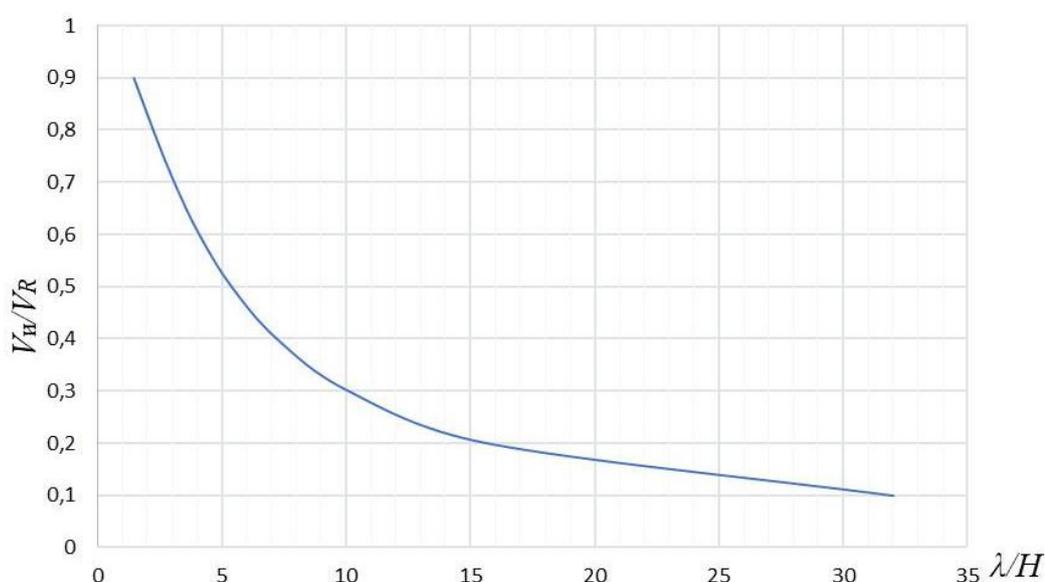


Рис. 2. График дисперсионной кривой при значении коэффициента Пуассона $\mu = 0,25$

По разработанной методике испытания акселерометры размещаются в линию с постоянным шагом, который не превышает минимальную длину изгибных волн. Для получения колебаний различных длин волн удар наносится непосредственно на поверхность конструкции или через резиновую прокладку.

В исследовании [10] было установлено, что для получения надежных результатов измерений скоростей распространения изгибных волн рекомендуется использовать волны с частотным диапазоном, при котором отношение λ/H не превышает 10. Например, для кирпичных стен и бетонных

плит толщиной до 1 м, где скорости распространения изгибных волн колеблются от нескольких сотен до нескольких тысяч м/с, измерительный диапазон частот составляет от нескольких десятков Гц до 3-4 кГц. Практикование метода на конструкциях показало, что при использовании легкого ударника из деревянных брусков без прокладки можно возбуждать волны в диапазоне частот от 25-30 Гц до 1,5-2 кГц. А при применении металлического ударника с тонкой прокладкой из брезента или жесткой пластмассы возможно расширение диапазона возбуждаемых колебаний до 3-5 кГц. Схема проведения экспериментального исследования представлена на рисунке 3.

