

**Кычкин Владимир Иванович**

Kychkin W.I.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

г. Пермь, Россия

The Perm national research polytechnical university

Доцент/The senior lecturer

Кандидат технических наук

**Юшков Владимир Сергеевич**

Jushkov W.S.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

г. Пермь, Россия

The Perm national research polytechnical university

Аспирант/Graduate

E-Mail: Vova\_84\_07@mail.ru

## **Неразрушающий динамический метод контроля дорожных одежд**

### **Not destroying dynamic quality monitoring of road clothes**

**Аннотация:** Рассмотрены динамические модели колебания дорожной одежды. Исследована возможность оценки динамического модуля конструкции дороги в форме неограниченной полосы на упругом основании. Представлена диагностическая таблица устанавливающая связь модуля конструкции и упругих перемещений под действием движущегося автотранспорта.

**The Abstract:** Dynamic models fluctuation of road clothes are considered. The opportunity of an estimation of the dynamic module design of road in the form not limited strip on the elastic basis is investigated. The diagnostic table establishing communication of the module design and elastic movings under action of moving motor transport is submitted.

**Ключевые слова:** дорожная конструкция, неразрушающий метод, модуль упругости, математическая модель динамики сплошной среды.

**Key words:** The road design, not destroying method, the module elasticity, mathematical model dynamics of the continuous environment.

\*\*\*

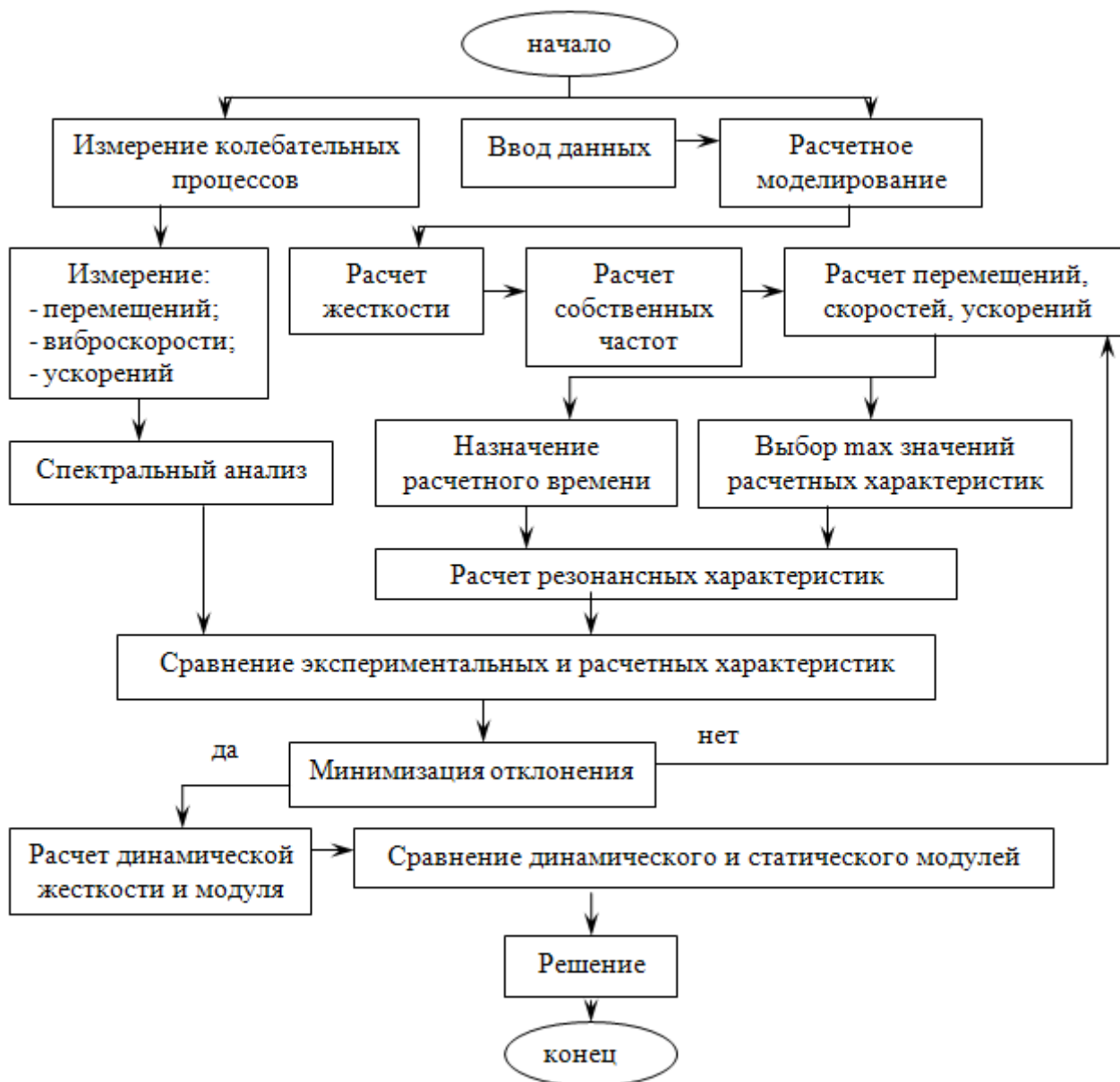
Общепризнанна актуальность эффективного контроля качества автомобильных дорог, являющегося основным показателем транспортно – эксплуатационных характеристик дорожных одежд. Проектирование, технология и организация строительства дорог, методы эксплуатации дорожных конструкций, экологические проблемы, автоматизация, информатизация, индивидуализация, а также требования применения простых, оперативных и ресурсосберегающих технологий оценки качества дорог стимулируют потребность поиска новых форм, методов разработки новых приборов контроля и технической диагностики состояния автомобильных дорог.

