

Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Ляпин А.А. Комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд с использованием методов неразрушающего контроля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 2. – С. 111–130. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.08

Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Liapin A.A. Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 2. Pp. 111–130. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.08



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2016.2.08

УДК 531.3:625.7/8

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Е.В. Углова, А.Н. Тиратурян, А.А. Ляпин

Ростовский государственный строительный университет, Ростов-на-Дону, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 4 марта 2016 г.
Принята: 15 мая 2016 г.
Опубликована: 30 июня 2016

Ключевые слова:

нежесткие дорожные одежды, обратный расчет, модуль упругости, динамическое нагружение, чаша прогибов, амплитудно-частотная характеристика ускорения

АННОТАЦИЯ

Предложен комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд с использованием методов неразрушающего контроля, включающий в себя как анализ расчетных и экспериментальных чаш максимальных динамических прогибов, так и анализ характеристик динамического отклика нежесткой дорожной конструкции в частотной области при кратковременном ударном нагружении. Представлены результаты численного эксперимента по моделированию влияния потери сцепления между отдельными элементами нежестких дорожных одежд на форму амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ускорения на поверхности дорожной одежды. Установлено что при полном межслойном сцеплении между всеми элементами нежесткой дорожной конструкции в амплитудно-частотной характеристике ускорения присутствует единственный частотный экстремум. При потере межслойного сцепления между отдельными элементами нежесткой дорожной конструкции на амплитудно-частотной характеристике проявляется несколько локальных частотных экстремумов. Адекватность результатов численного моделирования обосновывается хорошим соответствием между формами амплитудно-частотных характеристик ускорения, рассчитанных с использованием аналитической модели динамического напряженно-деформированного состояния, и амплитудно-частотными характеристиками, зарегистрированными на поверхности покрытия нежестких дорожных одежд в натурных условиях. Рассмотрены вопросы построения чаш максимальных динамических прогибов на поверхности нежесткой дорожной одежды при воздействии кратковременного ударного нагружения. Приведены примеры применения разработанного комплексного подхода для решения задач оценки модулей упругости конструктивных элементов нежестких дорожных одежд, устроенных на участках автомобильных дорог. Определены перспективы развития предлагаемого подхода, неразрывно связанные с совершенствованием методов и средств анализа поведения дорожной конструкции в частотной области при динамическом нагружении.

© ПНИПУ

© Углова Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор, e-mail: Uglova.ev@yandex.ru
Тиратурян Артем Николаевич – кандидат технических наук, старший преподаватель, e-mail: Tiraturjan@list.ru
Ляпин Александр Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: lyapin.rnd@yandex.ru

Evgenia V. Uglova – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: Uglova.ev@yandex.ru
Artem N. Tiraturyan – PhD in Technical Sciences, Senior Lecture, e-mail: Tiraturjan@list.ru
Alexandr A. Lyapin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: lyapin.rnd@yandex.ru

INTEGRATED APPROACH TO STUDYING CHARACTERISTICS OF DYNAMIC DEFORMATION ON FLEXIBLE PAVEMENT SURFACE USING NONDESTRUCTIVE TESTING

E.V. Uglova, A.N. Tiraturyan, A.A. Lyapin

Rostov State University of Civil Engineering, Rostov-on-Don, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 4 March 2016
Accepted: 10 May 2016
Published: 30 June 2016

Keywords:

flexible pavement, back calculation, elastic modulus, dynamic load, deflection bowl, amplitude-frequency characteristic

ABSTRACT

A comprehensive approach to studying dynamic deformation characteristics on the surface of non-rigid pavements using nondestructive inspection techniques was proposed. It includes the analysis of the calculated and experimental bowls of maximum dynamic deflection and analysis of the dynamic response characteristics of a non-rigid road design in the frequency domain with a short-term shock loading. The results of the numerical simulation experiment were given related to the effect of adhesion loss between individual elements of non-rigid pavements on the form of amplitude-frequency characteristics (AFC) of acceleration on the pavement surface. It is established that there is only one frequency extreme point present during a complete interlaminar adhesion between all elements of the non-rigid road structure in the amplitude-frequency characteristic of acceleration frequency. With the loss of interlayer adhesion between individual elements of the non-rigid road construction, some local frequency extremes occur in the frequency response. The adequacy of numerical simulation results is based on a good match between the forms of acceleration amplitude-frequency characteristics which were calculated using an analytical model of dynamic stress-strain state and amplitude-frequency characteristics registered on the surface of non-rigid pavement coatings in natural conditions. The paper considers the issues of constructing bowls with a maximum dynamic deflection on the surface of a non-rigid pavement under the influence of a short-term shock loading. There are examples of applying the integrated approach to address the evaluation elasticity modules of structural elements in non-rigid pavements that are arranged on highways sections. This approach might be further developed to improve methods and tools for analyzing road structure behavior in the frequency domain under dynamic loading.

© PNRPU

Введение

Одним из наиболее ответственных и дорогостоящих представителей класса многослойных конструкций, применяемых в строительной практике, являются нежесткие дорожные одежды, воспринимающие нагрузку от транспортных средств, движущихся по автомобильной дороге, и передающие ее на грунт земляного полотна. Важнейшей проблемой, стоящей перед дорожниками всех стран, является преждевременное разрушение дорожных одежд интенсивным динамическим воздействием транспортного потока и негативным влиянием природно-климатических факторов. Решается эта проблема путем проведения ремонтно-восстановительных работ, включающих в себя капитальный ремонт и реконструкцию. Однако очень важно, чтобы проводимый комплекс ремонтных мероприятий был «адресным», т.е. нацеленным на устранение конкретной причины разрушения.

Применение же современных дорогостоящих методов и средств восстановления эксплуатационного состояния нежестких дорожных конструкций требует тщательного их обоснования путем проведения детальной диагностики состояния нежесткой дорожной одежды. При этом научной базой для проведения диагностики являются современные положения смежных наук, в первую очередь механики деформируемого твердого тела и геофизики.

Этому направлению посвящены труды отечественных и зарубежных ученых, в частности Ю.М. Яковлева, А.К. Апестина, М.С. Коганзона, В.А. Лейвака, Н. Beckedahl, Viswanathan, В. Guzina, W. Alcasawneh, S. Nazaryan и др. [1–9].

В последние годы большое внимание разработке современных неразрушающих методов диагностики состояния нежестких дорожных одежд уделялось в работах ростовской школы механики нежестких дорожных одежд под руководством доктора технических наук, профессора Е.В. Угловой. В частности, в отдельных работах были предложены новые экспериментальные способы оценки состояния нежестких дорожных одежд с использованием метода спектрального анализа волновых полей в конструкции дорожной одежды при динамическом воздействии [10–12].

Этот путь был выбран и активно разрабатывался прежде всего американскими учеными, такими как S. Nazaryan, V. Gugunski и др. [13–15]. В частности, в их работах был подробно освещен разработанный ими метод SASW (метод спектрального анализа поверхностных волн), пришедший из геофизики и адаптированный для оценки состояния асфальтобетонных слоев и отдельных элементов дорожных одежд. Для реализации данной методики был разработан прибор SPA (seismic pavement analyzer) (рис. 1), представляющий собой прицеп со смонтированными на нем двумя ударными устройствами, тремя геофонами и пятью акселерометрами для регистрации поверхностных волн. На основе полученных с использованием SPA данных производится построение профиля скорости сдвиговых волн в конструкции дорожной одежды с последующим пересчетом значений скорости в модули упругости отдельных элементов конструкции.

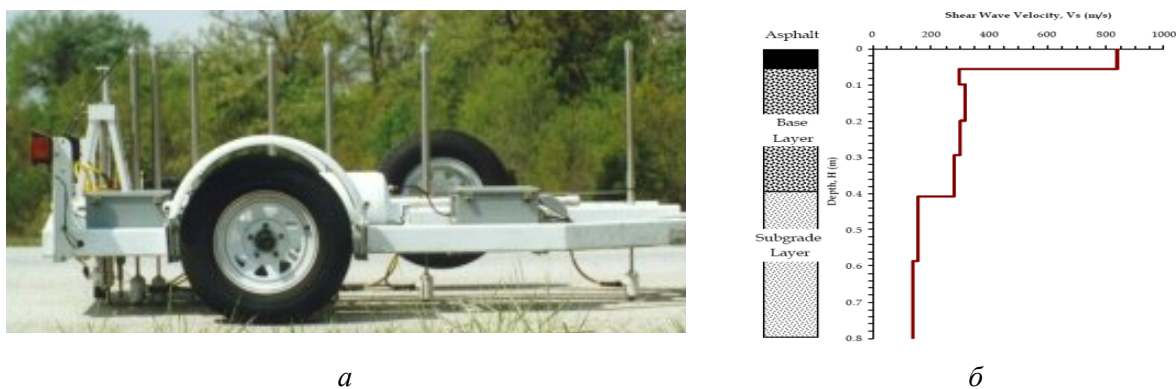


Рис. 1. Установка SPA (а) и пример обработки данных, получаемых с использованием метода SASW, (б)

Интерес к оценке состояния нежестких дорожных конструкций именно с точки зрения исследования волновых эффектов, возникающих в конструкции дорожной одежды, обусловлен также возможностью выявления дефектов в ее структуре. Подобные методы выявления дефектов получили широкое распространение, например, при проведении диагностики бетонных и металлических конструкций.

