

УДК 539.3

**ОБ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ БЛОЧНЫХ СРЕД
НА МОДЕЛЬНОМ ПРИМЕРЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
КИРПИЧНОЙ СТЕНЫ**

Е. Н. Шер, А. Г. Черников

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: ensheer@gmail.com, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлены результаты модельного исследования возможности определения параметров структуры блочной среды сейсмоакустическим методом. Моделирование проводилось на фрагменте кирпичной стены. Регистрировались осциллограммы ускорений колебаний отдельных кирпичей, возбуждаемых в стене при импульсном нагружении. По данным экспериментов определялись скорости распространения волн и их спектральный состав. Показано, что определенное ранее в одномерных экспериментах соотношение, связывающее значения скорости распространения низкочастотной маятниковой волны, ограничивающей ее спектр частоты и продольного размера блоков, выполняется и на двухмерной модели блочной среды — кирпичной стене. Полученный результат позволяет определять размер характерных блоков породного массива по данным сейсмического зондирования.

Блочные горные породы, сейсмические волны, импульсное нагружение, экспериментальное моделирование, маятниковая волна, скорость волны, спектр, размер блоков

DOI: 10.15372/FTPRPI20200402

Согласно [1], породный массив представляет собой систему вложенных друг в друга блоков разного масштабного уровня, разделенных прослойками с более слабой трещиноватой структурой. Деформирование блочного массива в статике и динамике происходит за счет деформации таких податливых прослоек, что приводит к появлению в сейсмическом отклике на импульсное воздействие низкочастотных волн маятникового типа [2–6].

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования волноводных свойств одномерных моделей блочных сред — цепочек упругих стержней, разделенных податливыми прослойками [7–9]. Показано, что для изучения распространения волн в таких средах подходящим приближением является представление о движении блоков как недеформируемых тел. При этом достаточно точно описываются возникающие при импульсном воздействии низкочастотные составляющие волны. Значительное развитие получили основанные на этом подходе модели распространения возмущений в блочных средах регулярного строения в двухмерной [10–12] и трехмерной постановке [13–15].

Из сравнения расчетов по разработанным моделям с экспериментом следует, что скорость распространения маятниковых волн, их спектральный состав определяются массой блоков, их размерами и существенно зависят от реологических свойств прослоек. Наличие взаимосвязи размеров блоков, их упругих свойств, деформационных характеристик прослоек между блоками, скорости распространения сейсмических волн и их спектрального состава открывает возможность определять параметры структуры блочного массива по данным сейсмического зондирования. Существует много методов определения параметров структуры породного массива [16]. Это и прямые методы измерений на поверхности обнажений массивов с помощью фотографирования и лазерного сканирования [17]. Это большая группа измерений при каротаже скважин, включающих и сейсмоакустические [18].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований параметров волн возмущения, возникающих при ударном нагружении модельной блочной среды — кирпичной стены. Отличительная особенность такой модели от ранее изученных одномерных — выраженная двумерность, что приближает ее к природным блочным средам, а преимущество заключается в том, что известна структура и для анализа полученных в эксперименте данных могут быть использованы теоретические модели периодических блочных сред.

В [19] на одномерной модели сборки мраморных блоков показано, что импульсное нагружение вызывает распространение волны возмущения, спектральный состав которой определяется частотами собственных колебаний отдельных блоков и частотным спектром коллективных движений. По мере распространения возмущений по сборке собственные колебания затухают тем быстрее, чем больше их частота. Вдали от точки удара в колебаниях блоков выявляется низкочастотная волна маятникового типа, обусловленная взаимодействием блоков через податливые прослойки.

