

## МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ С ЦЕМЕНТОБЕТОННЫМ И АСФАЛЬТОБЕТОННЫМ ПОКРЫТИЕМ

Беляев Д. С.<sup>1</sup>, Юшков Б. С.<sup>1</sup>, Янковский Л. В.<sup>1,2</sup>, Борисов Ю. В.<sup>1,2</sup>, Кычкин В. И.<sup>1</sup>,  
Рукавишникова Н. Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Министерство образования и науки Российской Федерации, Пермь, Россия, (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., д. 29), e-mail: yanekperm@yandex.ru;

<sup>2</sup>ООО «Научно-исследовательский центр технического регулирования», Саратов, Россия (410501, Саратовская область, Саратовский район, р.п. Соколовый, ул. Лесная, 7), e-mail: soni.81@mail.ru.

В статье рассмотрен алгоритм диагностики состояния грунтов земляного полотна транспортных сооружений. Представлена механико-математическая модель слоистой среды «дорожная конструкция-грунт», описывающая поведение системы при динамическом на нее воздействии и позволяющая получить значения физико-механических свойств материалов слоев дорожной конструкции и грунта на основе виброизмерений в контрольных точках поверхности дороги. Практическая реализация предложения осуществлена в виде экспертной системы на основе нечеткой логики. Проезд транспортных средств вызывает колебания проезжей части дороги в широком диапазоне частот – от 7 до 500 Гц. Уровень амплитуды виброперемещений в месте установки датчика достигал величины 0,5 мкм и зависел не только от массы транспортных средств, но и от их скорости. Помимо этого, практически во всех случаях отмечен выпор поверхности покрытия перед передними колесами движущегося автомобиля, причем его величина прямо пропорциональна скорости движения автомобиля.

Ключевые слова: виброскорость, диагностика, конструкция, автомобильная дорога, поврежденность.

## METHOD OF THE ESTIMATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE EARTHEN CLOTH OF THE HIGHWAY WITH THE CONCRETE AND ASPHALT COVERING

Beljaev D. S.<sup>1</sup>, Yushkov B. S.<sup>1</sup>, Jankovskij L. V.<sup>1,2</sup>, Borisov J. V.<sup>1,2</sup>, Kychkin V. I.<sup>1</sup>,  
Rukavishnikova N. E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm national research polytechnical university, Perm, Russia (614990, Perm, Komsomol avenue, 29), e-mail: yanekperm@yandex.ru;

<sup>2</sup>Open Company «Research center of technical regulation», Russia, 410501, the Saratov region, the Saratov area, the river of the item of Sokolovyj, street Wood, 7), e-mail: soni.81@mail.ru.

In article the algorithm of diagnostics of a condition of an earthen cloth of transport constructions is considered. The mehaniko-mathematical model of the layered environment «a road design-ground» is presented, describing behavior of system at dynamic influence on it and allowing to receive values of physicommechanical properties of materials of layers of a road design and a ground on the basis of vibrating measurements in control points of a surface of road. Practical realization of the offer is carried out in the form of expert system on the basis of indistinct logic. Journey of vehicles causes carriageway fluctuations in a wide range of frequencies – from 7 to 500 Hz. Level of amplitude of vibrating movings in a gage installation site reached sizes 0,5 microns, and depended not only on weight of vehicles, but also from their speed. Besides it, practically in all cases the raising of a surface of a covering before forward wheels of the moving car isn'ted, and its size is directly proportional to speed of movement of the car.

Keywords: vibrating speed, diagnostics, a design, a highway, defect.

### Введение

Вступивший в действие с 1 июля 2003 года Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27 декабря 2002 года №184-ФЗ требует принятия и реализации в

дорожной отрасли мер по переходу на новую систему технического регулирования, в частности, повышение номенклатуры показателей качества [1, 3-10].

В ОДН 218.1.052-2002 значение среднего балла привязано к величине коэффициента прочности дорожной одежды  $K_{пр}$ , что более прогрессивно. Однако в этом документе был использован только один из критериев несущей способности дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием, а именно жесткость всей конструкции в целом, оцениваемой по величине её модуля упругости, что в ряде случаев является недостаточным [5-7].