Распространение в отечественной и зарубежной практике получил также метод «backcalculation», в основе которого экспериментальная регистрация чаш прогибов на поверхности нежесткой дорожной одежды с использованием установок ударного нагружения (дефлектометров падающего груза – FWD) (рис. 2) [16–18].

Производится построение расчетной чаши прогибов на поверхности дорожной одежды с использованием механико-математической модели на основе начальных параметров – модулей упругости слоев, толщин слоев, информации о нагрузке, передаваемой на покрытие дорожной одежды. После чего производится корректировка расчетной чаши прогибов относительно экспериментальной с одновременным пересчетом начальных значений модулей упругости. Значения модулей упругости, при которых расчетная чаша

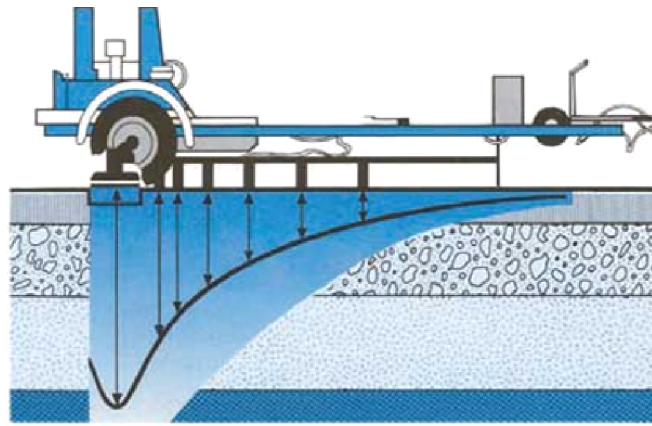


Рис. 2. Регистрация чаши прогибов с использованием установки FWD в натуральных условиях

прогибов максимально близка к экспериментальной, и являются фактическими значениями модулей упругости слоев дорожной одежды на стадии эксплуатации. Однако данный метод содержит в себе ряд недостатков. В частности, практически все применяемые на данный момент механико-математические модели, используемые для построения расчетных чаш прогибов, являются статическими, базирующимися на модернизированном решении Бурмистера об определении напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства под действием неподвижного круглого штампа. Также слабым местом данного подхода является процедура корректировки, реализуемая при сопоставлении расчетных и экспериментальных чаш прогибов на поверхности дорожной одежды. Применяемые в существующих программных комплексах процедуры корректировки хороши для дорожных конструкций с небольшим числом слоев от 2 до 3. Для дорожных одежд с большим числом слоев резко увеличивается неопределенность корректировки чаш прогибов, являющейся, по сути, процедурой итерационного поиска глобального минимума функции ошибки. Также следует отметить, что в существующих механико-математических моделях не учитываются неоднородности, разуплотнения и потеря межслойного сцепления между отдельными элементами нежесткой дорожной одежды.

На наш взгляд, устранение существующих неопределенностей в процедуре определения модулей упругости отдельных элементов нежестких дорожных одежд возможно путем комплексного подхода как к анализу чаш прогибов дорожной одежды так и к анализу частотных характеристик нежесткой дорожной одежды, регистрируемых при ударном нагружении.

1. Методика

В последние годы в Ростовском государственном строительном университете (РГСУ) был накоплен значительный опыт в области исследований динамики нежестких дорожных одежд, и одним из наиболее актуальных и практически значимых вопросов является разработка комплексного подхода к исследованию характеристик динамического деформирования нежестких дорожных одежд как во временной, так и в частотной областях [11, 12, 19].

Для отработки основных положений и критериев оценки состояния нежестких дорожных конструкций в РГСУ была разработана аналитическая модель динамического напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства, базирующаяся

на современных положениях теории упругости и вязкоупругости. Постановка задачи записывается следующим образом. Пусть область D представляет собой N -слойное упругое полупространство: $D = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_N$, описываемое в цилиндрической системе координат (R, θ, z) как $D_1 = \{R \in (0, +\infty), \theta \in (0, 2\pi), z < 0\}$ – полупространство; $D_j = \{R \in (0, +\infty), \theta \in (0, 2\pi), z \in (z_{j-1}, z_j)\}$, $z_j = \sum_{i=1}^j h_i$; ($h_1 = 0$) – j -й слой ($j = 2, \dots, N$) (рис. 3).

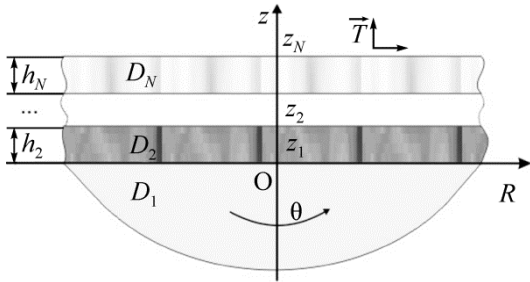


Рис. 3. Область расчета в цилиндрической системе координат

Упругие свойства сред в D_j , $j = 0, 1, \dots, N$ описываются плотностью ρ_j и коэффициентами Ламе λ_j, μ_j или соответственно модулем упругости E_j и коэффициентом Пуассона ν_j :

$$E_j = \mu_j \frac{3\lambda_j + 2\mu_j}{\lambda_j + \mu_j}, \quad \nu_j = \frac{\lambda_j}{2(\lambda_j + \mu_j)}.$$

В дальнейшем все параметры, имеющие размерность длины, будут отнесены к характерному линейному размеру a без изменения в их обозначениях.

Движение среды определяется решением системы уравнений в частных производных

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}^{(j)}(\mathbf{r}, t) = \rho_j \frac{\partial^2 \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\sigma}^{(j)}(\mathbf{r}, t)$ – тензор напряжений Коши; $\mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}, t)$ – перемещения в точке наблюдения $\mathbf{r} = \{R, \theta, z\}$ в момент времени t ; индекс j соответствует номеру слоя (компоненты) слоистой конструкции (решение уравнений разыскивается отдельно для каждого j с последующим сопряжением решений вдоль границ раздела однородных сред).

Отметим, что предлагаемая математическая модель соответствует решению задачи об ударном воздействии на конструкцию в нестационарной постановке. При этом данное решение в условиях ограниченного по времени импульсного воздействия и затухания сигнала при удалении от источника воздействия строится методом дискретного гармонического анализа в виде ряда, использующего решения задач об установившихся гармонических колебаниях с различными частотами ω .

Отсюда при рассмотрении конкретных задач динамики (в том числе в нестационарной постановке) будем опираться на решения соответствующих краевых задач для режима установившихся гармонических с частотой ω колебаний. В предположении этого все соотношения далее выписаны в амплитудных функциях, в которых временной множитель $\exp(-i\omega t)$ опущен.

Деформацию среды примем осесимметричной:

$$\mathbf{u}^{(j)} = \{u_R^{(j)}(R, z), u_z^{(j)}(R, z)\}.$$

На границе области считаем заданными вектор-функции напряжений

$$\mathbf{t}^{(N)} = \text{col}\{\sigma_z^{(N)}, \tau_{Rz}^{(N)}\} = \mathbf{T}(R), \quad z = z_N, \quad R \in \Omega. \quad (2)$$

Система (2) с использованием закона Гука для линейно-упругого материала, связывающего компоненты тензора напряжений $\sigma^{(j)}$ с компонентами тензора малых деформаций $\epsilon^{(j)}$,

$$\sigma^{(j)} = 2\mu_j \epsilon^{(j)} + \lambda_j \mathbf{E} \operatorname{tr} \epsilon^{(j)}, \quad (3)$$

может быть сведена к эквивалентной системе уравнений Ламе относительно функций перемещений точек среды:

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) - \frac{\theta_{j1}^2}{\theta_{j2}^2} \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) + \theta_{j1}^2 \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) = 0, \quad (4)$$

где $\theta_{j1}^2 = \omega^2 a^2 / V_{pj}^2$, $\theta_{j2}^2 = \omega^2 a^2 / V_{sj}^2$ – приведенные частоты колебаний; $V_{pj} = \sqrt{(\lambda_j + 2\mu_j) / \rho_j}$, $V_{sj} = \sqrt{\mu_j / \rho_j}$ – скорости распространения продольных и поперечных волн в j -й среде. При наличии диссипации в среде, определяющейся вязкоупругими свойствами материала, коэффициенты Ламе становятся комплексными, что, в свою очередь, приводит к комплексности приведенных частот. В этом случае диссипативные свойства материалов конструкции будем определять тангенсами углов потерь отдельно для продольных и поперечных волн $\operatorname{tg} \gamma_p^{(j)}$, $\operatorname{tg} \gamma_s^{(j)}$. При этом $\operatorname{tg} \gamma_p^{(j)} = \frac{\operatorname{Im}(\theta_{j1}^2)}{\operatorname{Re}(\theta_{j1}^2)}$, $\operatorname{tg} \gamma_s^{(j)} = \frac{\operatorname{Im}(\theta_{j2}^2)}{\operatorname{Re}(\theta_{j2}^2)}$.

Условия стыковки слоев между собой, а также полупространства с вышележащим слоем могут приниматься как жесткими, так и однородными условиями скользящего контакта, по одной или нескольким границам разделов.