К числу проблем, которые нуждаются в новых решениях при создании дорог и надежной эксплуатации уже существующих, относится и проблема неразрушающих методов контроля качества. Одним из наиболее перспективных способов неразрушающего контроля является динамический метод диагностики прочности дорожного полотна, основанные на глубинных связях структуры и материалов дорожной конструкции с ее механическими

свойствами. Структура и материалы, полностью определяют физико – механические свойства дорожной одежды, в то же время определяют и особенности процессов генерирования и распространения упругих колебаний (скорость распространения, декремент затухания, спектральный состав, фазовые соотношения и т.д.). Поэтому между этими двумя группами параметров можно поставить однозначное соответствие, которое будет тем точнее, чем более детально могут быть зарегистрированы измерительной аппаратурой особенности динамических явлений. В процессе испытаний дорожной одежды для оценки ее прочности измеряют упругий прогиб от расчетной нагрузки при статическом и динамическом нагружении. Экспериментально - теоретический динамический метод оценки прочности конструкций дорожных одежд приведены на рис. 1.

Нагрузка, вызывающая упругий прогиб дорожной одежды, соответствует группе А (100 кН на ось) или группе Б (60 кН на ось). В результате испытаний статической нагрузкой вычисляют статический модуль упругости, который при оценке прочности сравнивают с общим расчетным модулем, определенным на основе требуемого статического модуля. Модуль упругости дорожной одежды, определенный в результате измерения динамических прогибов с помощью установок динамического нагружения, является динамическим модулем и при оценке прочности дорожной одежды, его сопоставляют с общим расчетным модулем, рассчитанным на основе требуемого динамического модуля упругости.

Связь прогибов дорожного полотна и модуля упругости устанавливается методом теории упругости на основе моделей деформирования сложных, неоднородных структур. Нагрузка на дорожное полотно также моделируется с учетом времени ее действия, способу передачи на упруго – вязкую среду, особенностям эксплуатации дорожной конструкции на перегонах.



**Рис. 1** Экспериментально – теоретический динамический метод контроля прочности дорожных одежд

Для случая бетонных покрытий автомобильных дорог упругие перемещения поверхности дорожной одежды можно рассматривать как результат деформации поперечно нагруженной пластины, лежащей на упругом основании [3]. Уравнение малых поперечных колебаний в рамках гипотез Кирхгофа – Лява можно представить в виде:

$$D\nabla\nabla W + \rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = q - kW, \quad (1)$$

где  $D$  – цилиндрическая жесткость;  $\nabla$  - оператор Лапласа;  $q$  – интенсивность поперечной нагрузки;  $k$  – коэффициент постели, зависящий от свойств основания;  $W$  – прогиб пластины;  $\rho$  - плотность материала;  $h$  – толщина пластины.

Решение уравнения (1) представляет собой определенную сложность и выражает динамический прогиб в виде ряда с коэффициентами, зависящими от характера нагрузки.