### **Цель исследования**

В работе принято, что все элементы автомобильной дороги в процессе эксплуатации работают в условиях постоянного динамического воздействия движущихся транспортных средств, при котором в дорожной одежде и грунтовом массиве генерируются интенсивные колебания в широком диапазоне частот. При этом характер генерируемых колебаний, их амплитудно-частотные характеристики существенно зависят от конструкции дорожной одежды, свойств материалов конструктивных слоев, внутренних дефектов в элементах системы «дорожная конструкция – грунт», а также ровности дорожного покрытия, динамических свойств автотранспортных средств [1, 8].

### **Материал и методы исследования**

Исходной предпосылкой определения технического состояния земляного полотна по параметрам вибрации является то, что вибросигнал с покрытия дорожной одежды содержит большое количество информации о состоянии всей конструкции в целом.

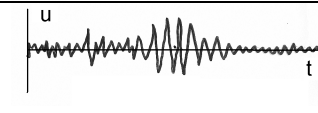
Для получения виброхарактеристики процесса колебания поверхности дороги было проведено экспериментальное исследование поведения дорожной конструкции при проезде автотранспорта. Наиболее интересными представлялись следующие моменты: оценка уровня виброперемещений дорожного покрытия при движении по нему легковых и грузовых автомобилей; частотный состав колебаний конструкций.

Аппаратное обеспечение эксперимента включает вибродатчик Д-21А, виброизмеритель ВИП-2 и электронный осциллограф KAL Score Equip (производство Великобритания) (рис.1). Исследование влияния динамической нагрузки на дорожную конструкцию проводилось для различных марок грузовых и легковых автомобилей, при различных скоростях их движения на расстоянии 0,3 м от кромки проезжей части (1,8 м от полосы наката под правыми колесами автотранспорта) (таблица 1). Эксперимент проводился в безветренную погоду, при температуре окружающего воздуха 25 °С, при относительной влажности 75 %. Место проведения – участок дороги IV категории –относительно новый, имеет ровное покрытие, без дефектов (с целью исключения их влияния на результаты измерений).



Рис.1. Аппаратное обеспечение эксперимента

Таблица 1. Сводная таблица полученных данных

№ измерения	Тип транспортного средства	Масса т	Скорость, км/ч	Центральная частота колебаний, Гц	Виброграмма перемещений поверхности дороги во времени
1	Автобус MAN	6	60	7,5	
2	УРАЛ	9	50	9,5	
3	КамАЗ-4310	10	70	15	
4	МАЗ-500	11	50	15	

Скорость движения автомобилей и автобусов регистрировалась в интервале от 50 до 100 км/ч. Движение транспорта рассматривалось в свободном режиме, без учета встречного движения. Вибродатчик устанавливался на массивном стальном основании для исключения влияния колебаний, вызванных аэродинамическими эффектами. На выходе датчика преобразованные механические колебания имеют вид аналогового временного сигнала.

Анализ полученных данных показывает, что проезд транспортных средств вызывает колебания проезжей части дороги в широком диапазоне частот – от 7 до 500 Гц. Уровень амплитуды виброперемещений в месте установки датчика достигал величины 0,5 мкм и зависел не только от массы транспортных средств, но и от их скорости. Помимо этого, практически во всех случаях отмечен выпор поверхности покрытия перед передними колесами движущегося автомобиля, причем его величина прямо пропорциональна скорости движения автомобиля. В первом приближении будем считать, что значение центральной частоты колебаний поверхности исследуемого участка автомобильной дороги будет средним значением центральных частот, полученных при проезде различного транспорта, т.е.  $f=11,75$  Гц. Воспользуемся цифровой моделью-сеткой дорожной конструкции. Начальными условиями для расчета (величина виброперемещений) послужат данные натурального

эксперимента. Амплитуду перемещений на трех шагах по времени после начала затухания используем в качестве начального условия для расчета.

Динамическая имитационная модель дорожной конструкции представлена в виде многослойной системы, учитывающей динамические физико-механические свойства материалов слоев, потери энергии при колебании учитываем введением коэффициента вязкости. Моделирование колебаний дорожной конструкции включает в себя следующие этапы: подготовку конечно-разностных соотношений, выражающих динамические перемещения в двух перпендикулярных направлениях и компоненты напряженного состояния элементов дорожной конструкции для итерационных вычислений на персональном компьютере на языке Turbo Pascal; представление плоской модели дорожной конструкции в виде сетки с учетом неоднородности материалов слоев дорог; вывод на печать динамических перемещений и факторов напряженно-деформированного состояния во времени процесса колебаний для исследуемой точки модели автомобильной дороги. Постановка плоской задачи позволяет ввести в модель откосы насыпи, исследовать их влияние на прочность конструкции земляного полотна [5].