На бесконечности выполняются условия излучения в форме принципа предельного поглощения. Для рассматриваемых систем «дорожная конструкция – грунт», характеризующихся большей жесткостью поверхностных слоев, применение данного принципа эквивалентно принципу излучения Зоммерфельда, определяющего в качестве решений только волны, уходящие от источника колебаний на бесконечность.

Данная модель легла в основу программного комплекса Vibrolab, разработанного в РГСУ и предназначенного для анализа характеристик динамического деформирования на поверхности нежесткой дорожной конструкции при динамическом воздействии. Также данный программный комплекс активно применяется в рамках метода «обратного» расчета модулей упругости элементов нежестких дорожных одежд. Алгоритм данного метода приведен на рис. 4.

Метод обратного расчета включает в себя три основных этапа: 1) натурные испытания нежесткой дорожной конструкции с экспериментальной регистрацией характеристик динамического деформирования на поверхности нежесткой дорожной одежды с использованием установки ударного нагружения; 2) численное моделирование характеристик динамического деформирования нежесткой дорожной конструкции с построением расчетной чаши максимальных динамических прогибов; 3) сопоставление расчетной и экспериментальной чаш максимальных динамических прогибов с последующей корректировкой расчетной чаши прогибов относительно экспериментальной.

Отметим, что получение численных значений прогиба поверхности дорожной конструкции связано с операциями численного расчета интегралов Фурье при решении задач о стационарных колебаниях многослойной среды и последующего суммирования результатов в соответствии с методом гармонического анализа для отыскания нестационарного

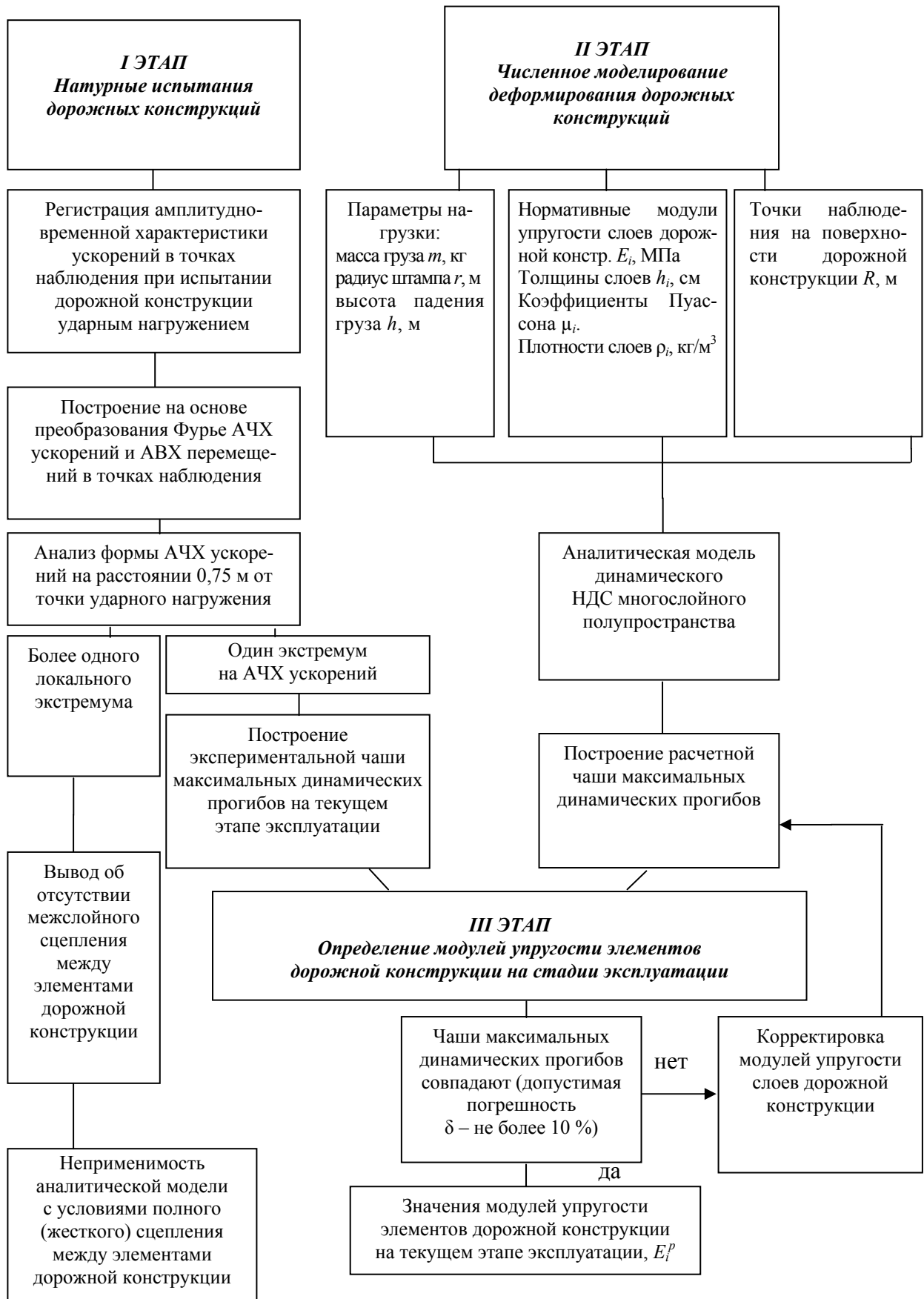


Рис. 4. Алгоритм метода «обратного» расчета модулей упругости элементов нежестких дорожных конструкций на стадии эксплуатации

отклика конструкции. Данные операции обладают достаточной вычислительной устойчивостью. Шаг интегрирования и количество членов ряда определяются в ходе проведения численного анализа для достижения заданной относительной погрешности вычислений (при получении итогового результата не более 0,001). Верификация результатов осуществлялась путем их сравнительного анализа с результатами, полученными с применением конечно-элементного комплекса ANSYS.

На третьем этапе при сопоставлении расчетной и экспериментальной чаш максимальных динамических прогибов использованы процедуры численной минимизации среднеквадратичной ошибки сравнения расчетных и экспериментальных данных. Наилучшие результаты получены при использовании метода координатного спуска. При этом оптимальные параметры метода определялись на основе предварительного численного анализа. При наличии неустойчивости основного процесса минимизации ошибки (нескольких локальных минимумов) параллельно применялся классический генетический алгоритм.

Для проведения экспериментальной регистрации характеристик динамического деформирования на поверхности нежесткой дорожной одежды использовался мобильный виброизмерительный комплекс ВИК-1, разработанный в РГСУ (рис. 5).

В состав виброизмерительного комплекса входят: 1 – малогабаритная установка ударного нагружения; 2 – многоканальный виброизмерительный прибор; 3 – комплект датчиков-акселерометров для регистрации ускорений на поверхности покрытия нежесткой дорожной одежды.

Применение данного виброизмерительного комплекса обусловлено возможностью исследования характеристик динамического деформирования в широком частотном диапазоне, что связано с малым временем контактного взаимодействия между штампом малогабаритной установки ударного нагружения и поверхностью покрытия дорожной одежды, составляющим 0,003 с (рис. 6).

При приложении ударной нагрузки к поверхности покрытия производится регистрация амплитудно-временной характеристики ускорений в точках установки датчиков-акселерометров. Обработка зарегистрированного сигнала осуществляется на основе преобразования Фурье с построением амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ускорений на поверхности дорожной конструкции и амплитудно-временной характеристики (АВХ) перемещений по каждому из датчиков. Максимальные значения вертикальных перемещений, зарегистрированные на АВХ перемещений, представляют собой чашу максимальных динамических прогибов (рис. 7).

Однако следует отметить, что наряду с чашей максимальных динамических прогибов достаточно информативной является амплитудно-частотная характеристика ускорений покрытия дорожной конструкции. В частности, были проведены исследования, позволяющие

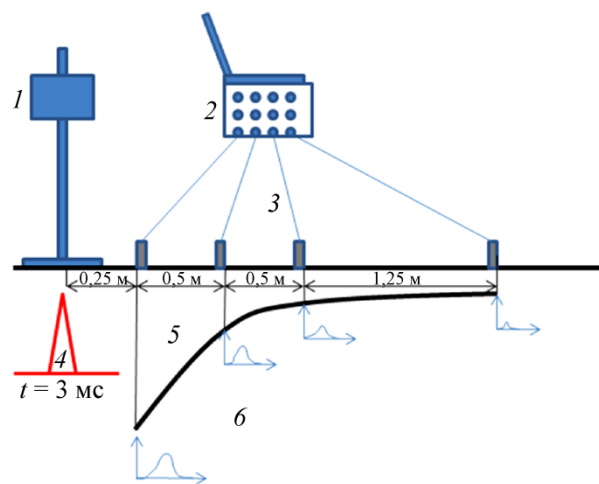


Рис. 5. Общий вид мобильного виброизмерительного комплекса ВИК-1: 1 – малогабаритная установка ударного нагружения, 2 – многоканальный виброизмерительный прибор, 3 – датчики-акселерометры, 4 – импульс ударного нагружения, 5 – чаша максимальных динамических прогибов, 6 – амплитудно-частотные характеристики ускорения по каждому из датчиков

сделать вывод о том, что прямое влияние на форму АЧХ ускорений покрытия дорожной одежды оказывают условия сцепления на границах слоев нежесткой дорожной одежды. Для подтверждения данного предположения был проведен численный эксперимент по исследованию влияния условий сцепления между элементами нежесткой дорожной конструкции на форму АЧХ ускорения с использованием аналитической модели динамического напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства.