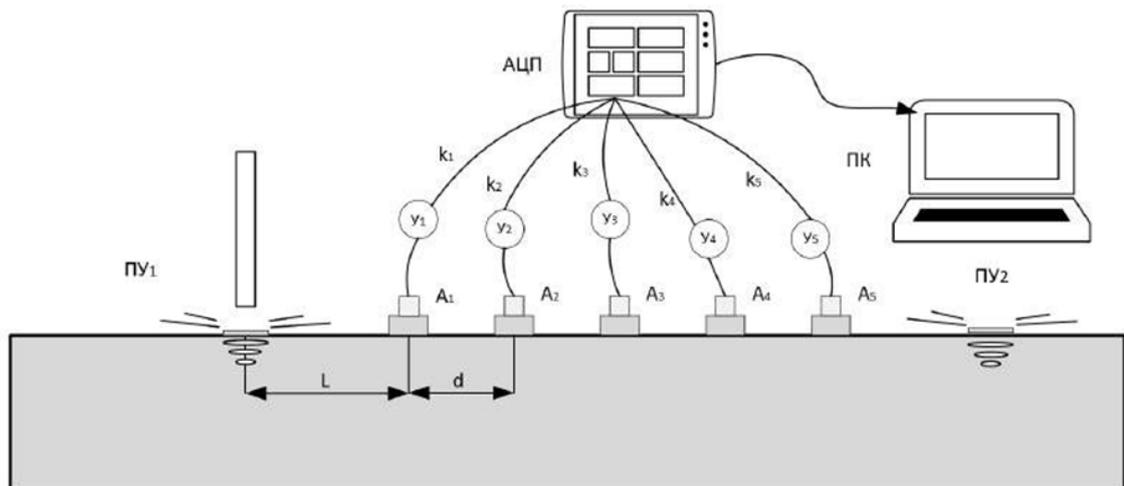


Рис. 3. Схема испытания

A_1 - A_5 - датчики; ПУ1, 2 - пункты ударов; k_1 - k_5 - антивибрационные кабели;
 Y_1 - Y_5 - согласующие усилители; АЦП - аналого-цифровой преобразователь;
ПК – компьютер;

Исходные реализации (см. рис. 4) оцифровываются и фильтруются для разделения на отдельные пучки монохроматических волн. По каждому пучку строятся годографы распространения волны (см. рис. 5) и определяются скорости, периода и длины волны. Эти данные используются для построения дисперсионных кривых скоростей в зависимости от длины волн. Затем, по корреляционным зависимостям между прочностью и скоростям

распространения упругих волн, определяются прочностные характеристики строительных конструкций.

