

Численные методы расчета конструкций

МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ В ИССЛЕДОВАНИИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ПРИВОЗДЕЙСТВИИ РЕАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ НАГРУЗКИ

Г.Л. КОЛМОГОРОВ, доктор технических наук, профессор,

В.И. КЫЧКИН, кандидат технических наук, доцент,

И.А. ЕСИПЕНКО, аспирант.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»;

614990, г. Пермь – ГСП, Комсомольский проспект, д. 29, eia@rtural.ru.

Предложена модель применения метода конечных разностей к расчету динамических характеристик дорожной конструкции. Представлены разрешающие рекуррентные соотношения, позволяющие установить амплитудно-временные и амплитудно-частотные характеристики с учетом вязкоупругих свойств материалов. Получены результаты вычислительного эксперимента при варьируемых значениях физико-механических характеристик.

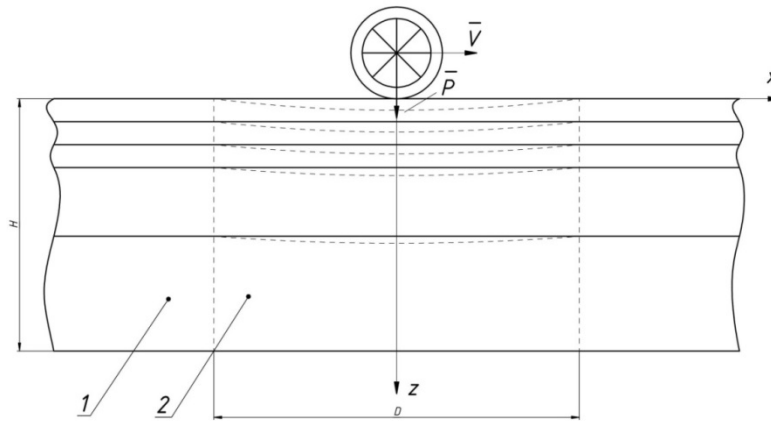
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожная конструкция, метод конечных разностей, рекуррентные соотношения, чаша прогиба, активная масса, собственная частота колебаний.

Введение

В настоящее время в области моделирования динамического поведения дорожных одежд достигнут значительный прогресс. Теоретические и экспериментальные исследования, связанные с вибрационными процессами дорожных конструкций, представлены в трудах научных школ А.В. Смирнова, С.К. Илиополова, М.В. Немчинова, В.П. Матуа, Е.В. Угловой, В.А. Осинской, где показано, что динамика оказывает существенное влияние на транспортно-эксплуатационное состояние дороги. Однако, исследования отечественных и зарубежных специалистов и использование различных тестовых методов, приводят к широкому диапазону результатов, характеризующих динамику дорожных конструкций [1-9]. По-видимому, данная ситуация складывается по нескольким причинам: регламентирующие документы на проектирование автомобильных дорог [10] не нормируют динамический характер работ функциональных слоев дорожной конструкции; свойства применяемых местных строительных материалов для строительства дорог могут существенно отличаться; климатические условия эксплуатации дорог разнообразны; скорость движения и силовые воздействия носят нестационарный характер ввиду многообразия типов и моделей автотранспортных средств; на этапе производства дорог высокая вероятность снижения эффективности системы управления качественным выполнением строительных задач. Настоящая статья посвящена разработке экономичного конечно-разностного метода расчета параметров динамических процессов дорожной одежды в условиях реальной транспортной нагрузки с целью создания и развития предпосылок интеллектуализации системы обеспечения технологичности транспортной отрасли [11].

Моделирование поведения дорожных одежд

В результате действия нагрузки от движущегося транспортного средства образуется «чаша прогиба» (рис.1). После проезда транспортного средства активная масса дорожной одежды под «чашей прогиба» совершает колебательное движение. Диаметр «чаши прогиба» зависит от скорости транспортного средства и от величины осевой нагрузки [12].



1 – дорожная одежда, 2 – активная масса, H – толщина дорожной одежды, D – диаметр «чаши прогиба», \bar{V} – скорость, \bar{P} – нагрузка

Рис.1. Модель взаимодействия движущейся нагрузки и дорожной одежды.