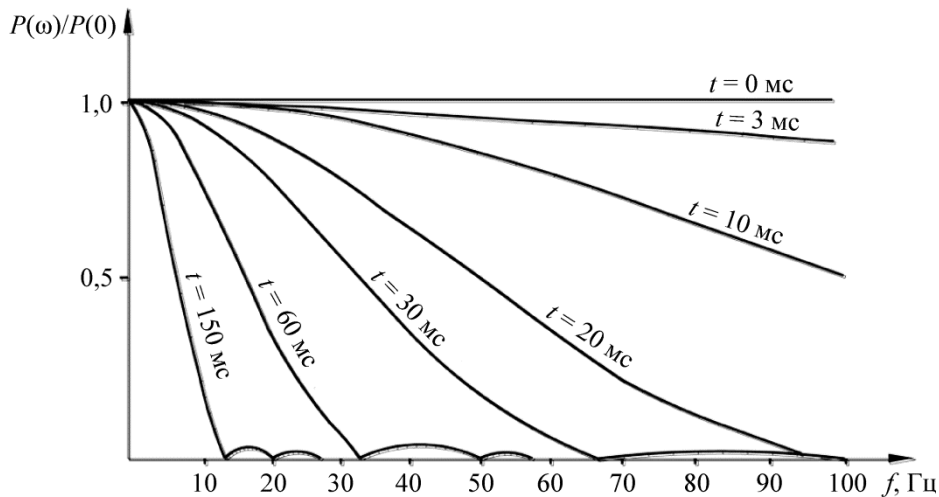


Рис. 6. Спектры нагрузок, возбуждаемые установками динамического нагружения с различным временем контактного соударения: $P(\omega)$ – спектр силового воздействия; $P(0)$ – постоянная составляющая спектра силового воздействия

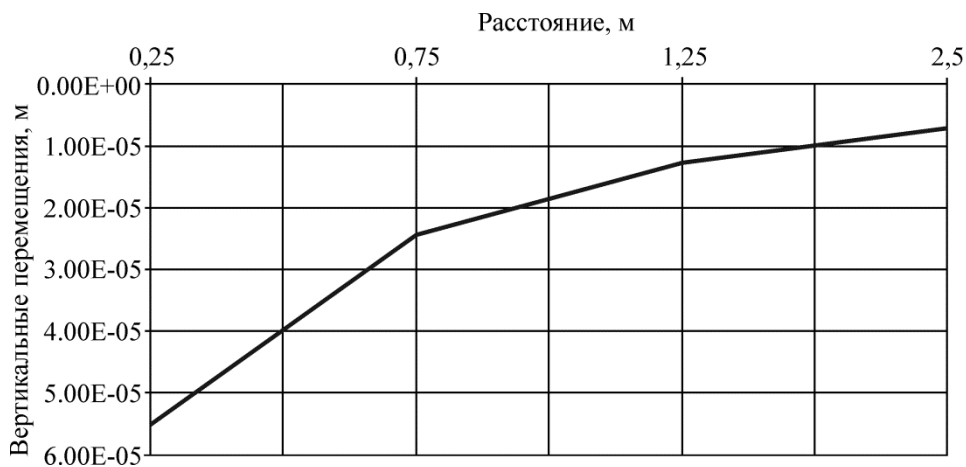


Рис. 7. Экспериментальная чаша максимальных динамических прогибов

В ходе численного эксперимента рассматривались следующие случаи:

- жесткое межслойное сцепление между всеми элементами дорожной конструкции;
- потеря межслойного сцепления между пакетом асфальтобетонных слоев и основанием дорожной конструкции;
- полная потеря межслойного сцепления между всеми элементами нежесткой дорожной конструкции.

Постановка условий на границе раздела между элементами дорожной одежды в случае отсутствия сцепления записывалась следующим образом:

$$U_z^{(j)}(R, Z_j) = U_z^{(j+1)}(R, Z_j); \sigma_z^j(R, Z_j) = \sigma_z^{j+1}(R, Z_j); \tau_{Rz}^j(R, Z_j) = \tau_{Rz}^{j+1}(R, Z_j) = 0. \quad (5)$$

Приведенные уравнения определяют равенство вертикальных перемещений (U_z) и нормальных напряжений (σ_z), а также отсутствие касательных напряжений (τ_{Rz}) на границах смежных слоев дорожной конструкции. Результаты численного моделирования амплитудно-частотных характеристик ускорения в зависимости от условий межслойного сцепления на границах слоев приведены на рис. 8.

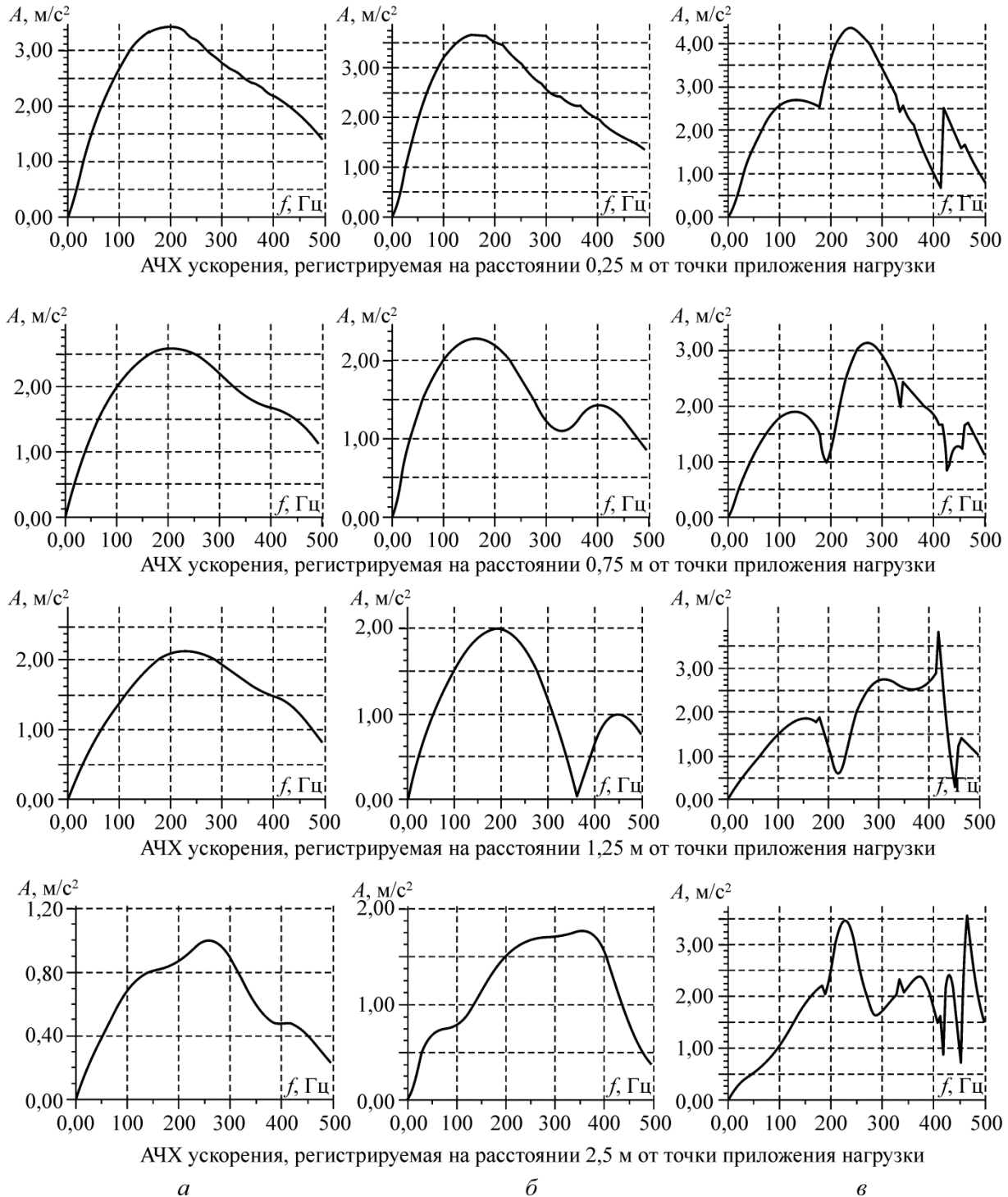


Рис. 8. Влияние условий сцепления на границах слоев дорожной конструкции на форму расчетной АЧХ ускорения (по оси ординат – ускорения, m/s^2 ; по оси абсцисс – частота, Гц): *а* – полное межслойное сцепление; *б* – потеря сцепления между слоями покрытия и основания; *в* – полное отсутствие сцепления между всеми слоями

На основе проведенного численного моделирования можно сделать следующие выводы.

При полном межслойном сцеплении на АЧХ ускорения поверхности нежесткой дорожной одежды присутствует один четко выделенный частотный экстремум.