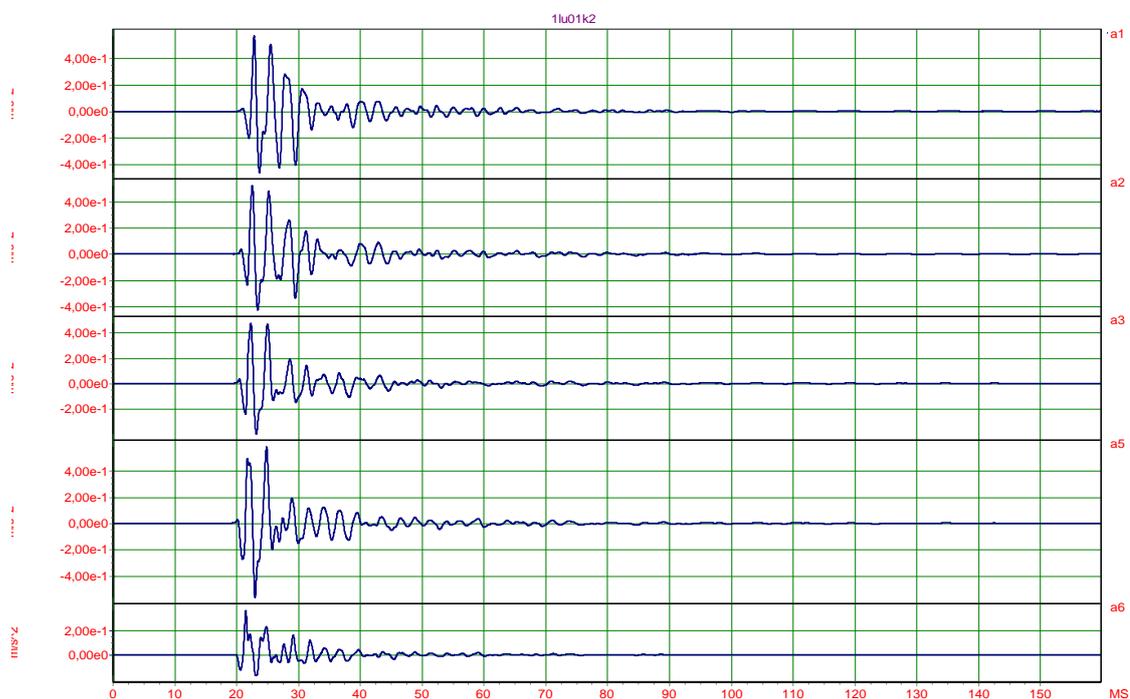


Рис. 4. Пример исходных реализаций

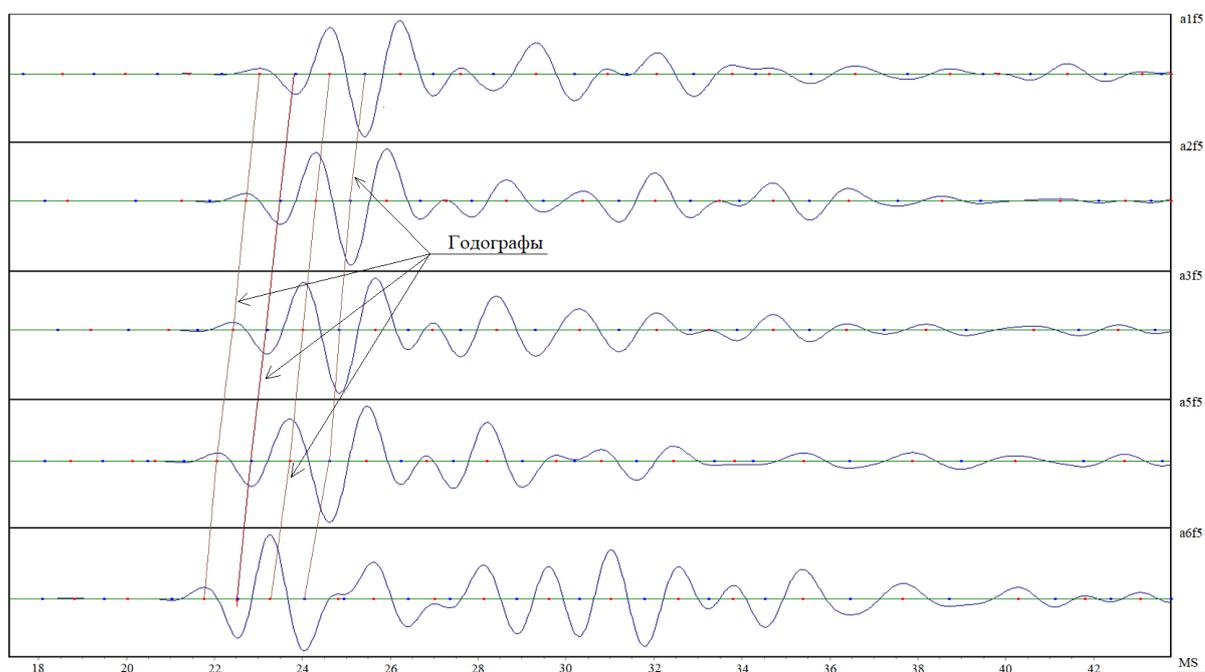


Рис. 5. Пример пучка монохроматических волн

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

При обследовании объекта по адресу: Ленинградская область, Выборгский район, ул. Смолячковская, д. 43 с целью определения прочности на осевое сжатие для кирпичных кладок толщиной 0,25 м авторами был произведен отбор проб. При этом, для оценки прочности кирпичей необходимо отобрать образцы по ГОСТ 8462-85. А для испытания растворной смеси и изготовления образцов отбирают пробы по требованиям ГОСТ 5802-86. Процесс испытания кирпича керамического и растворной смеси на сжатие представлены на рис. 6.



Рис. 6. Эксперименты кирпича керамического и растворной смеси на сжатие

Необходимо учесть, что значения прочности кирпича и раствора, определяемые по ГОСТ 8462–85 и 5802–86, имеют меньшие значения, чем по EN 772-1:2000 и 1015-11:1999. В работе [11] уменьшение значения прочности раствора может достигать 30%, а это понижение для сплошного керамического кирпича – 10%. При этом, для определения прочности

кирпича и раствора по EN 772-1:2000; 1015-11:1999 необходимо умножать результаты испытания по ГОСТ 8462–85; 5802–86, соответственно, на коэффициенты $k_1 = 1,1$ и $k_2 = 1,3$. Результаты после обработки данных испытаний представлены в табл. 2.

Оценка прочностных характеристик кирпичной кладки с использованием изгибных волн проводилась согласно схеме, представленной на рис. 3. Проведение испытаний на объекте с комплексом оборудования представлено на рис. 7, экспериментальные дисперсионные кривые распространения изгибных волн в кладке представлены на рис. 8.



