

УДК 551.326.85

ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ СТАТИСТИКИ ЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЕТОННОГО БЛОКА ПЕРЕД ЕГО РАЗРУШЕНИЕМ

Коган Лев Петрович^{1,2,3}, к.ф.-м.н., доцент кафедры Общей физики и теоретической механики ННГАСУ

e-mail: L_kog@list.ru

Кондрашкин Олег Борисович¹, к.т.н., заведующий кафедрой Технологии строительства

e-mail: tsp@nngasu.ru

Гулин Иван Анатольевич¹, старший преподаватель кафедры Технологии строительства

e-mail: lis2086@yandex.ru

¹ Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

² Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п.г.т. Научный, республика Крым, Россия

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Исследуются статистические свойства измерений акустического сигнала, генерируемого малым однородным бетонным блоком в процессе его сдавливания под прессом с последующим разрушением. Применяемый подход дает возможность выявлять статистические явления, возникающие в подобных системах при наличии критически сильного внешнего воздействия.

Ключевые слова: бетонный блок, механическое напряжение, статистический функционал, предвестники разрушения.

ABOUT CHANGES IN THE STATISTICS OF THE SOUND EMISSION OF A CONCRETE BLOCK BEFORE ITS COLLAPSE

Lev P. Kogan^{1,2,3}, PhD, the Department of General Physics and Theoretical Mechanics

e-mail: L_kog@list.ru

Oleg B. Kondrashkin¹, PhD, Head of the Department of Construction Technology

e-mail: tsp@nngasu.ru

Ivan A. Gulin¹, Senior Lecturer at the Department of Construction Technologies

e-mail: lis2086@yandex.ru

¹ Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

² Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Scientific urban-type settlement, Republic of Crimea, Russia

³ Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The statistical properties of the measurements of the acoustic signal generated by a small homogeneous concrete block in the process of its compression with subsequent destruction are investigated. The applied approach makes it possible to identify statistical phenomena that occur in such systems under the presence of a critically strong external influence.

Keywords: concrete block, mechanical stress, statistical functionality, and precursors of destruction.

Введение и применяемый математический аппарат

В этой работе на основании методики спектрально-вероятностного анализа [1-3] рассматриваются изменения статистики интенсивности акустического излучения бетонного блока при воздействии на него механического сдвигания, проводимого с помощью прессы вплоть до момента разрушения указанного образца. Измерения интенсивности звука были проведены путем использования диктофона, установленного на блок. Для исследования изменений свойств статистики указанной интенсивности и выявления феноменов, которые могут быть интерпретированы как предвестники приближающегося разрушения, используется статистический функционал, ранее введенный и апробированный в [1-3]:

$$L_0(\mu) = \frac{A}{M} \sum_{l=\mu-M+1}^{\mu} |\mathcal{L}_l|, \quad \mathcal{L}_l = \sum_{m=0}^{N-1} (-1)^m P_{m,l}. \quad (1)$$

Аргумент μ в (1) соответствует времени завершения отрезка реализации, обладающего таким номером, коэффициент $A = 1000$ вводится с целью перехода к удобному для анализа диапазону значений функционала $L_0(\mu)$, значение M задает ширину интервала усреднения, которое реализуется по последовательным отрезкам реализации с номерами от $\mu - M + 1$ и до μ . Все они имеют одну и ту же длительность во времени и обладают равным числом отсчетов N_1 . Во второй сумме $\mathcal{L}_l$ любой множитель $P_{m,l}$ (здесь второй индекс l есть номер рассматриваемого отрезка реализации) равен экспериментально полученной вероятности попадания значений нелинейной функции $F[x(t)] = \sin[\xi x(t)]$ (где нормировочный множитель $\xi = 10^4 \text{ Вт}^{-1}$) от прямо измеряемых значений случайной акустической интенсивности $x(t)$ в обладающий номером m интервал области значений вида

$$\sin[\xi x(t)]_{\min} + mh \leq \sin[\xi x(t)] < \sin[\xi x(t)]_{\min} + (m+1)h, \quad 0 \leq m \leq N-1. \quad (2)$$

где h – шаг дискретизации.