При потере межслойного сцепления между пакетом слоев асфальтобетона и основанием дорожной конструкции на АЧХ ускорения поверхности нежесткой дорожной одежды, зарегистрированной на расстоянии 0,75–1,25 м от точки приложения нагрузки, присутствуют два частотных экстремума в диапазонах 0–220 Гц и 220–500 Гц.

При потере межслойного сцепления между всеми элементами нежесткой дорожной конструкции на АЧХ ускорения, регистрируемых на расстоянии 0,25–2,5 м, выделяется ряд частотных экстремумов, локализуемых в частотных областях 0–200; 200–400; 400–500 Гц.

Для подтверждения адекватности результатов моделирования была произведена экспериментальная регистрация АЧХ ускорения поверхности дорожной конструкции и сопоставлена с результатами расчета по аналитической модели. Результаты сопоставления экспериментальных и расчетных АЧХ ускорения приведены на рис. 9. Как видно из представленного графика, формы экспериментальных АЧХ ускорения, зарегистрированных на поверхности покрытия дорожной одежды, достаточно близки с расчетными АЧХ ускорения, полученными с использованием аналитической модели динамического напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства. Относительная погрешность между экспериментальными и расчетными частотными экстремумами на АЧХ ускорения не превышает 15 %, что подтверждает адекватность полученных в ходе численного моделирования результатов.

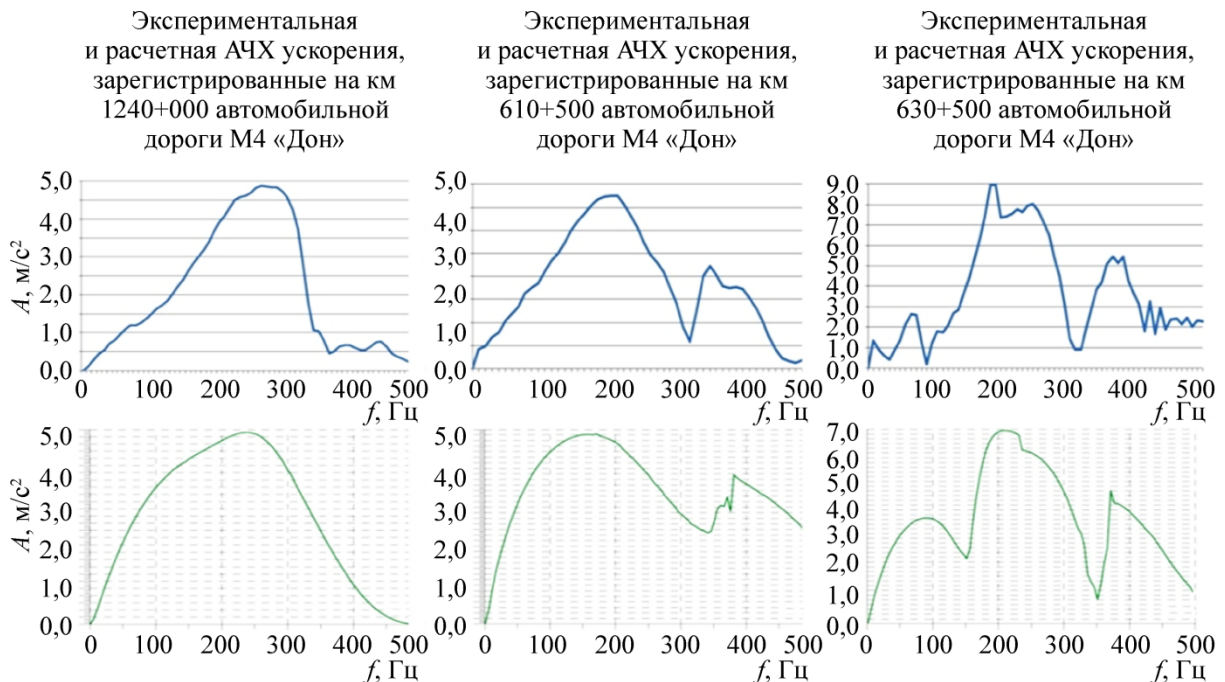


Рис. 9. Сопоставление экспериментальных и расчетных АЧХ ускорения на поверхности дорожной одежды (по оси ординат – ускорения, m/s^2 ; по оси абсцисс – частота, Гц)

Таким образом, на основе зарегистрированной в полевых условиях АЧХ ускорения поверхности нежесткой дорожной одежды возможно выявить потерю межслойного сцепления между отдельными элементами нежестких дорожных конструкций и установить

применимость механико-математических моделей НДС нежестких дорожных конструкций, применяемых при определении модулей упругости их слоев.

На II этапе реализации алгоритма (см. рис. 4) производится численное моделирование характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд. В качестве входных данных при моделировании используются:

данные о дорожной одежде:

- начальные модули упругости слоев нежесткой дорожной одежды [20];
- толщины слоев нежесткой дорожной одежды;
- плотности слоев дорожной одежды;

данные о прикладываемой нагрузке:

- масса груза;
- высота падения груза;
- диаметр штампа;

точки наблюдения на поверхности покрытия: координаты точек установки датчиков – регистраторов прогиба.

После задания входных данных строится спектр ударной нагрузки (рис. 10, а). Далее вычисляется расчетная АЧХ ускорений или перемещений (рис. 10, б) на поверхности покрытия нежесткой дорожной одежды, после чего путем разложения АЧХ перемещений

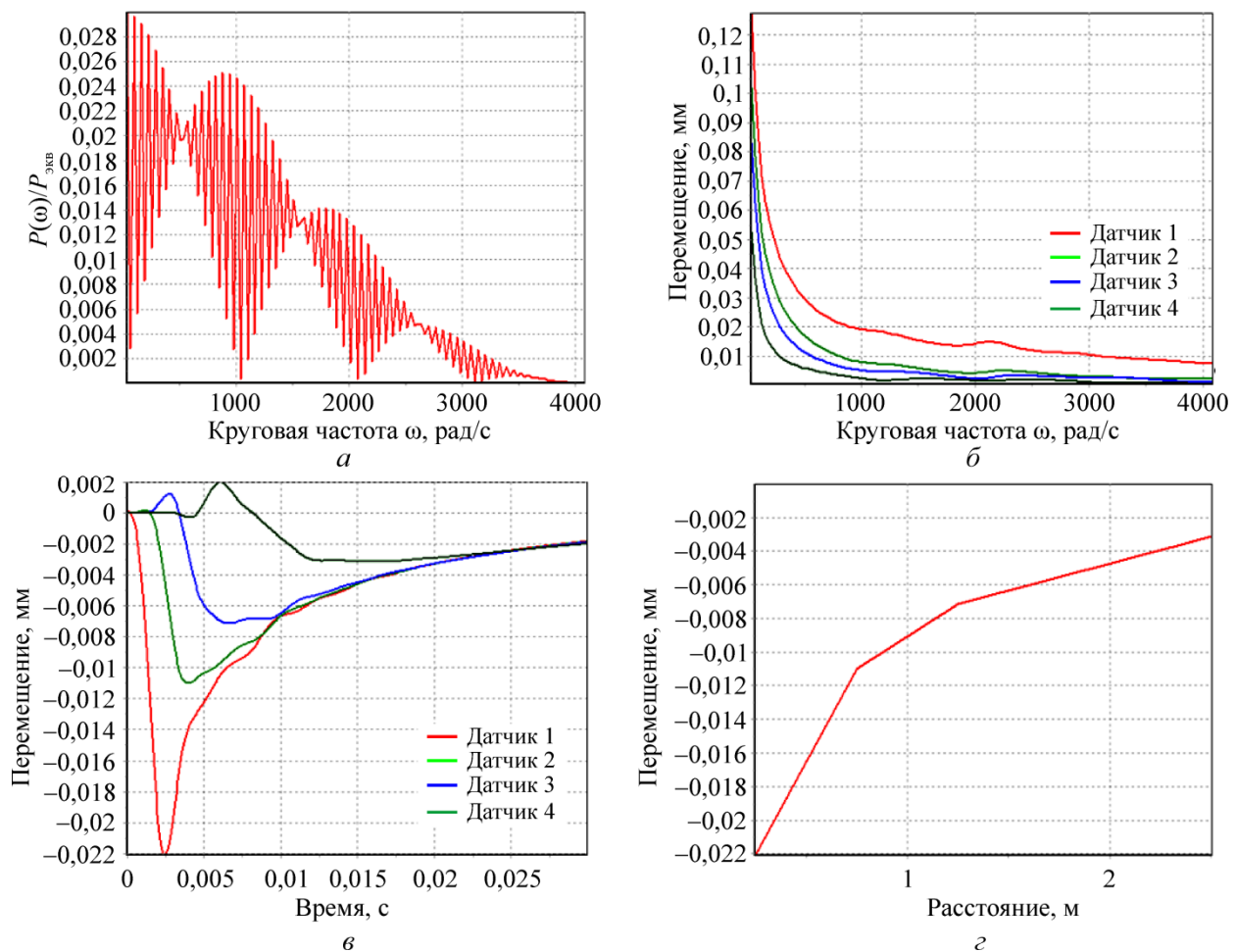


Рис. 10. Расчет характеристик динамического деформирования в программном комплексе Vibrolab (на графике (а) под $P_{\text{экв}}$ понимается константа, зависящая от массы груза и типа ударной установки)

в ряд Фурье строится расчетная АВХ перемещений (рис. 10, в) и определяются максимальные значения вертикальных перемещений во времени по каждой из точек наблюдения с построением расчетной чаши максимальных динамических прогибов (рис. 10, з).