Затухание колебаний может быть учтено введением в соотношение (1) демпфирующих составляющих, основанных, например, на наследственной теории Больцмана – Вольтера.

Решение уравнения осложнено схемой принятия условий описания краев пластины, допущениями поведения основания, сложностью представления цилиндрической жесткости, заданием распределенной нагрузки. Сложное, длительное решение, большое количество параметров, определяющих прогиб конструкции в произвольной координате, неоднозначность решения и его неэкономичность не позволяют широко использовать этот метод на практике.

С помощью формулы (1) можно определить динамическое перемещение пластины и форму колебаний, что позволяет установить максимальное значение  $W$  в точках действия нагрузки. Это в свою очередь позволяет рассчитать упругий модуль дорожной одежды. Однако при испытаниях дорожной одежды колесом движущегося автомобиля невозможно измерение прогиба в точке контакта. Для получения необходимых результатов необходимо использовать математические модели деформирования дорожного полотна. Измеренные перемещения в точках, доступных для контроля, позволяют вычислить модуль упругости в зоне приложения нагрузки [5]. Измерение можно осуществить в точках, находящихся на определенном расстоянии от оси колес и сопоставить эти результаты с результатами расчета по формуле (1) при значении координат точки поверхности пластины соответствующих точкам контроля прогибов.

Другой моделью дорожной одежды является упругое полупространство, на которое действует вертикальная нагрузка от движущегося автомобиля. При этом в нем возбуждаются объемные поверхностные, продольные и поперечные волны. Продольные и поперечные волны затухают обратно пропорционально расстоянию от точки наблюдения до места приложения силы. Поверхностные волны убывают обратно пропорционально квадратному корню расстояния от источника возмущения [4].

В векторной форме уравнения движения частиц среды для однородного упругого изотропного пространства можно записать в виде [4]:

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \text{grad div } \bar{U} + \mu \nabla^2 \bar{U}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  - константы Ляме;  $\bar{U}$  - вектор перемещения частиц среды.

Установка вибродатчиков на поверхности дорожного полотна позволяет зарегистрировать параметры волновых процессов и, прежде всего, скорости распространения волны. В свою очередь скорость распространения волны позволяет рассчитать модуль упругости. Материалы дорожных конструкций отличаются гранулометрическим составом, плотностью и упругими свойствами, что ведет к различию модулей упругости. Кроме того, модуль упругости зависит от скорости приложения нагрузки. Сложные волновые процессы в дорожной конструкции, связанные с затуханием, расширением, интерференцией не позволяют создать достаточно простые и достоверные методики определения критериальных величин.

В ряде случаев колебательные процессы дорожных одежд представляют в форме дифференциальных уравнений движения [2]. Если рассматривать колебания, возбуждаемые нагрузкой на дорогу, как движение элемента поверхности дороги и присоединенной массы грунта, то уравнение движения можно записать в виде:

$$My'' + \eta y' + cFy = P(t), \quad (3)$$

где  $M$  – подвижная масса;  $\eta$  – коэффициент неупругого сопротивления;  $c$  – коэффициент жесткости;  $F$  – площадь колеблющейся массы;  $y, y', y''$  – перемещения массы и ее производные;  $P(t)$  – действующая нагрузка.

Решение уравнения (3) зависит от вида правой части. Амплитуда колебаний позволяет рассчитать коэффициент жесткости, следовательно, определить модуль упругости дорожной одежды в целях задач диагностики. Однако, определенные допущения при моделировании колебательного процесса не позволяют достаточно уверенно характеризовать упругие свойства дорожных одежд.

Приведенная масса покрытия с присоединенной массой грунта определяется из условия, что кинетическая энергия системы, состоящая из покрытия с присоединенной массой основания, равняется кинетической энергии сосредоточенной массы, расположенной в заданной точке. Принимается форма упругой поверхности плиты. Решение записывается в функциях Бесселя.

Затухание  $\eta$  определяется опытным путем. Нагрузка  $P(t)$  представляет собой неподвижную силу в центре приведения, меняющую свое значение во времени. Закон изменения приведенной силы во времени определяется из условия, что статическое перемещение центра приведения в любое мгновение от любой силы при ее фактическом для данного мгновения положении равняется перемещению такого же центра от приведенной силы с соответственно подобранным значением [2].

Такие математические модели отличаются сложностью определения структурных составляющих и требуют значительных временных затрат на получение решения.