Анализ установленных в эксперименте при разной степени сжатия сборки мраморных блоков параметров волны возмущения (скорость распространения и спектральный состав) показал соответствие теоретическим зависимостям модели “массы–пружины” [7]. Оказалось, что выполняется пропорциональность скорости распространения маятниковой волны c_g граничной частоте ее спектра ν_g , определяемой в теории соотношением

$$c_g = l\omega_g / 2 = \pi l\nu_g, \quad (1)$$

где l — продольный размер блока; ω_g — граничная круговая частота спектра. Экспериментальная зависимость осуществляется с поправкой:

$$kc_g = \pi l\nu_g, \quad k \approx 1.5. \quad (2)$$

В эксперименте с мраморными блоками скорость распространения возмущения определялась двумя способами: по вступлению сигнала на осциллограммах ускорений колебаний блоков c_0 и моментам достижения максимального значения первого пика ускорения смещения c_g . При разном сжатии сборки мраморных блоков $c_0 \approx 1.6c_g$ [19]. Из (2) следует, что $c_0 \approx \pi l\nu_g$.

Данная зависимость позволяет оценивать продольный размер блоков l по экспериментально установленным параметрам волны возмущения, распространяющейся в блочной среде при импульсном нагружении коротким по времени силовым воздействием.

Проверка такой возможности проводилась на примере двухмерной модели блочной среды — фрагменте кирпичной стены толщиной 25 см. Кирпичи в кладке размером $25 \times 12 \times 6$ см укладывались в стену рядами. В одном ряду два близко лежащих кирпича располагались вдоль стены, а в следующем — длинная грань всех кирпичей направлялась поперек стены. Пространство

между кирпичами заполнялось прослойками из раствора песка и цемента толщиной 1 см. Длина стены составляла 6 м, высота 3 м. Схема участка стены, на котором проводились измерения, представлена на рис. 1. Удары молотком наносились вдоль плоскости стены в точках y_1, y_2, y_3 . Измерение ускорений смещения кирпичей осуществлялось акселерометрами KD91. Места установки акселерометров по горизонтали обозначены на плане как $T_1 - T_8$, по вертикали — $T_{1в}, T_{2в}, T_{3в}$ и по диагонали — T_9, T_{10} . Сигналы акселерометров усиливались с помощью усилителя заряда 2635 фирмы Brüel & Kjær и записывались в компьютер через АЦП Е-1440.

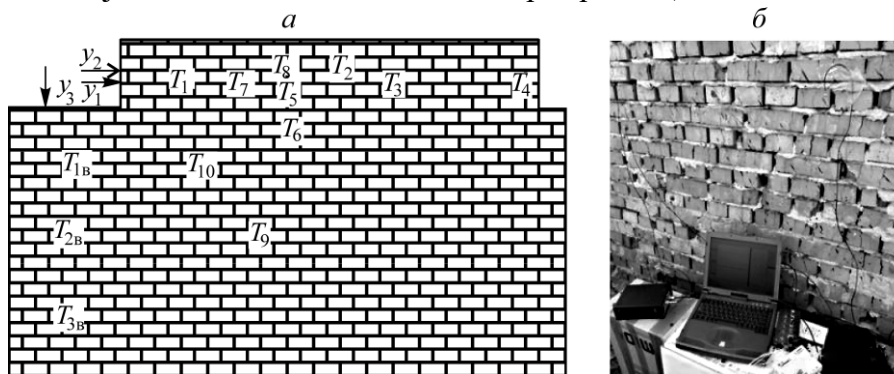


Рис. 1. Расположение датчиков на фрагменте стены (а) и ее вид (б)

Проведено около 30 экспериментов при ударах в различных направлениях. Примеры записи ускорений и их спектров в волне, распространяющейся в эксперименте от удара y_1 горизонтально в точках T_1, T_8, T_4 , приведены на рис. 2.