В процессе расчета число уравнений равно количеству узлов в модели. Однако алгоритм расчета можно построить таким образом, чтобы избежать решения системы связанных уравнений, а решать каждый раз одно уравнение с одним неизвестным. В нашей системе такими неизвестными, входящими в выражения для ускорений, будут перемещения данного узла на следующем шаге по времени  $(t + \tau)$ . Тогда расчетными уравнениями будут уравнения перемещения следующего вида:

$$u(t+\tau)=(1+A\eta)U-A\eta U(t-\tau)+2u-u(t-\tau), \quad (1)$$

$$w(t+\tau)=(1+A\eta)W-A\eta W(t-\tau)+2w-w(t-\tau),$$

где  $U = (\sigma_{xx}^+ - \sigma_{xx}^-) + (\sigma_{xy}^+ - \sigma_{xy}^-)$ ,  $W = (\sigma_{yy}^+ - \sigma_{yy}^-) + (\sigma_{xy}^+ - \sigma_{xy}^-)$ ,  $A\eta = 2\eta(1+\mu)/Et$ ,

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $\eta$  – коэффициент вязкости,  $E$  – модуль упругости.

Все коэффициенты расчетной схемы в (1) безразмерны, поэтому напряжения и ускорения имеют размерность перемещений. Представление всех коэффициентов в определяющих уравнениях в виде безразмерных величин удобно при масштабировании вычислений. Размер плоской сетчатой схемы 17x33.

Данными для расчета являются характеристики материалов изучаемого объекта (модуль упругости, коэффициент вязкости, коэффициент Пуассона и коэффициенты Ламэ). Условно считая, что грунт при многократном приложении к нему нагрузки приобретает свойства упругого тела, ведем расчет по модулю упругости. Начальными условиями являются значения начальных перемещений узловых точек в нулевой момент времени (момент приложения нагрузки). Результатом расчета является значение перемещений точки,

находящейся внутри массива, в форме аperiodической функцией по времени. Варьируя значения и их комбинации характеристик грунта, проводим расчеты до совпадения значений средних частот колебаний поверхности дорожного покрытия и колебаний расчетной точки на поверхности модели-сетки. При совпадении с погрешностью 10 %, фиксируем актуальное значение модуля деформации грунта и его вязкость. Результаты расчета приведены на рис.2.

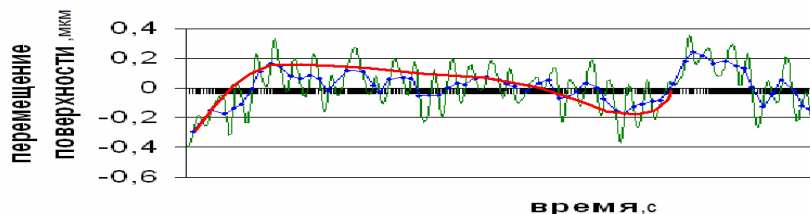


Рис.2. Вертикальное перемещение поверхности дороги в точке наблюдения

После получения расчетного графика перемещения точки поверхности проводится фильтрация данных низкочастотным фильтром, так как спектральная масса шума в основном сосредоточена в области высоких частот. Как видно из результатов расчета, определенный набор физико-механических свойств материалов объекта в любой точке соответствует конкретной зависимости изменения перемещения по времени, т.е. процессу затухания колебаний. Характеристиками процесса являются время колебаний  $t$ , частота  $f$ , амплитуда  $A$  и декремент. Производя расчет и минимизируя расхождение между данными эксперимента и результатами расчета, можно судить о характеристиках грунта и вышележащих слоев дороги. При расчете в качестве начальных данных внесены результаты эксперимента и получены значения параметров грунта дорожной конструкции:

- Модуль деформации на глубине 1,8 м,  $E$ .....12 МПа
- Плотность грунта,  $\rho$ .....2100 кг/м<sup>3</sup>
- Вязкость,  $\eta$ .....150 МПа·с
- Центральная частота вертикальных колебаний частицы грунта .....11,75 Гц