Стремление создать оперативную технологию оценки прочности дорожного полотна, используя динамические методы, требует решений основанных на применении моделей распространения волн деформаций, способов создания нагрузки, соответствующей реальным условиям эксплуатации и осуществление измерений динамических параметров для целей принятия решений [6].

Рассмотрим модель колебаний дорожного полотна на основе динамического поведения длинной балки, лежащей на упругом основании, при действии подвижной сосредоточенной нагрузки [1]. Уравнение движения балки можно записать в виде:

$$\frac{\partial^4 x}{\partial z^4} + 4v^2 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 4\mu^4 x = \frac{1}{EJ} f(z, t), \quad (4)$$

где  $x$  – прогиб балки;  $EJ$  – жесткость поперечного сечения балки при изгибе;

$$4v^2 = m_o / EJ; \quad 4\mu^4 = k / EJ;$$

$k$  – коэффициент постели;  $f(z, t)$  – интенсивность нагрузки.

Если нагрузка, сохраняя свою величину, движется вдоль оси балки со скоростью  $v$ , то:

$$f(z, t) = f(z - vt)$$

при  $z - vt = \xi$ , решение уравнения (4) запишем в виде:

$$x = e^{\alpha\xi} (c_1 \cos \beta\xi + c_2 \sin \beta\xi) + e^{-\alpha\xi} (c_3 \cos \beta\xi + c_4 \sin \beta\xi) + \Phi(\xi),$$

где  $\alpha = \sqrt{\mu^2 - v^2 v^2}$ ,  $\beta = \sqrt{\mu^2 + v^2 v^2}$ ,

$\Phi(\xi)$  – частное решение неоднородного уравнения.

При  $\xi > 0$

$$x = -\frac{P}{8EJ\mu^2\alpha} e^{-\alpha\xi} \left( \cos \beta\xi + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta\xi \right),$$

При  $\xi < 0$

$$x = -\frac{P}{8EJ\mu^2\alpha} e^{-\alpha\xi} \left( \cos \beta\xi - \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta\xi \right),$$

где  $P$  – величина силы.

Прогиб под силой равен:

$$|x|_{\xi=0} = \frac{P}{8EJ\mu^2\alpha}, \quad (5)$$

Затухание прогибов по мере удаления от точки приложения нагрузки следует экспоненциальному закону.

Соотношение (5) дает возможность определить прогиб дорожного полотна под колесом движущегося автомобиля. В то же время на практике для определения модуля упругости используется соотношение на основе результатов измерения прогибов под колесом автомобиля:

$$E_{\phi} = \frac{PD(1-\mu^2)}{l}, \quad (6)$$

где  $P$  – среднее удельное давление, передаваемое испытательной нагрузкой, Па;  $D$  – диаметр круга, равновеликого отпечатку площади, передающей расчетную нагрузку, м;  $l$  – прогиб дорожной одежды;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

В процессе динамических испытаний дорожного полотна в точке, близкой к обочине дороги, нами был установлен вибродатчик. Измерения проводились с помощью прибора ВИП – 2 и индукционного датчика Д – 21А. Датчик устанавливался на металлическую пластинку размером 75x55x5 мм с центральным отверстием диаметром 8 мм. Пластина с датчиком плотно прижималась к поверхности дорожного полотна в точке наблюдения. Измеренное значение прогиба на обочине дороги и принятый закон изменения амплитуды колебаний по вибротрассе позволяет получить числовое значение прогиба под колесом автомобиля.

Определение модуля упругости дороги осуществляется по данным таблицы, по диагонали которой расположены элементы, соответствующие числовым значениям экспоненты для конкретных пар чисел «прогиб - координата».

Таблица

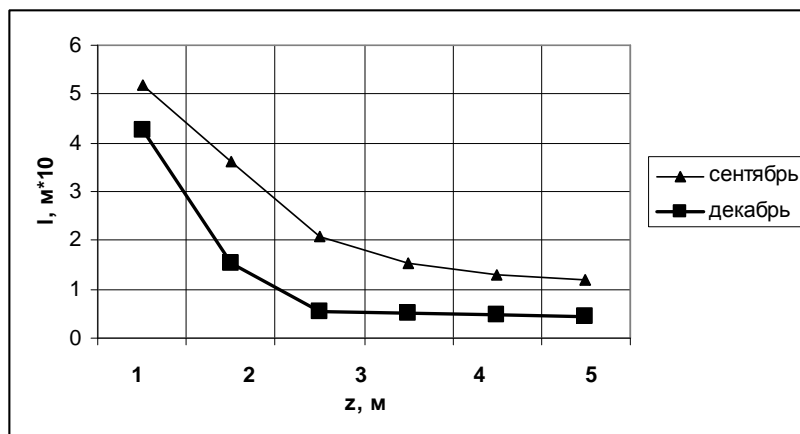
Значение экспоненты при конкретном модуле упругости