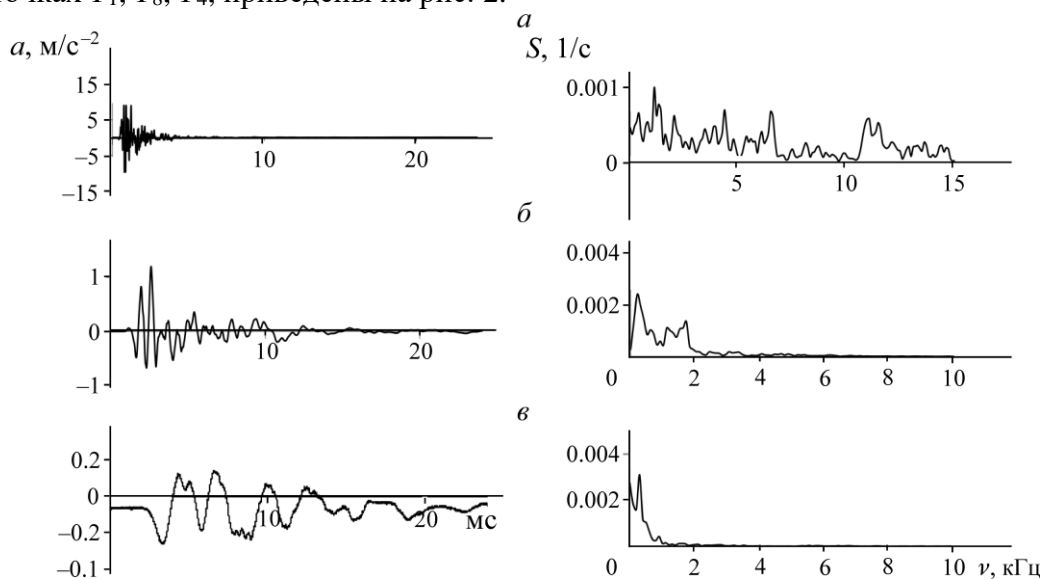


Рис. 2. Осциллограммы ускорений $a(t)$ и зависимости спектральной плотности сигналов от частоты $S(\nu)$, записанные в точках T_1 (а), T_8 (б), T_4 (в) при ударе y_1

Из рис. 2 следует, что вблизи ударной точки волна возмущений имеет широкополосный спектр и отличается большой амплитудой ускорения смещений. По мере распространения волны амплитуда ускорений уменьшается, а высокочастотные составляющие колебаний затухают. По осциллограммам ускорений определялись скорость распространения возмущений и их спектральный состав. Оказалось, что для кирпичной стены $c_0 \approx 1.5c_g$. Спектральный состав возмущений устанавливался с помощью интеграла Фурье:

$$c(\nu) = \int_0^T a(t) e^{-2\pi i \nu t} dt,$$

где $a(t)$ — зависимость ускорения от времени; ν — частота; T — время записи ускорения.

Спектральная плотность $S(\nu) = |c(\nu)|$ рассчитывалась методом быстрого преобразования Фурье. На рис. 2 показаны графики спектральной плотности для сигналов, записанных в T_1 , T_4 и T_8 . В настоящей работе граничная частота спектра, которая выявляет полосу частот, определяющих основную меру отклонения спектральной плотности от нуля, находилась по функции

$$\bar{W}(\nu) = \frac{W(\nu)}{W_\infty} = \frac{\int_0^\nu (S(\nu))^2 d\nu}{\int_0^\infty (S(\nu))^2 d\nu}. \quad (3)$$

Для оценки значений граничной частоты ν_g устанавливался диапазон частот: $\nu_g^{\min} - \nu_g^{\max}$, границы которого определялись по значениям $\bar{W}(\nu_g) = 0.9; 0.98$. На рис. 3 представлены графики функции (3), построенные по кривым спектра колебаний, зарегистрированным в T_4 и T_8 (рис.2). В T_4 фиксируется низкочастотная маятниковая волна со спектром, ограниченным частотой ν_g , значения которой находятся в диапазоне 0.41 – 0.61 кГц. Для T_8 $\nu_g^{\min} = 1.63$ кГц, $\nu_g^{\max} = 1.73$ кГц.