Как и в [1-3], в этой работе рассматривается предположение, что непосредственно измеряемая случайная величина (СВ) $x(t)$ может быть записана как сумма

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) \quad (3)$$

фонового шума $x_1(t)$ и дополнительного (то есть статистически независимого от $x_1(t)$) случайного слагаемого $x_2(t)$, значения которого обусловлены влиянием явлений подготовки приближающегося разлома бетонного блока. Для экспериментальной плотности вероятности $\rho(w)$ суммы двух независимых случайных слагаемых $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ существует представление в форме свертки вида $\rho(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_1(w -$

$w')\rho_2(w')dw'$, где $\rho_{1,2}(w)$ – плотности вероятности для слагаемых $x_{1,2}(t)$ (если бы существовал способ измерить их по отдельности).

Методика проведенных далее расчетов основывается на том статистическом феномене, что из-за ограниченного числа измерений распределение $\rho_1(w)$ для фонового шума будет содержать малые мелкомасштабные случайные флуктуации. Эффективный период таких возмущений как для $x(t)$, так и для $\sin[\xi x(t)]$, определяется указанной в (2) шириной интервала дискретизации h . Если для горизонтального масштаба $2\sigma_2$ (где σ_2^2 есть дисперсия значений случайной величины x_2) распределения $\rho_2(w)$ истинно условие

$$2\sigma_2 \geq (2 \div 3)h, \quad (4)$$

то при выполнении интегральной свертки (2) произойдет усреднение указанных случайных флуктуаций, сопровождающееся уменьшением их эффективной амплитуды [1-3]. Переход от анализа статистики прямо измеряемых значений акустической интенсивности $x(t)$ связан с тем, что для соответствующей $\sin[\xi x(t)]$ плотности вероятности $\rho_{\sin}(w)$ имеют место интегрируемые особенности в области $w \rightarrow \pm 1$. Их существование дает возможность усилить степень отличия статистики значений $L_0(\mu)$ (которое определяется отличием эффективной амплитуды указанных выше мелкомасштабных флуктуаций) для тех отрезков реализации, для которых в (2) слагаемое $x_2(t)$ присутствует и удовлетворяет (4), по сравнению с отрезками, у которых $x_2(t)$ мало или полностью отсутствует.

С целью упрощения проведения анализа ниже вместо (1) будем рассматривать свойства функционала $L(n) = L_0\left(\left[\frac{vn}{N_1}\right]\right)$. В данном случае квадратные скобки есть обозначение для целой части числа, аргумент n соответствует времени в секундах от начала эксперимента, знаменатель N_1 есть введенное выше число отсчетов в любом отрезке реализации, а коэффициент $v = 44,1$ кГц равен частоте дискретизации диктофона.

Анализ результатов измерений

На рис. 1 приведена типичная зависимость для статистического функционала $L(n)$, построенная при значениях $M = 100$, $h = 0.19$, $N_1 = 230$, см. (1) и (2). Горизонтальная ось отвечает времени в секундах, отсчитываемому от начала сжатия. Сплошной красной вертикальной линией в правой части отмечен момент разрушения образца. На рисунке отчетливо видны линейные структуры, сопровождающие этапы изменения состояния бетонного блока. Возникновение таких структур означает появление силовых барьеров, трехкратное тестирование которых, как это показано на рисунке, означает изменение состояния системы.