После построения расчетной чаши динамических прогибов производится ее сопоставление с экспериментальной чашей максимальных динамических прогибов, а в случае серьезных отличий между ними (при погрешности между экспериментальными и расчетными значениями вертикальных перемещений более 5 %) – корректировка расчетной чаши максимальных динамических прогибов с одновременным пересчетом значений модулей упругости слоев до достижения требуемой погрешности.

Однако следует учитывать, что проведение корректировки целесообразно в случае, если между слоями дорожной одежды не нарушено сцепление, что устанавливается в ходе экспериментальных исследований путем анализа АЧХ ускорения. В программном комплексе Vibrolab реализована процедура последовательной корректировки модулей упругости слоев дорожных одежд. Она заключается в том, что корректировка начинается с подбора значений модулей упругости грунта земляного полотна до достижения допустимой погрешности в удаленной от точки ударного воздействия зоне 1,25–2,5 м, после чего производится подбор значений расчетных перемещений относительно экспериментальных в зоне 0,25–1,25 м путем варьирования модуля упругости основания дорожной одежды, а заключительным этапом является окончательная корректировка модуля упругости асфальтобетона в ближней к точке ударного воздействия зоне 0–0,25 м.

Следует отметить, что любая подобная методика корректировки сопряжена со следующим недостатком: итоговые расчетные значения модулей упругости слоев дорожной одежды могут являться не единственным решением задачи корректировки, что приведет к попаданию не в глобальный, а в локальный экстремум функции ошибки. Решение этой проблемы возможно как совершенствованием самой методики корректировки, так и применением наряду с чашей прогибов дополнительных параметров, характеризующих прочность дорожной одежды с проверкой точности корректировки по ним. В качестве такого параметра предлагается использовать АЧХ ускорения на поверхности дорожной одежды. Для обоснования данного предложения было произведено моделирование влияния эффективного модуля упругости (в дорожной терминологии используется эквивалентный термин «общий модуль упругости») (E_0 , МПа) дорожной конструкции на форму АЧХ ускорения дорожной одежды, регистрируемой на поверхности покрытия на расстоянии 0,75 м от точки ударного воздействия. Данное расстояние было выбрано так, как оно в среднем соответствует толщине конструкций дорожной одежды. На рис. 11 приведены результаты проведенного численного моделирования. Из представленных результатов следует, что с увеличением общего модуля упругости дорожной одежды увеличивается значение частотного экстремума на АЧХ ускорения поверхности дорожной конструкции. Так, для дорожной одежды с эффективным модулем упругости (E_0) 300 МПа значение частотного экстремума на АЧХ ускорения составило 160 Гц, при 400 МПа – 190 Гц, при 500 МПа – 215 Гц, а при 600 МПа – 235 Гц. Исходя из полученных результатов был сделан вывод о том, что АЧХ ускорения поверхности дорожной одежды, отражая ее прочность, может использоваться и в качестве дополнительного критерия при оценке модулей упругости слоев дорожной одежды. Таким образом, наряду с требованием сходимости между расчетной и экспериментальной чашей максимальных динамических прогибов на поверхности дорожных одежд следует требовать сходимости между расчетным

и экспериментальным значением частотного экстремума на АЧХ ускорения поверхности дорожной одежды, зарегистрированной на расстоянии 0,75 м от точки ударного воздействия (в случае применения мобильного виброизмерительного комплекса ВИК-1).

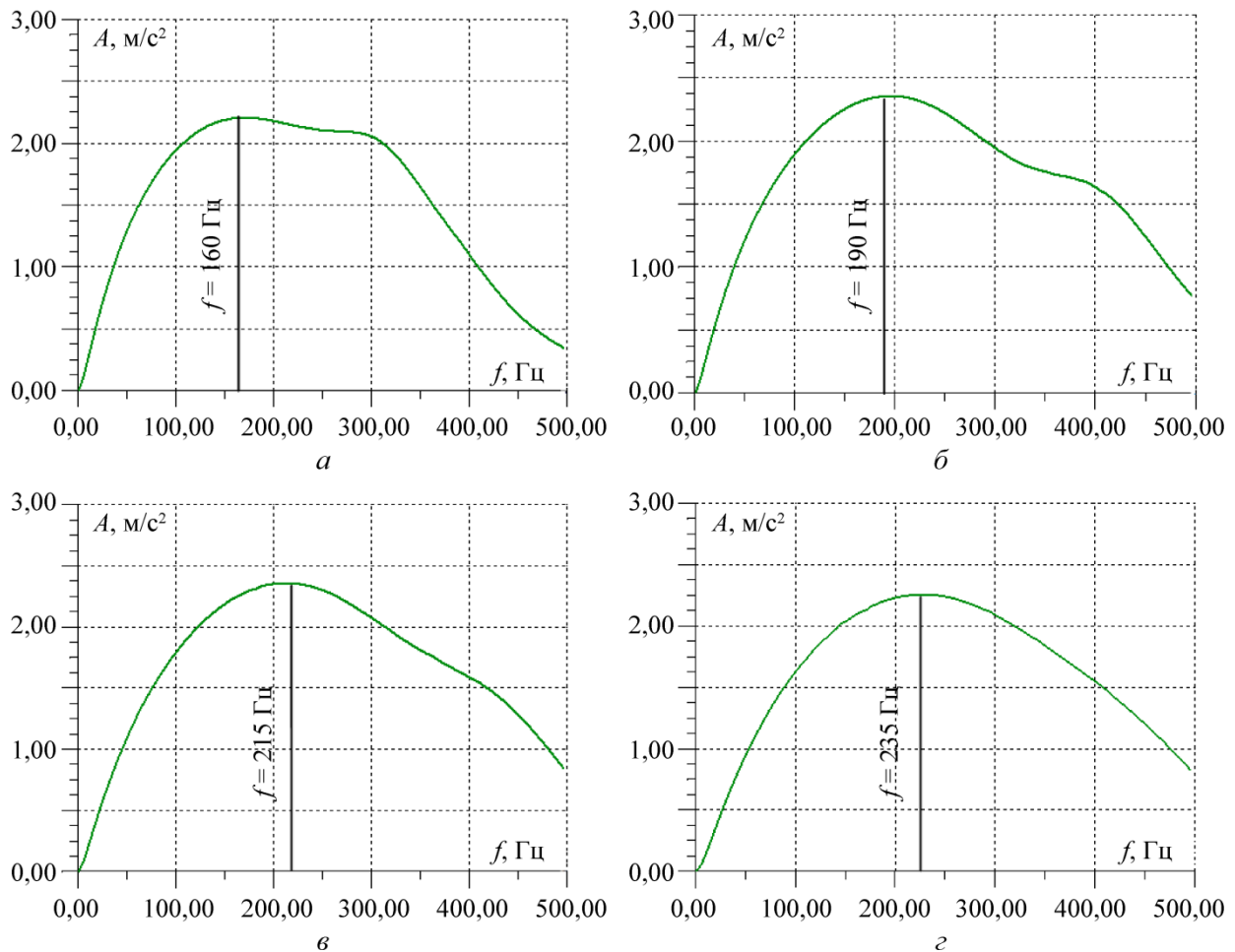


Рис. 11. Влияние эффективного модуля упругости дорожной одежды на расчетную амплитудно-частотную характеристику ускорения на ее поверхности на расстоянии 0,75 м:
 (а) $E_0 = 300$ МПа; (б) $E_0 = 400$ МПа; (в) $E_0 = 500$ МПа; (г) $E_0 = 600$ МПа

2. Результаты

Апробация комплексного подхода к исследованию характеристик динамического деформирования нежестких дорожных одежд осуществлялась на двух эксплуатируемых участках автомобильной дороги М4 «ДОН». Первый участок – км 877–878, на котором устроена дорожная одежда в соответствии с нормативными документами Германии. Второй – участок дорожной одежды, находящийся в длительной эксплуатации км 1463+700. Конструкции дорожных одежд на обследованных участках приведены в табл. 1 и 2.

С использованием мобильного виброизмерительного комплекса ВИК-1 на обследованных участках была проведена экспериментальная регистрация характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд и определены модули упругости слоев дорожных одежд. На рис. 12 приведены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных чаш максимальных динамических прогибов нежестких дорожных одежд, а на рис. 13 сопоставлены расчетная и экспериментальная АЧХ ускоре-

ния, регистрируемые на поверхности дорожной одежды, и их частотные экстремумы на участке автомобильной дороги М4 «ДОН» км 877–878. Результаты расчета модулей упругости отдельных слоев дорожной одежды на км 877–878 приведены в табл. 3.