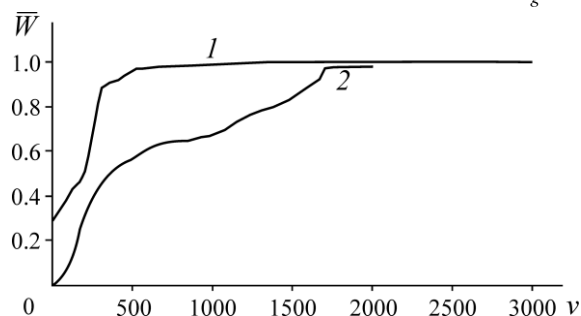


Рис. 3. Функция $\bar{W}(\nu)$, построенная по записанным сигналам в T_4 и T_8 (кривые 1, 2)

Данные по экспериментам, в которых фиксировалось распространение волны возмущения в горизонтальном направлении, под 45° и вертикально вниз при ударах y_1, y_2, y_3 , представлены в таблице, где Δx — расстояния от точки удара до точки записи сигнала, а l^{\min} и l^{\max} — расчетные минимальные и максимальные оценочные значения размеров блоков, определяемые по максимальным и минимальным значениям граничной частоты спектра и скорости распространения волны возмущения по полученной из (1) формуле:

$$l \approx \frac{c_g}{\pi \nu_g}. \quad (4)$$

Зависимость расчетных размеров блоков от расстояния, пройденного волной возмущения от точки удара, показана на рис. 4.

Полученные данные о расчетных размерах блоков, которые формируют низкочастотную маятниковую волну, возникающую при ударной нагрузке в блочной среде, можно сравнить с реальными размерами блоков в кирпичной кладке. В горизонтальном направлении кирпичной кладки располагаются блоки с размерами 12.5 см в одном слое и 25 см в другом, а в вертикальном — 6 и 12.5 см.

Данные экспериментов по распространению волны возмущения

Точка удара	Точка записи	Δx , м	c_g , м/с	ν_g^{\min} , Гц	ν_g^{\max} , Гц	l^{\min} , см	l^{\max} , см
y ₂	T ₂	1.210	527	992	1500	11.0	17.0
y ₁	T ₆	0.980	543	1526	2700	6.4	11.0
y ₁	T ₇	0.650	511	2500	3200	5.0	6.5
y ₂	T ₈	0.923	533	1628	1729	9.8	10.0
y ₁	T ₃	1.410	558	1050	1526	11.6	17.0
y ₁	T ₉	1.040	547	1526	3250	5.3	11.4
y ₁	T ₁₀	0.560	527	3560	3560	4.7	4.7
y ₁	T ₄	1.930	529	417	671	25.0	40.0
y ₃	T ₈	1.250	472	1628	1628	9.20	9.2
y ₃	T ₃	1.730	516	814	1526	10.00	20.0
y ₃	T _{3в}	1.000	462	1600	1700	8.60	9.2

Согласно рис. 4, наблюдается общая тенденция повышения расчетных значений размеров блоков с увеличением расстояния, прошедшего волной возмущения от точки удара. Значения размеров возрастают линейно от 5 до 10 см при увеличении расстояния до 1 м, затем рост теоретических значений размеров замедляется и фиксируется в диапазоне 10–20 см, что соответствует реальным размерам блоков в кирпичной стене. Из этого ряда наблюдений выпадают данные, зафиксированные в T₄ на расстоянии 1.93 м от точки удара. По записям в этой точке предельная частота составляет 417–671 Гц, а расчетный диапазон изменения размера блоков — 25–40 см. Это возможно объясняется тем, что кирпич, на котором установлен акселерометр, является крайним на границе проема стены и зафиксированные на нем частоты отражают частотные свойства установки. В дальнейшем предполагается провести измерения изменения частотных свойств низкочастотной маятниковой волны возмущения на большем диапазоне распространения.