Рассматривается плоская модель дорожной конструкции. Динамическое равновесие вязкоупругого деформируемого твердого тела (в рамках гипотезы о малых деформациях) описывается системой уравнений [13]:

– равновесия:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \end{cases} \quad (1)$$

– геометрических:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \\ \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right); \end{cases} \quad (2)$$

– физических:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = (\lambda + 2G)\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{zz} + (\xi + 2\eta) \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial t} + \xi \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial t}; \\ \sigma_{zz} = (\lambda + 2G)\varepsilon_{zz} + \lambda\varepsilon_{xx} + (\xi + 2\eta) \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial t} + \xi \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial t}; \\ \sigma_{xz} = 2G\varepsilon_{xz} + 2\eta \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial t}; \end{cases} \quad (3)$$

– с кинематическими граничными условиями:

$$\begin{cases} u = U; \\ w = W. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь обозначено: σ_{ij} и ε_{ij} – тензоры напряжений и малых деформаций, u и w – перемещения вдоль координатных осей, ρ – плотность материала, λ и G – коэффициенты Ламе, ξ и η – коэффициенты вязкости.

Для описания связи между напряжениями и деформациями с учетом демпфирования использована вязкоупругая модель Кельвина–Фойгта.

Отношение коэффициентов вязкости принимаем в соответствии с (5).

$$\frac{\xi}{\eta} = \frac{\lambda}{G}. \quad (5)$$

Вводим обозначение для отношения коэффициентов упругости к коэффициентам вязкости, этот коэффициент запишем в виде [14]:

$$\frac{\xi}{\lambda} = \frac{\eta}{G} = \frac{\xi + 2\eta}{\lambda + 2G} = \theta. \quad (6)$$

С учетом (6) запишем (3) в виде:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = (\lambda + 2G) \left(\varepsilon_{xx} + \theta \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial t} \right) + \lambda \left(\varepsilon_{zz} + \theta \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial t} \right); \\ \sigma_{zz} = (\lambda + 2G) \left(\varepsilon_{zz} + \theta \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial t} \right) + \lambda \left(\varepsilon_{xx} + \theta \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial t} \right); \\ \sigma_{xz} = 2G \left(\varepsilon_{xz} + \theta \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial t} \right). \end{cases} \quad (7)$$

Подставим геометрические соотношения (3) в физические (7)

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = (\lambda + 2G) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \theta \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right) + \lambda \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \theta \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t} \right); \\ \sigma_{zz} = (\lambda + 2G) \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \theta \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t} \right) + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \theta \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right); \\ \sigma_{xz} = G \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} + \theta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} \right) \right). \end{cases} \quad (8)$$

Подставляем соотношения (8) в (1), получим

$$\begin{cases} (\lambda + 2G) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \theta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \right) + (\lambda + G) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} + \theta \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial z \partial t} \right) + \\ + G \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \theta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \right) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ (\lambda + 2G) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \theta \frac{\partial^3 w}{\partial z^2 \partial t} \right) + (\lambda + G) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \theta \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial z \partial t} \right) + \\ + G \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \theta \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial t} \right) = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \end{cases} \quad (9)$$

Полученные соотношения являются уравнениями Ламе с учетом вязкоупругих свойств материала среды.

Определяющие соотношения

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений при задании граничных и начальных условий затруднительно, поэтому воспользуемся численным методом конечных разностей.

Представим реализацию разностной схемы, приближенно описывающую данную систему дифференциальных уравнений, в три этапа [15]. На первом этапе заменяем область непрерывного изменения аргумента областью дискретного его изменения. На втором этапе заменяем дифференциальные операторы разностными. На третьем этапе сформулируем разностный аналог для граничных условий и для начальных данных.

В уравнениях (9) присутствуют два независимых аргумента по координате и аргумент по времени. Координатную плоскость XOZ представим сеткой с шагом h . Шаг по времени принимаем τ (рис. 2).

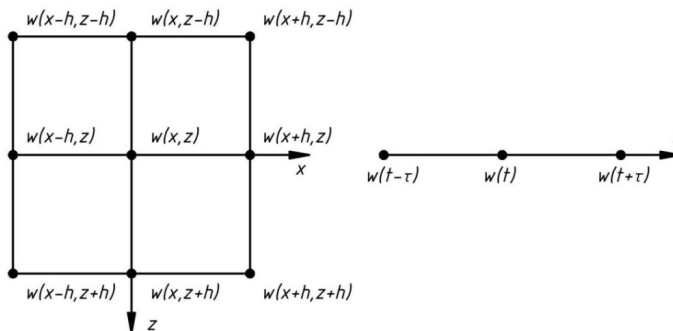


Рис.2. Дискретизация координатной и временной областей.