После получения расчетных значений физико-механических свойств грунта (модуль упругости, коэффициент вязкости, плотность и т.д.) важным этапом в оценке его технического состояния является принятие решения. Кроме физико-механических свойств грунта, поддающихся непосредственному измерению или математическому расчету, существует ряд трудноформализуемых параметров (наличие различных включений, трещин, пустот, неоднородностей и т.д.), которые существенно влияют на качество дорожной конструкции. С увеличением сложности структуры рассматриваемого объекта становится все сложнее использовать классические методы определения технического состояния. Одним из альтернативных методов построения систем управления и регулирования объектами, нечетко определенными с точки зрения классической теории (для которых не получена аналитическая модель), является использование так называемых контроллеров нечеткой

логики [2]. Данный подход предполагает использование знаний экспертов об объекте управления, представляемых в виде правил, выраженных на естественном языке. Используются лингвистические переменные для получения нечетких множеств, определяющих параметры объекта управления [2].

При принятии решения о состоянии объекта использование теории нечетких множеств предполагает наличие функций принадлежности, которыми описываются лингвистические термы «плохое», «среднее», «хорошее» и т.п. Задача построения функций принадлежности ставится следующим образом: даны два множества – множество термов  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$  и универсальное множество  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ . Нечеткое множество  $\bar{l}_j$ , которым описывается лингвистический терм  $l_j, j = \overline{1, m}$ , на универсальном множестве  $U$  представляется в виде:

$$l_j = \left( \frac{Ml_j(u_1)}{u_1} \frac{Ml_j(u_2)}{u_2}, \dots, \frac{Ml_j(u_n)}{u_n} \right) . \quad (2)$$

Необходимо определить степени принадлежности элементов множества  $U$  к элементам из множества  $L$ , т.е. найти  $Ml_j(u_i)$  для всех  $j = \overline{1, m}$  и  $i = \overline{1, n}$ .

Введем обозначения:  $K$  - количество экспертов;  $b_{j,i}^k$  - мнение  $k$ -го эксперта о наличии у элемента  $u_i$  свойств нечеткого множества  $\bar{l}_j, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, k}$ . Будем считать, что экспертные оценки бинарные, т.е.:  $b_{j,i}^k \in (0,1)$ , где  $(0,1)$  указывает на наличие (отсутствие) у элемента  $u_i$  свойств нечеткого множества  $\bar{l}_j$ . По результатам опроса экспертов рассчитываются степени принадлежности нечеткому множеству  $\bar{l}_j (j = \overline{1, m})$

$$Ml_j(u_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1, K} b_{j,i}^k, i = \overline{1, n} . \quad (3)$$

Чтобы построить функции принадлежности термов «плохое», «среднее», «хорошее», используемых для лингвистической оценки переменной «техническое состояние дороги» по одному параметру (например, прочности грунта), опросим пять экспертов. Графики функций принадлежности показаны на рис. 3. Формы графиков могут быть обусловлены влиянием различных дефектов (трещин, выбоин и т.д.) и внешних факторов (влажность, температура воздуха и т.д.) на значение модуля упругости в соответствии с мнениями экспертов. Ветвь «плохого» состояния имеет отрицательный наклон, так как по мере увеличения модуля упругости эксплуатационное состояние дороги становится лучше. Если полученное значение модуля упругости может давать проекцию не несколько состояний, то выбирается то состояние, степень принадлежности которого выше, то есть положение максимально приближено к  $M=1$ .

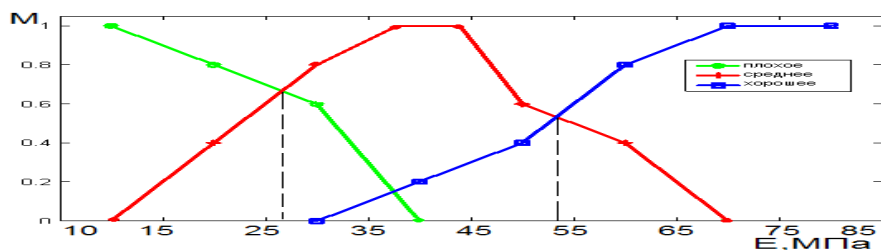


Рис.3. Функции принадлежности нечетких множеств

### Результаты исследования и их обсуждение

Анализируя полученные графики, получаем определение лингвистической переменной «техническое состояние дороги» по параметру – прочности грунта в соответствии с экспертными оценками. Если модуль деформации 10...27 МПа, то состояние «плохое», если модуль деформации принимает значения 27...53 МПа, то состояние «среднее», если модуль деформации 48 МПа и выше – то состояние «хорошее». Представленные графики функций принадлежности носят условный характер, иллюстрирующий метод. В нашем варианте расчета (модуль упругости грунта  $E=12$  МПа) необходимо принять решение о плохом состоянии дороги.

