

Кияшко И.В., канд. техн. наук, Пархоменко А.Ю.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН  
ПРИ ОЦЕНКЕ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ  
СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД**

**Анотація.** Розглянуто теоретичні аспекти використання методу спектрального аналізу поверхневих хвиль для контролю якості влаштування цементобетонних шарів дорожнього одягу. Наведено залежності параметрів розповсюдження хвильових полів від фізико-механічних властивостей матеріалу.

**Ключові слова:** цементний бетон, неруйнівний контроль якості, модуль пружності, хвиля Релея, дисперсійна крива.

**Аннотация.** Рассмотрены теоретические аспекты использования метода спектрального анализа поверхностных волн для контроля качества устройства цементобетонных слоев дорожной одежды. Приведены зависимости параметров распространения волновых полей от физико-механических свойств материала.

**Ключевые слова:** цементный бетон, неразрушающий контроль качества, модуль упругости, волна Релея, дисперсионная кривая.

**Annotation:** Theoretical aspects of Spectral Analysis of Surface Waves Method using for nondestructive testing of Portland cement concrete pavements. Dependency of wave`s fields propagation parameters on physical and mechanical properties is caused.

**Key words:** portland cement concrete, nondestructive testing, elasticity modulus, rayleigh wave, dispersion curve.

В мировой практике разработка и использование методов неразрушающего контроля качества продукции является одним из

приоритетных направлений. Среди направлений неразрушающего контроля качества устройства дорожных одежд жесткого типа перспективным становится разработка и использование акустической группы методов, среди которых наиболее актуальным является метод спектрального анализа параметров распространения поверхностных волн (SASW – Spectral Analysis of Surface Waves) [1]. Данный метод нашел широкое применение при геологической разведке земных недр.

Суть метода лежит в оценке изменения параметров распространения поверхностных волн от точки возбуждения до некоторой точки среды, которая контролируется. Изменение этих параметров определяется исключительно свойствами материала на пути распространения колебаний. Очевидно, что энергия механических колебаний в любой среде передается посредством физического взаимодействия структурных частиц, составляющих эту среду. При ударном воздействии на конструкцию, в ней возникает волновое поле, которое характеризуется широким диапазоном частот и равным распределением энергии колебаний по всем частотным составляющим. Распространение данного поля связано с распространением двух основных видов волн: волны сжатия (Р-волна) и волны сдвига (S-волна). При падении данных волн на свободную (дневную) поверхность на ней возникают свободные колебания, распространяющиеся в виде поверхностных волн [2]. Одним из типов таких волн является волна Релея (R-волна). Параметры распространения волн сжатия и сдвига являются основной информационной характеристикой акустической группы методов неразрушающего контроля качества. Однако, для регистрации данных параметров в большинстве случаев требуется двухсторонний доступ к конструкции, что невозможно при оценке свойств материалов, составляющих слои дорожной одежды. Решение данной задачи заключается в оценке параметров распространения волн сжатия и сдвига по параметрам распространения волн Релея. Данный тип волн обладает высокой энергоемкостью, распространяется вдоль свободной поверхности конструкции по всей толщине материала и может быть зарегистрирован при условии одностороннего доступа к сооружению или конструкции.

В линейной теории упругости, закон Гука выражает линейную зависимость между тензором деформации  $\xi$  и тензором напряжений  $\sigma$  в упругой среде при этом характеризуется следующей зависимостью [3]:

$$\sigma = 2\mu\xi + \lambda\theta, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – первый параметр Ламе,

$\mu$  – второй параметр Ламе,

$\theta$  - единичная объёмная деформация.

Второй параметр Ламе представляет собой модулем сдвига и в литературных источниках чаще обозначается как  $G$  [2,3,4]. Модуль сдвига описывает отклик материала на сдвиговую нагрузку и связан с модулем упругости  $E$  (модулем Юнга) через коэффициент Пуассона  $\nu$  (формула 2). Также, модуль сдвига описывает взаимосвязь между скоростью распространения волн сжатия  $V_p$  и волн сдвига  $V_s$ , плотностью среды распространения волновых полей  $\rho$  и коэффициентом Пуассона материала среды (формулы 3-4) [2].