Рис. 7. Проведение испытания с оборудованием

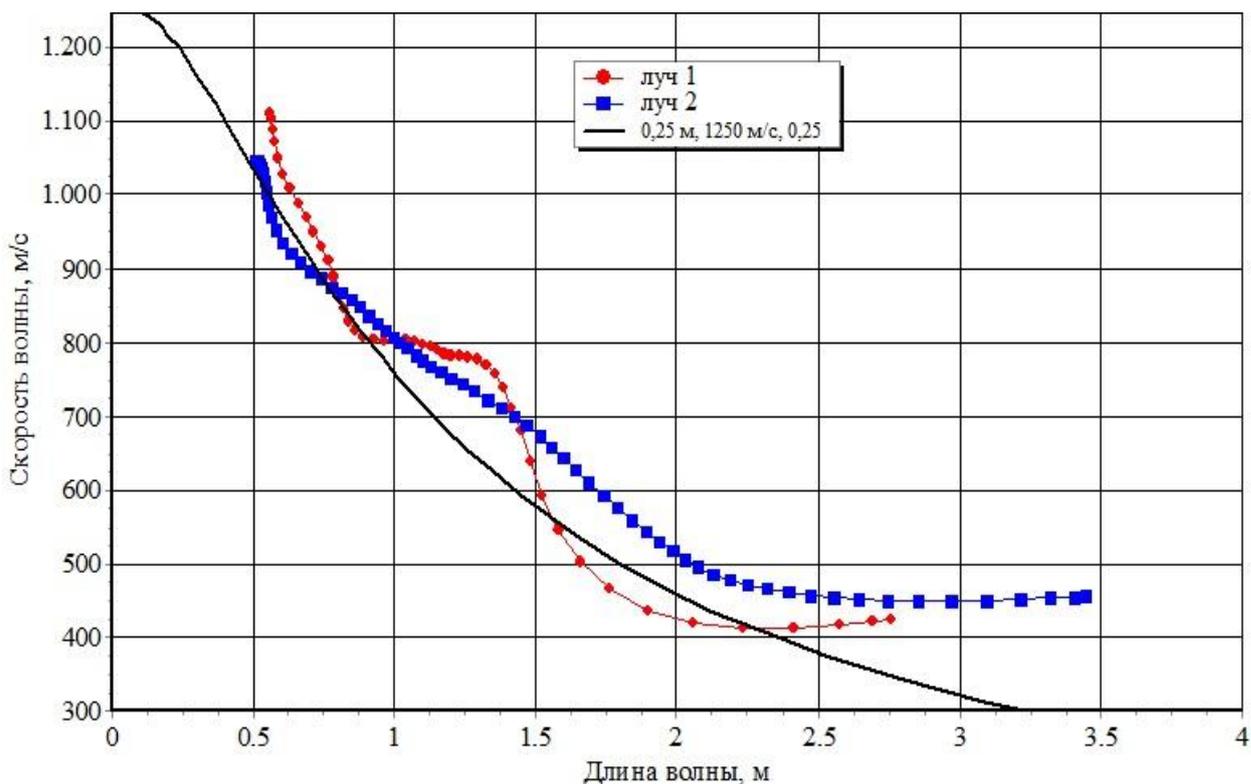


Рис. 8. Дисперсионные кривые изгибных волн

Таблица 2

Оценка прочностных характеристик кладки стен

Обслед. объект	R_1 МПа (кирпич)	R_2 МПа (раствор)	R МПа СП 15.13330.2020	f_d МПа Eurocode 6	Дисп. кривые	λ , м	\bar{V}_R м/с	\bar{V}_p м/с	R_p МПа	\bar{R}_p МПа
Ленинградская область, Выборгский район, ул. Смолячковская, д. 43	20,3	17,85	3,06	3,77	Луч 1	0,5-1	1319	2483	2,49	2,48
						1-1,5	1460	2749	2,68	
						1,5-2	1225	2306	2,36	
						2-2,5	1236	2327	2,38	
					Луч 2	0,5-1	1287	2423	2,45	2,58
						1-1,5	1430	2692	2,64	
						1,5-2	1447	2724	2,66	
						2-2,5	1395	2626	2,59	

В табл. 2 приведены результаты лабораторных испытаний по определению прочности кладки и результаты оценок по методу изгибных

волн. Как и в большинстве исследований бывает существенная разница между результатами при определении прочности кладки по формуле Онищика и Eurocode 6 [11, 12]. Но, при определении прочности кладки методом с использованием изгибных волн, соблюдается удовлетворительное совпадение с результатом расчета по формуле Онищика. Различия объясняются коэффициентом вариации прочности кирпича и раствора, степенью ухода за кладкой, а также разницей условий проведения испытаний в лаборатории и на объекте.

Заключение

Предлагаемый метод с применением изгибных волн позволяет решить проблему оценки технического состояния кирпичных кладок по корреляционным зависимостям между скоростью распространения упругих волн и прочностью на измерительных створах большой протяженности. Проведен сравнительный анализ полученных при полевых исследованиях результатов с другими методиками (формула Л.И. Онищика, Eurocode 6) по определению прочности кирпичной кладки. Представленные практические результаты позволили оценить перспективы метода с использованием изгибных волн при обследовании зданий и сооружений. В дальнейшем, при проведении большего количества измерений кладки, появится возможность привести корректировочный коэффициент в соответствие с действующим нормативом для определения прочности кирпичных кладок.