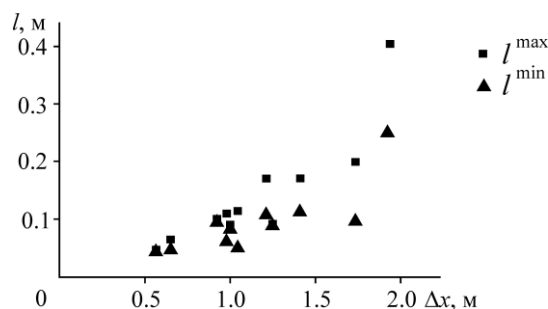


Рис. 4. Экспериментальное значение размеров блоков по (4)

ВЫВОДЫ

Измерения параметров волн возмущения, возникающих в кирпичной стене при ударном нагружении, показали, что в процессе распространения таких волн высокочастотные составляющие их колебаний затухают и выделяются низкочастотные маятниковые волны. В результате обработки осциллограмм ускорений колебаний на разных расстояниях от точки удара получены данные о скорости распространения волн в кирпичной стене и изменении их частотного состава.

На основе этих данных и теоретических зависимостей, связывающих параметры маятниковых волн с размерами блоков, проведены расчеты размеров блоков. Оказалось, что полученный диапазон изменения расчетных размеров блоков соответствует реальным размерам кирпичей в кирпичной стене. Полученные результаты показывают, что предложенная методика обработки сейсмических данных позволяет определять размер характерных блоков породного массива по данным сейсмического зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. — 1979. — Т. 247. — № 4. — С. 829–832.
2. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа U_μ // ДАН СССР. — 1993. — Т. 333. — № 4. — С. 3–13.
3. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. II. Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования // ФТПРПИ. — 1996. — № 4. — С. 3–38.
4. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. III. Данные натуральных измерений // ФТПРПИ. — 1996. — № 5.
5. Опарин В. Н., Адушкин В. В., Киряева Т. А., Потапов В. П., Черепов А. А., Тюхрин В. Г., Глумов А. В. О влиянии волн маятникового типа от землетрясений на газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 2–15.
6. Сарайкин В. А., Степаненко М. В., Царева О. В. Упругие волны в средах с блочной структурой // ФТПРПИ. — 1988. — № 1.
7. Александрова Н. И. О распространении упругих волн в блочной среде при импульсном нагружении // ФТПРПИ. — 2003. — № 6. — С. 38–47.
8. Александрова Н. И., Шер Е. Н. Моделирование процесса распространения волн в блочных средах // ФТПРПИ. — 2004. — № 6. — С. 49–57.
9. Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н. О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2006. — № 5. — С. 67–74.
10. Sadovskii V. M. and Sadovskaya O. V. Of dynamic processes in blocky media Russian, J. of Numerical Analysis and Math. Modelling, 2018, Vol. 33, No. 2. — P. 111–121
11. Сарайкин В. А., Черников А. Г., Шер Е. Н. Распространение волн в двумерной блочной среде с вязкоупругими прослойками (теория и эксперимент) // ПМТФ. — 2015. — Т. 56. — № 4 (332). — С. 170–181.
12. Alexandrova N. I. The plane Lamb problem for a 2D discrete medium, Doklady Phys., 2015, Vol. 60, No. 1. — P. 5–10.
13. Aleksandrova N. I. Seismic waves in three-dimensional block medium, Proc. of the Royal Soc. A: Math., Phys. and Eng. Sci, 2016, Vol. 472, No. 2192.
14. Александрова Н. И. Особенности распространения маятниковых волн, возникающих при взрыве заглубленного шнурового заряда в блочном породном массиве // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 29–36.
15. Александрова Н. И. Волны маятникового типа на поверхности блочного породного массива при динамическом воздействии // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 64–69.

16. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В. Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 3–10.
17. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Клишко В. К., Рублев Д. Е., Изотов А. С., Иванов А. В. Об аналитическом описании форм поверхности подземной камеры при взрывах зарядов по данным лазерного сканирования // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 183–196.
18. Хакимова А. С. Исследования скважин методом акустического каротажа // Междунар. журн. Инновационное развитие. — 2018. — № 1 (18). — С. 38–39.
19. Шер Е. Н., Черников А. Г. Влияние горного давления на спектральный состав маятниковых волн, возникающих в блочных средах при импульсном нагружении // ФПВГН. — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 317.

Поступила в редакцию 30/V 2020

После доработки 7/VII 2020

Принята к публикации 9/VII 2020