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (2)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{G \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 - 2\nu)}}, \quad (3)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (4)$$

При этом, известна зависимость между скоростью распространения волн Релея  $V_R$  и волн сдвига  $V_s$ :

$$\frac{V_R}{V_s} = \frac{0.87 + 1.12 \cdot \nu}{1 + \nu}. \quad (5)$$

Таким образом, используя формулы 2-5 можно составить зависимость между скоростью распространения поверхностной волны Релея, коэффициентом Пуассона, плотностью и модулем упругости материала среды в котором распространяются волновые поля:

$$E = \left( \frac{1 + \nu}{0.87 + 1.12\nu} \cdot V_R \right)^2 \cdot \rho \cdot 2 \cdot (1 + \nu). \quad (6)$$

Модуль упругости материала - одна из основных расчетных характеристик при проектировании цементобетонных конструкций, к которым

относятся дорожные одежды жесткого типа. Соответствие фактических значений модуля упругости свежееуложенного слоя из цементного бетона проектным значениям является необходимым условием для обеспечения нормативного срока службы всей дорожной конструкции. На практике, основным критерием оценки физико-механических параметров цементобетона стала прочность на сжатие. Данный параметр контролируется в лабораторных условиях при пробных замесах запроектированной смеси, а также в период строительства. Положениями ВБН В.2.3-218-008 [5] регламентируется соотношение расчетного модуля упругости по прочности на сжатие в зависимости от класса бетона. Этот факт позволяет использовать метод спектрального анализа распространения поверхностных волн для контроля качества устройства слоев дорожной одежды жесткого типа неразрушающим способом.

Одним из основных достоинств применения метода спектрального анализа параметров распространения поверхностных волн кроме оценки физико-механических параметров, является также возможность определения толщины слоя дорожной одежды. При оценке распространения поверхностных волн в реальных средах учитывается наличие в них сейсмических границ, на которых упругие свойства среды и плотность имеют четко выраженные изменения. При падении волны на границу раздела двух сред возникают вторичные волны: отраженные в первой среде и преломленные (проходящие) во второй среде. Амплитуда смещений вторичной волны пропорциональна амплитуде падающей волны. Коэффициент отражения (преломления) является функцией угла падения и соотношения акустических жесткостей (волновых сопротивлений) сред. Глубина локализации поверхностной волны пропорциональна её длине, которая определяется соотношением скорости распространения и частоты волны [6]. Поскольку поверхностные волны распространяются в упругих средах без дисперсии, скорость их распространения не зависит от частоты волны, а зависит исключительно от свойств среды. Интенсивность затухания амплитуды колебаний частиц по глубине имеет экспоненциальную зависимость и для материалов с различным коэффициентом Пуассона определяет соотношение глубины локализации волны к её длине [6,7]. Для определения геометрических и физико-механических параметров цементобетонных слоев используют зависимость скорости распространения волны Релея от частоты или длины волн. Такая

зависимость называется дисперсионная кривая. Наличие во фронте волны широкого спектра частот, достаточного для анализа свойств материала, обеспечивает использование активного источника нагружения импульсного типа, при этом, чем короче время импульсного нагружения, тем более широким будет частотный спектр волны возбуждения.

Таким образом, использование параметров распространения поверхностных волн для контроля качества устройства монолитных слоев жесткой дорожной одежды позволит получить достаточно точные результаты по геометрическим и прочностным параметрам. Высокая скорость проведения испытаний в тестовой точке без привлечения специализированной лаборатории, возможность использования предлагаемого метода, как в лабораторных, так и в полевых условиях на различных этапах строительства и эксплуатации дорожных сооружений делает данный метод наиболее перспективным среди существующих методов неразрушающей диагностики.

### Литература

1. Кіяшко І.В. Особливості використання віброакустичних методів неруйнівного контролю якості дорожнього одягу жорсткого типу. / І.В. Кіяшко, О.Ю. Пархоменко, Д.М. Новаковський. // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. Збірник / Відпов. ред. М.М. Осетрін. – К., КНУБА, 2011. – Вип. 40. У 2 ч. Ч. 1. – С. 445- 453.
2. Кунциков Б.К. Общий Курс геофизических методов разведки/ Кунциков Б.К., Кунцикова М.К. – М.: Недра. 1976.- 429 с.
3. Филоненко-Бородич М.М. Теория упругости/ Филоненко-Бородич М.М. – М: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 364 с.
4. S. Nazarian, D. Yuan, K. Smith, F. Ansari, C. Gonzalez. Acceptance Criteria of Airfield Concrete Pavement Using Seismic and Maturity Concepts: Appendices. Report IPRF-01-G-002-02-2. Programs Management Office 5420 Old Orchard Road Skokie, IL 60077. May, 2006. – 98 p.
5. ВБН В.2.3-218-008-97. Проектування і будівництво жорстких таз жорсткими прошарками дорожніх одягів. Відомчі будівельні норми України. - К.: 1997р.. Видання офіційне.
6. Richart F.E. Jr, Wood R.D., Hall J.R. Jr (1970) “Vibration of soils and foundations”, Prentice-Hall, New Jersey.
7. Foti S. Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves, PhD Dissertation, Politecnico di Torino. – Italy, 2000. – 229 с.