Прогиб $x$ $\xi$ координата	$x_{\max}$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	...	$x_n$
0	1	-	-	-	-	-
1	-	$\frac{x_1}{x_{\max}}$	-	-	-	-
2	-	-	$\frac{x_2}{x_{\max}}$	-	-	-
3	-	-	-	$\frac{x_3}{x_{\max}}$	-	-
4	-	-	-	-	$\frac{x_4}{x_{\max}}$	-
...						
j	-	-	-	-	-	$\frac{x_n}{x_{\max}}$

Расчет ведется при принятых значениях  $E$ ,  $J$ ,  $k$ ,  $m_0$ ,  $v$ . Поскольку  $J$ ,  $k$ ,  $m_0$ ,  $v$  - изменяются незначительно, то определяющим будет являться только модуль упругости. Таким образом, для различных значений  $E$  возможно построение таблиц, по диагонали которых для различных значений «прогиб - координата» определены значения  $e^{-\alpha\xi}$ . Фазовые проблемы не рассматривались.

Анализ полученных результатов показал, что при нагрузке на дорожное полотно движущимся автомобилем, возможна регистрация прогибов поверхности дороги в точке, находящейся вблизи обочины. Прогибы в точке контроля являются функцией расстояния до колеи движения автотранспорта и существенно зависят от температуры дорожной конструкции. В зимнее время прогибы в точке контроля на расстоянии около 3 метров до колеи практически в два раза меньше, чем в сентябре месяце на одном и том же участке дороги (рис. 2).

Исследования, направленные на разработку методики оперативного контроля прочности автомобильных дорог с использованием виброизмерительной аппаратуры, подтверждают наличие корреляционных связей между параметрами прочности дорожного полотна и процессами распространения прогибов в направлении от колеи к обочине. Механизм образования перемещений возможно моделировать на основе изгибных колебаний балок, лежащих на упругом основании. Дальнейшие экспериментальные работы позволяют установить зависимость между характером нагружения, температуры дорожного полотна, его влажности и других параметров и величин прогибов, которые с достаточной точностью могут быть измерены в реальных условиях эксплуатации дорожных конструкций.



**Рис. 2** Экспериментальные данные прогибов дорожного полотна в зависимости от расстояния до колеи движущегося транспорта: КамАЗ  $V = 60$  км/ч

В заключении отметим, что динамические методы оценки прочностных свойств дорожных одежд требуют применения математических моделей деформирования дорожных конструкций, позволяют с различным приближением получить пространственно – временные множество состояний дорожного полотна с возможностью различной степенью точности восстанавливать параметры моделируемой среды. Рассмотренный в данной работе подход не требует больших затрат на осуществление вычислительных процедур и использования сложных аппаратных средств для получения первичной информации. Организация регулярного контроля прочности дорожных одежд и накопленный опыт позволяют установить корреляционные связи результатов контроля виброперемещений дорожных конструкций и физико – механических характеристик материалов конструкции дороги, создать оперативный метод диагностики технического состояния дорожных одежд по параметрам прочности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. М.: высшая школа, 1972. – 416 с.
2. Глушков Г.И., Бабков В.Ф., Тригопи В.Е. Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог / учеб. пособие для ВУЗов; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1994. – 349 с.
3. Тимошенко С.П., Войновский - Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Наука, 1996. – 635 с.
4. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971. – 557 с.
5. Кычкин В.И., Юшков В.С. Перспективный метод отраслевой системы вибродиагностики автомобильных дорог // Журнал « Молодой ученый» № 11 Чита 2012 г. С. 65 – 68.
6. Корочкин А.В. Расчет жесткой дорожной одежды с учетом воздействия движущегося транспортного средства // Наука и техника в дорожной отрасли.- 2011.- № 2. – С.8 – 9.

**Рецензент:** д.т.н., профессор Олонцев Валентин Федорович зам. директора по научной работе Пермского института железнодорожного транспорта