Таблица 1

Конструкции дорожных одежд и нормативные модули упругости их слоев на участках автомобильной дороги М4 «ДОН» км 877–878

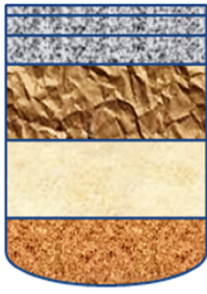
Конструкция дорожной одежды	Наименование слоя и модуль упругости, МПа	Эффективный модуль упругости, МПа
Км 877–878 	Щебеночно-мастичный асфальтобетон на битуме марки БНДУ 60	$E_1 = 3200$ МПа
	Горячий высокоплотный дисперсно-армированный асфальтобетон	
	Горячий высокоплотный дисперсно-армированный асфальтобетон	$E_2 = 240$ МПа
	Щебеночная смесь при максимальном размере зерен 40 мм С5	
	Песок	
Суглинок тяжелый пылеватый	$E_4 = 42$ МПа	

Таблица 2

Конструкции дорожных одежд и нормативные модули упругости их слоев на участках автомобильной дороги М4 «ДОН» км 1463+700


Конструкция дорожной одежды	Наименование слоя и модуль упругости E , МПа
Км 1463+700 	Асфальтобетон, $E_1 = 2500$ МПа
	Щебеночно-гравийно-песчаная смесь, $E_2 = 240$ МПа
	Грунт земляного потна, $E_3 = 42$ МПа

Таблица 3

Результаты расчета модулей упругости слоев нежесткой дорожной одежды на стадии эксплуатации на км 877–878

№ п/п	Слой	Модуль упругости, МПа
1	Асфальтобетон (E_1)	3870
2	Щебеночная смесь непрерывной гранулометрии при максимальном размере зерен 40 мм (E_2)	270
3	Песок (E_3)	100
4	Суглинок тяжелый пылеватый (E_4)	55

Как видно из рис. 12, в процессе вычисления модулей упругости отдельных слоев нежесткой дорожной одежды на км 877–878 были обеспечены хорошая близость между экспериментальной и расчетной чашей максимальных динамических прогибов, а также практически полное соответствие между расчетным и экспериментальным значением

частотных экстремумов на АЧХ ускорения поверхности нежесткой дорожной одежды (и расчетный, и экспериментальный частотный экстремум $f_{\max} = 250$ Гц), что подтверждает корректность вычисления модулей упругости слоев дорожных одежд на стадии эксплуатации.

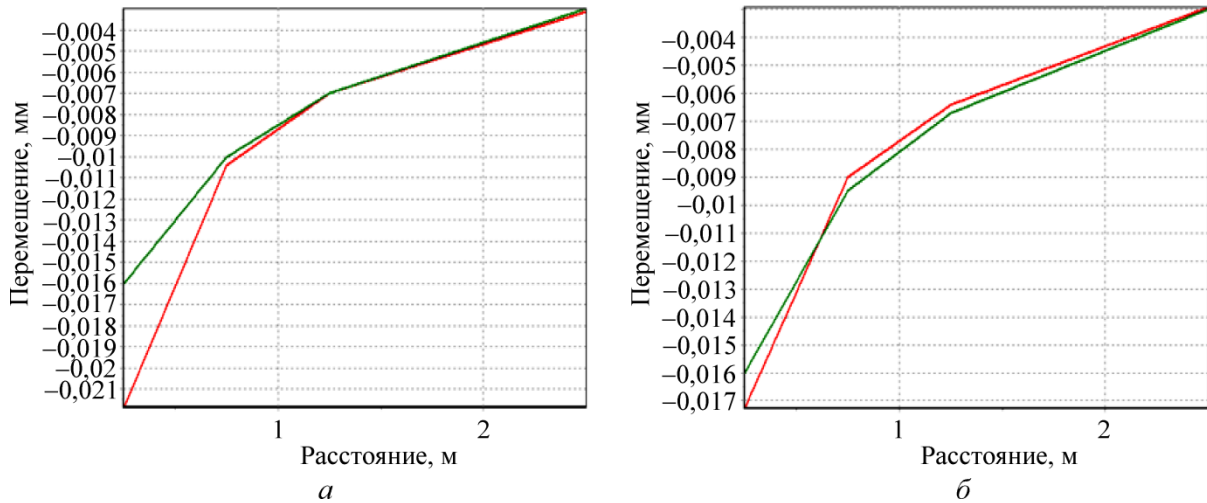


Рис. 12. Расчетная и экспериментальная чаши максимальных динамических прогибов на участке М-4 км 877–878 до и после корректировки (зеленая линия – экспериментальная чаша прогибов, красная – расчетная чаша прогибов)

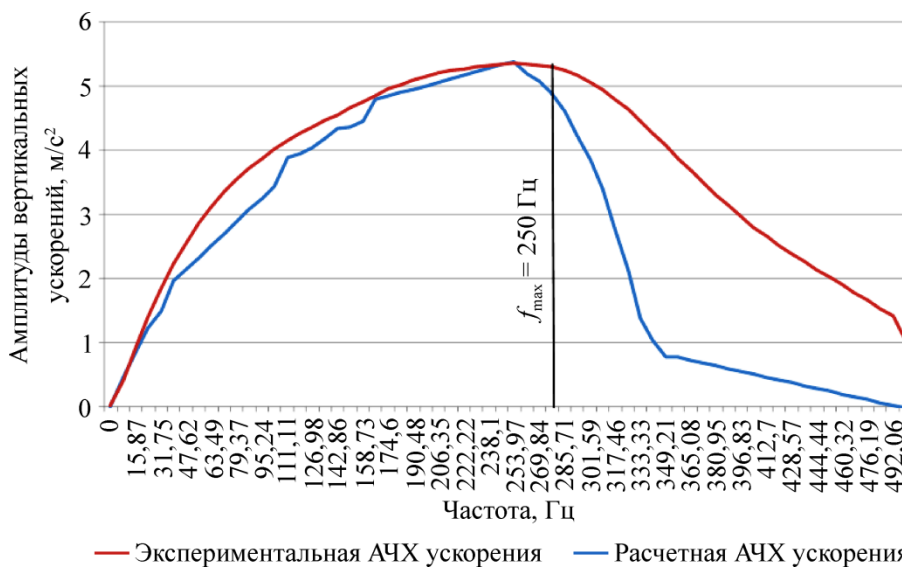


Рис. 13. Сопоставление расчетных и экспериментальных АЧХ ускорения, зарегистрированных на поверхности дорожной одежды на участке км 877–878

Аналогичный подход был применен при расчете модулей упругости слоев нежестких дорожных одежд на участке автомобильной дороги М4 «ДОН» км 1463+700. Рассчитанные значения модулей упругости слоев дорожной одежды на стадии эксплуатации на данном участке приведены в табл. 4. Значения расчетного частотного экстремума на АЧХ ускорения поверхности дорожной одежды для данного участка $f_{p.\max} = 140$ Гц, а экспериментального – $f_{э.\max} = 142$ Гц, что подтверждает полученные результаты расчета эксплуатационных значений модулей упругости слоев дорожной одежды.

Таблица 4

Результаты расчета модулей упругости слоев нежесткой дорожной одежды на стадии эксплуатации на км 1463+700

№ п/п	Слой	Модуль упругости, МПа
1	Асфальтобетон (E_1)	1470
2	Щебеночно-гравийно-песчаная смесь (E_2)	70
3	Грунт (E_3)	47

3. Обсуждение

Анализ табл. 3 показывает удовлетворительную несущую способность дорожной одежды и соответствие значений модулей упругости отдельных слоев дорожной одежды требованиям, предъявляемым нормативными документами РФ (ODN, 2001) [20]. При этом обеспечено соответствие между значениями частотных экстремумов на расчетной и экспериментальной АЧХ ускорения поверхности нежесткой дорожной конструкции (в обоих случаях $f_{\max} = 250$ Гц). Следует отметить, что подобное высокое значение частотного экстремума также свидетельствует о высокой несущей способности обследованной дорожной конструкции.

На участке автомобильной дороги на км 1463+700 ослаблены все элементы нежесткой дорожной конструкции: покрытие, основание и грунт земляного полотна. На данном участке также получено хорошее соответствие между значениями экспериментального и расчетного частотного экстремума ($f_{p,\max} = 140$ Гц, а экспериментального $f_{э,\max} = 142$ Гц). Подобные значения частотного экстремума также позволяют сделать вывод о низкой несущей способности дорожной конструкции на данном участке. Полученные выводы подтверждаются результатами лабораторных испытаний материалов слоев дорожных одежд на данных участках.

Заключение

1. В ходе проведенных исследований предложен комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд, включающий в себя как анализ расчетных и экспериментальных частотных экстремумов, так и анализ характеристик отклика нежесткой дорожной конструкции в частотной области.

2. Путем математического моделирования установлено влияние между сцеплением на границах слоев дорожной одежды и формой амплитудно-частотной характеристики ускорения на поверхности нежесткой дорожной одежды:

– при полном межслойном сцеплении на АЧХ ускорения поверхности нежесткой дорожной одежды присутствует один четко выделенный частотный экстремум;

– при потере межслойного сцепления между пакетом слоев асфальтобетона и основанием дорожной конструкции на АЧХ ускорения поверхности нежесткой дорожной одежды, зарегистрированной на расстоянии 0,75–1,25 м от точки приложения нагрузки, присутствуют два частотных экстремума, в диапазонах 0–220 Гц, и 220–500 Гц;

– при потере межслойного сцепления между всеми элементами нежесткой дорожной конструкции на АЧХ ускорения, регистрируемых на расстоянии 0,25–2,5 м, выделяется ряд частотных экстремумов, локализуемых в частотных областях 0–200; 200–400, 400–500 Гц.