Литература

1. Онищик Л.И. Прочность и устойчивость каменных конструкций. Москва–Ленинград: Главредстройлит, 1937. 292 с.
2. Гроздов В.Т. Техническое обследование строительных конструкций, зданий и сооружений. Санкт-Петербург: «Центр качества строительства», 1998. 127 с.

3. 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. 135-143.

4. Ulybin A.V., Zubkov S.V. Control methods for strength of ceramic bricks in the inspection of buildings // Magazine of Civil Engineering. 2012. 29(3). Pp. 29-34. DOI: 10.5862/MCE.29.3.

5. Zubkov S.V., Ulybin A.V., Fedotov S.D. Assessment of the mechanical properties of brick masonry by a flat-jack method // Magazine of Civil Engineering. 2015. 60(8). Pp. 20–29. DOI: 10.5862/MCE.60.3.

6. Guadagnuolo M, Aurilio M, Basile A, Faella G. Modulus of Elasticity and Compressive Strength of Tuff Masonry: Results of a Wide Set of Flat-Jack Tests. Buildings. 2020; 10(5):84. URL: doi.org/10.3390/buildings10050084

7. Алешин Н. Н. Электросейсмоакустические методы обследования зданий. М.: Стройиздат, 1982. 156 с.

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. Фан Ч.Д. Применение метода с использованием изгибных волн для обследования плитных и стеновых конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 12. С. 41–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8 12-41-53

10. Савин С. Н., Хегай А. О., Фан Ч. Д., Ле В. Ч. Оптимизация выбора диапазона длин изгибных волн для обследования конструкции плитного типа // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 3 (104). С. 44–50.

11. Марчюкайтис Г. В., Йонайтис Б. Б., Валивонис Ю. С., Гнип И. Я. Оценка прочности и деформативности каменной кладки при сжатии согласно



СНиП II-22-81 и Eurocode 6 // Строительные материалы. 2004. № 11. - С. 48-49.

12. Десятова П.Л., Дронов Д.С., Ненашев В.С. Графическое сравнение формул расчета прочности на сжатие кирпичной кладки // Alfabuild. 2019. № 12. С. 85–97. DOI: 10.34910/ALF.12.9

References

1. Onishhik L.I. Prochnost` i ustojchivost` kamenny`x konstrukcij [Strength and stability of stone structures]. Moskva–Leningrad: Glavredstroylit, 1937. 292 p.

2. Grozdov V.T. Texnicheskoe obsledovanie stroitel`ny`x konstrukcij, zdanij i sooruzhenij [Technical inspection of building structures, buildings and structures]. Sankt-Peterburg: " Centr kachestva stroitel`stva", 1998. 127 p.

3. Derkach V.N. Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta. 2010. № 3 (28). Pp. 135-142.

4. Ulybin A.V., Zubkov S.V. Magazine of Civil Engineering. 2012. 29(3). Pp. 29-34. DOI: 10.5862/MCE.29.3.

5. Zubkov S.V., Ulybin A.V., Fedotov S.D. Magazine of Civil Engineering. 2015. 60(8). Pp. 20–29. DOI: 10.5862/MCE.60.3.

6. Guadagnuolo M, Aurilio M, Basile A, Faella G. Buildings. 2020; 10(5):84. URL: doi.org/10.3390/buildings10050084

7. Aleshin N.N. E`lektrosejsmoakusticheskie metody` obsledovaniya zdanij [Electroseismoacoustic methods of building inspection]. Moskva: Stroyizdat, 1982. 156 p.

8. Savin S.N. Sejsmostojkoe stroitel`stvo. Bezopasnost` sooruzhenij. 2017. № 4. pp. 43-54.

9. Fan Ch.D. Vestnik BGTU im. V.G. Shuxova. 2023. № 12. Pp. 41–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-41-53

10. Savin S.N., Khagai A.O., Fan Ch.D., Le V.Tr. Vestnik grazhdanskix inzhenerov. 2024. № 3 (104). Pp. 44-50.



11. Marchyukaitis G.V., Jonaitis B.B., Valivonis Y.S., Gnip I.Ya. Stroitel`ny`e materialy`. 2004. № 11. Pp. 48-49.
12. Desyatova P.L., Dronov D.S., Nenashev V.S. Alfabuild. 2019. № 12. pp. 85-97. DOI: 10.34910/ALF.12.9

Дата поступления: 28.09.2024

Дата публикации: 19.10.2024