### Заключение

Представленный алгоритм дает возможность получать общую интегральную оценку технического состояния грунта земляного полотна дорожных конструкций в максимально короткие сроки с применением минимума сил и средств.

### Список литературы

1. Евгеньев И. Е. Операционный контроль качества земляного полотна и дорожных одежд / И. Е. Евгеньев, А. Я. Тулаев, В. С. Порожняков и др. – Транспорт, 1985. – 224 с.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 306 с.
3. Кочетков А. В. Применение геоимплантатных конструкций для создания экопаркингов / А. В. Кочетков, Л. В. Янковский // Экология и промышленность России. – 2011. – № 5. – С. 32-34.
4. Нормирование статистических показателей качества производства геосинтетических материалов и изделий на основе степени риска / А. В. Кочетков, Н. Е. Кокодеева, М. В. Степанов, М. В. Вьюгов, Е. М. Хижняк // Строительные материалы. – № 10. – 2011. – С.38-39.
5. Кочетков А. В. Методологические основы оценки технических рисков в дорожном хозяйстве / А. В. Кочетков, Л. В. Янковский, Н. Е. Кокодеева, В. В. Талалай, С. П.

- Аржанухина // Урбанистика: Вестник ПГТУ. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. - № 3. – С. 38-49.
6. Кочетков А. В. Методические подходы реализации принципов технического регулирования в дорожном хозяйстве / А. В. Кочетков, Л. В. Янковский, Н. Е. Кокодеева // Охрана окружающей среды. Транспорт. Безопасность жизнедеятельности: Вестник ПГТУ. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 1. – С. 44-56.
7. Кочетков А. В. Состояние современного методического обеспечения расчёта и конструирования дорожных одежд / А. В. Кочетков, Н. Е. Кокодеева, П. Б. Рапопорт, Н. В. Рапопорт, И. Г. Шашков // Охрана окружающей среды. Транспорт. Безопасность жизнедеятельности: Вестник ПГТУ. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 1. – С. 65-74.
8. Кочетков А. В. Стандартизация испытаний строительных, дорожных материалов и изделий / А. В. Кочетков, И. Б. Челпанов, С. М. Евтеева, В. В. Талалай, Б. С. Юшков // Охрана окружающей среды. Транспорт. Безопасность жизнедеятельности: Вестник ПГТУ. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 2. – С. 57-68.
9. Кочетков А. В. Нормирование макрошероховатости поверхности дорожных покрытий / А. В. Кочетков, Ю. В. Борисов, С. М. Евтеева, В. В. Талалай // Охрана окружающей среды. Транспорт. Безопасность жизнедеятельности: Вестник ПГТУ. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 2. – С. 79-90.
10. Кочетков А. В. Применение инноваций в конструкциях ездового полотна мостовых сооружений / А. В. Кочетков, М. А. Бушуев, Н. В. Мотин // Охрана окружающей среды. Транспорт. Безопасность жизнедеятельности: Вестник ПГТУ. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 2. – С. 122-129.
11. Илиополов С. К. О разработке новых современных методов расчета и конструирования дорожных одежд / С. К. Илиополов, А. А. Ляпин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2000. – № 1. – С. 40-42.

**Рецензенты:**

Овчинников Игорь Георгиевич, д.т.н., профессор, академик транспорта Российской академии транспорта, профессор кафедры «Транспортное строительство» Саратовского государственного технического университета, г. Саратов.

Кадыров Жаннат Нургалиевич, д.т.н., профессор Казахского автомобильно-дорожного института, г. Алматы.

Гилев Анатолий Владимирович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Горные машины и комплексы», ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» Министерства образования и науки РФ, г. Красноярск.