3. Установлено влияние общего модуля упругости дорожной одежды на частотный экстремум на АЧХ ускорения поверхности дорожной конструкции. При увеличении общего модуля упругости дорожной конструкции от 300 до 600 МПа значения частотного экстремума изменяются в пределах 160–235 Гц. Таким образом, учитывая, что АЧХ ускорения поверхности нежесткой дорожной конструкции характеризует ее несущую способность, можно сделать вывод, что данная характеристика может использоваться в качестве дополнительного критерия корректности значений модулей упругости, полученных путем корректировки расчетных и экспериментальных част максимальных динамических прогибов поверхности нежестких дорожных одежд.

4. Основные перспективы использования данного метода, на наш взгляд, неразрывно связаны с совершенствованием методов и средств анализа поведения дорожной конструкции в частотной области. Так, актуальной выглядит задача установления тенденций изменений формы АЧХ ускорения, зарегистрированной на различных расстояниях от точки приложения нагрузки, от значений модулей упругости отдельных слоев дорожной одежды. Также следует отметить, что в рамках данной работы при исследовании влияния условий межслойного сцепления на АЧХ ускорения применялся несколько упрощенный подход, так как условия контакта на границах слоев принимались «гладкими». Несомненно, что в реальных условиях эксплуатации условия сцепления между слоями будут принимать некоторые «промежуточные» значения. Исходя из этого перспективным направлением совершенствования предлагаемого подхода может быть обеспечение возможности определения промежуточных условий сцепления между слоями дорожной конструкции на стадии эксплуатации. Однако в заключение нужно сказать, что, на наш взгляд, именно частотные характеристики, регистрируемые в дорожной конструкции при динамическом нагружении, являются наиболее информативными и могут быть использованы при оценке состояния дорожных одежд на стадии эксплуатации, а также при проработке и калибровке современных механико-математических моделей дорожных конструкций.

Библиографический список

1. Яковлев, Ю.М. Оценка и обеспечение прочности дорожных одежд нежесткого типа в процессе эксплуатации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1989. – 43 с.
2. Динамические методы испытания дорожных одежд / В.К. Апестин, С.В. Коновалов, С.С. Коновалов, Ю.М. Яковлев, В.П. Козлов, А.М. Стрижевский // Автомобильные дороги. – 1981. – № 7.
3. Коганзон М.С., Яковлев Ю.М. Теория и методы расчета нежестких дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. – М.: Дороги, 2000. – № 4. – С. 22–23
4. Лейвак В.А. Исследование параметров, характеризующих прочность нежестких дорожных одежд при их испытаниях динамической нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1975.
5. Leiva-Villacorta F. Advanced computing techniques in structural evaluation of flexible pavements using the falling weight deflectometer. – Alabama, 2012. – 178 p.
6. Qinwu X. Development of a Computational Method for Inverting Dynamic Moduli of Multilayer Systems with Applications to Flexible Pavements under FWD Tests. – Texas, 2014. – 223 p.
7. Guzina B. An effective tool for enhancing the static backcalculation of pavement moduli. – Wasington: University of Minnesota, 2002. – 25 p.
8. Alcasawneh W. Backcalculation of pavement moduli using genetic algorithm: Doctor's degree thesis. – University of Acron, 2007.

9. Nazaryan S., Gucunski R.D. Use of Rayleigh modes in interpretation of SASW test // Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. – St. Louis: s.n., 1991. – P. 1399–1408.
10. Лобов Д.В. Оценка состояния конструктивных слоев дорожных одежд нежесткого типа методом спектрального анализа волновых полей: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004.
11. Углова Е.В., Илиополов С.К., Селезнев М.Г. Усталостная долговечность эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий / Рост. гос. строит. ун-т. – Ростов-н/Д, 2009. – 244 с.
12. Илиополов С.К., Селезнев М.Г., Углова Е.В. Динамика дорожных конструкций / Рост. гос. строит. ун-т. – Ростов-н/Д, 2002. – 258 с.
13. Nazaryan S., Gucunski R.D. Numerical simulation of the SASW test // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 1992. – P. 213–270.
14. Nazaryan S., Yuan D. Use of seismic pavement analyzer to monitor degradation of flexible pavement under Texas mobile Load Simulation // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2007. – January 30. – P. 3–10.
15. Nazaryan S. NDT of pavements: Seismic Methods USA. – Texas: 2010.
16. Elton D., Parker F. Methods for evaluating resilient moduli of paving materials. – Alabama: Auburn University Highway Research Center, 1990.
17. Horak E. Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters // Journal of the South African Society for Road and Transport Engineers. – 2008. – Vol. 50. – No 2. – 652 p.
18. Irwin L.H. Backcalculation: An Overview and Perspective. – New York: Cornell University. – 22 с.
19. Илиополов С.К., Ляпин А.А. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды при динамическом нагружении // Изв. высш. учеб. зав. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 1997. – № 4. – С. 63–66.
20. ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд (взамен ВСН 46-83) / СОЮЗДОРНИИ. – М., 2001 – 93 с.

References

1. Jakovlev Ju.M. Ocenka i obespechenie prochnosti dorozhnykh odezhd nezhestkogo tipa v processe ekspluatatsii. [Evaluating and ensuring the strength of non-rigid pavements such as during operation]. Doctors degree thesis. Moscow, 1989. 43 p.
2. Apestin V.K., Konovalov C.B., Konovalov S.S., Jakovlev Ju.M., Kozlov V.P., Strizhevskij A.M. Dinamicheskie metody ispytaniia dorozhnykh odezhd [Dynamic test methods of road pavement]. *Avtomobil'nye dorogi*, 1981, no. 7.
3. Koganzon M.S., Jakovlev Ju.M. Teoriia i metody rascheta nezhestkih dorozhnykh odezhd [Theory and methods of calculating the non-rigid pavements]. *Nauka i tehnika v dorozhnoi otrasli*, 2000, no. 4. pp. 22-23.
4. Lejvak, V.A. Issledovanie parametrov, kharakterizuiushchikh prochnost' nezhestkikh dorozhnykh odezhd pri ikh ispytaniakh dinamicheskoi nagruzkoj [Study parameters characterizing the strength of the non-rigid pavements with their dynamic load tests]. Doctor's degree thesis. Moscow, 1975.
5. Leiva-Villacorta F. Advanced computing techniques in structural evaluation of flexible pavements using the falling weight deflectometer. Alabama, 2012. 178 p.
6. Qinwu X. Development of a Computational Method for Inverting Dynamic Moduli of Multilayer Systems with Applications to Flexible Pavements under FWD Tests. Texas, 2014. 223 p.
7. Guzina B. An effective tool for enhancing the static backcalculation of pavement moduli. Wasington: University of Minnesota, 2002. 25 p.

8. Alcasawneh W. Backcalculation of pavement moduli using genetic algorithm. Doctor's degree thesis University of Acron, 2007.
9. Nazaryan S., Gucunski R.D. Use of Rayleigh modes in interpretation of SASW test. *Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. St. Louis: s.n., 1991, pp. 1399-1408.
10. Lobov D.V. Ocenka sostoianiiia konstruktivnykh sloiov dorozhnykh odezhd nezhiostkogo tipa metodom spektral'nogo analiza volnovykh polei [Assessment of the structural layers of nonrigid road clothes such as spectral analysis of wave fields]. Doctor's degree thesis. Moscow, 2004.
11. Uglova E.V., Iliopolov S.K., Seleznev M.G. Ustalostnaia dolgovechnost' ekspluatiruemykh asfal'tobetonnykh pokrytii [The fatigue life of asphalt concrete coatings exploited]. *Rostovskii gosudarstvennyi stroitelnyi universitet*, 2009. 244 p.
12. Iliopolov S.K., Seleznev M.G., Uglova E.V. Dinamika dorozhnykh konstrukcij [Dynamics of road constructions]. *Rostovskii gosudarstvennyi stroitelnyi universitet*, 2002. 258 p.
13. Nazaryan S., Gucunski R.D. Numerical simulation of the SASW test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 1992, pp. 213-270.
14. Nazaryan S. Yuan D. Use of seismic pavement analyzer to monitor degradation of flexible pavement under Texas mobile Load Simulation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007, January 30, pp. 3-10.
15. Nazaryan S. NDT of pavements: Seismic Methods USA. Texas, 2010.
16. Elton D., Parker F. Methods for evaluating resilient moduli of paving materials. Alabama: Auburn University Highway Research Center, 1990.
17. Horak E Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. *Journal of the South African*. 2008, vol. 50, no. 2. pp. 652.
18. Irwin L.H. Backcalculation: An Overview and Perspective. New York: Cornell University. 2012, 22 p.
19. Iliopolov S.K., Ljapin A.A. Osobennosti rascheta naprjazhenno-deformirovannogo sostoianiiia konstruksii dorozhnoi odezhdy pri dinamicheskom nagruzhenii [Features of the calculation of the stress-strain state of the pavement structure under dynamic loading]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki*, 1997, no. 4, pp. 63-66.
20. ODN 218.046-01 Proektirovanie nezhestkiy dorozhnykh odezhd (vzamen VSN 46-83) [Design of non-rigid pavements]. Moscow, 2001, 93 p.