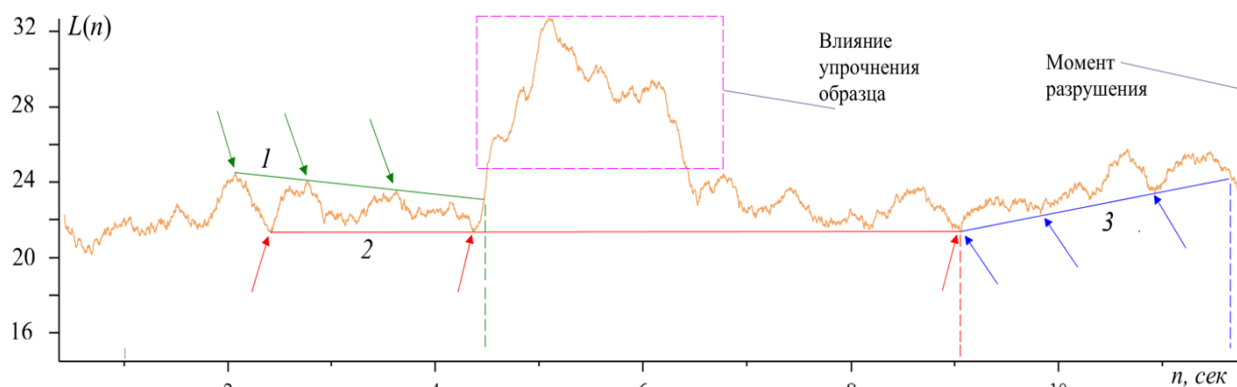


Рисунок 1 – Зависимость $L(n)$ при значениях $N_1 = 230$, $M = 100$ и $h = 0.15$. Стрелками отмечены точки, через которые проходят кривые 1, 2 и 3

Зеленая прямая 1 соответствует процессу упругого сжатия. Выход за ее пределы в точке, отмеченной зеленым пунктиром, означает начало процесса пластических деформаций. Его развитие приводит к переупрочнению образца, что соответствует уменьшению уровня хаоса в текущих измерениях и значительному возрастанию функционала $L(n)$. В ходе такого процесса происходит трехкратное тестирование кривой $L(n)$ нижней красной прямой 2 (см. красный вертикальный пунктир на рисунке), после чего поведение системы изменяется и начинается этап разрушения. Он завершается после пересечения кривой $L(n)$ линии синей прямой 3, которое менее чем на 0.1 секунды предшествует моменту разрушения исследуемого образца.

Выводы

При анализе рис. 1 приходим к выводу о возникновении в рассматриваемых статистических зависимостях совокупности линейных структур высокой степени детерминированности. Такие феномены постоянно имеют место при изучении предкатастрофических состояний сложных систем [1–3]. Их физический смысл состоит в формировании барьеров, трехкратное тестирование которых является предвестником перехода системы в критическое состояние. Таким образом:

1. По мере возрастания нагрузки на бетонные (и в целом стационарные) конструкции в статистических зависимостях, подобных функционалу $L(n)$, с высокой вероятностью возникают квазилинейные объекты высокой степени детерминированности, подобные приведенным на рисунке 1.
2. Более чем двукратное тестирование кривой $L(n)$ границ этих объектов с высокой вероятностью означает последующее изменение типа состояния системы.
3. Поскольку применяемый статистический функционал $L(n)$ может рассматриваться как характеристика уровня хаоса в системе, то возможно выдвижение гипотезы о том, что по мере развития процесса разрушения хаос в проводимых измерениях начинает вести себя по своим собственным законам.

Статья подготовлена при поддержке гранта «Фундамент будущего» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета.

Список литературы:

1. Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H., et al. Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor. Communications in Nonlinear Science

and Numerical Simulation. – 2022. – V. 108. – P. 106200.
<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.106200>

2. Вольвач А.Е., Коган Л.П., Канониди К.Х., и др. О возможной связи совокупности статистически выявляемых квазилинейных локальных трендов в вариациях параметров магнитного поля перед землетрясениями в сейсмоактивных зонах Черного моря, Кавказа и Западной Азии. Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13. – №. 5. – С. 1-11.
<https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0680>.

3. Volvach A.E., Kogan L.P., Volvach L.N., Kanonidi K.H., 2026. Precursors the earthquake on February 6, 2023 on the Turkey. Natural Hazards. – 2026. – V. 122. – №68.
<https://doi.org/10.1007/s11069-025-07754-7>.