Заменим дифференциальные операторы разностными:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{u(t+\tau) - 2u + u(t-\tau)}{\tau^2}, \\
 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{w(t+\tau) - 2w + w(t-\tau)}{\tau^2}, \\
 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{u(x+h) - 2u + u(x-h)}{h^2}, \\
 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} &= \frac{w(z+h) - 2w + w(z-h)}{h^2}, \\
 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} &= \frac{u(x+h) - 2u + u(x-h)}{h^2} - \frac{u(x+h, t-\tau) - 2u(t-\tau) + u(x-h, t-\tau)}{h^2}, \\
 \frac{\partial^3 w}{\partial z^2 \partial t} &= \frac{w(z+h) - 2w + w(z-h)}{h^2} - \frac{w(x+h, t-\tau) - 2w(t-\tau) + w(x-h, t-\tau)}{h^2}, \\
 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} &= \frac{u(x+h; z+h) + u(x-h; z-h) - u(x+h; z-h) - u(x-h; z+h)}{4h^2}, \\
 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} &= \frac{w(x+h; z+h) + w(x-h; z-h) - w(x+h; z-h) - w(x-h; z+h)}{4h^2}, \\
 \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial z \partial t} &= \frac{u(x+h; z+h) + u(x-h; z-h) - u(x+h; z-h) - u(x-h; z+h)}{4h^2} - \\
 &\quad - \frac{u(x+h; z+h, t-\tau) + u(x-h; z-h, t-\tau) - u(x+h; z-h, t-\tau) - u(x-h; z+h, t-\tau)}{4h^2 \tau}, \\
 \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial z \partial t} &= \\
 &\quad - \frac{w(x+h; z+h) + w(x-h; z-h) - w(x+h; z-h) - w(x-h; z+h)}{4h^2} - \\
 &\quad - \frac{w(x+h; z+h, t-\tau) + w(x-h; z-h, t-\tau) - w(x+h; z-h, t-\tau) - w(x-h; z+h, t-\tau)}{4h^2 \tau}, \\
 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} &= \frac{u(z+h) - 2u + u(z-h)}{h^2}, \\
 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= \frac{w(x+h) - 2w + w(x-h)}{h^2}, \\
 \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} &= \frac{u(z+h) - 2u + u(z-h)}{h^2} - \frac{u(z+h, t-\tau) - 2u(t-\tau) + u(z-h, t-\tau)}{h^2}, \\
 \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial t} &= \frac{w(x+h) - 2w + w(x-h)}{h^2} - \frac{w(x+h, t-\tau) - 2w(t-\tau) + w(x-h, t-\tau)}{h^2}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

После подстановки (10) в (9) получаем рекуррентные соотношения:

$$\begin{aligned}
 u(t + \tau) &= \\
 & 2 \left[1 - \frac{\tau^2(\lambda+3G)(1+A_\eta)}{\rho h^2} \right] \frac{u}{1} + \frac{\tau^2(\lambda+2G)(1+A_\eta)[u(x+h)+u(x-h)]}{\rho h^2} + \\
 & + \frac{\tau^2(\lambda+G)(1+A_\eta)[w(x+h, z+h) + w(x-h, z-h) - w(x+h, z-h) - w(x-h, z+h)]}{4\rho h^2} + \\
 & + \frac{\tau^2 G(1+A_\eta)[u(z+h) + u(z-h)]}{\rho h^2} - \left[1 - 2 \frac{A_\eta \tau^2(\lambda+3G)}{\rho h^2} \right] \frac{u(t-\tau)}{1} - \\
 & - \frac{A_\eta \tau^2(\lambda+2G)[u(x+h, t-\tau) + u(x-h, t-\tau)]}{\rho h^2} - \\
 & - \frac{A_\eta \tau^2(\lambda+G)[w(x+h, z+h, t-\tau) + w(x-h, z-h, t-\tau) - w(x+h, z-h, t-\tau) - w(x-h, z+h, t-\tau)]}{4\rho h^2} - \\
 & - \frac{A_\eta \tau^2 G[u(z+h, t-\tau) + u(z-h, t-\tau)]}{\rho h^2}, \\
 w(t + \tau) &= \\
 & 2 \left[1 - \frac{\tau^2(\lambda+3G)(1+A_\eta)}{\rho h^2} \right] \frac{w}{1} + \frac{\tau^2(\lambda+2G)(1+A_\eta)[w(z+h)+w(z-h)]}{\rho h^2} + \\
 & + \frac{\tau^2(\lambda+G)(1+A_\eta)[u(x+h, z+h) + u(x-h, z-h) - u(x+h, z-h) - u(x-h, z+h)]}{4\rho h^2} + \\
 & + \frac{\tau^2 G(1+A_\eta)[w(x+h) + w(x-h)]}{\rho h^2} - \left[1 - 2 \frac{A_\eta \tau^2(\lambda+3G)}{\rho h^2} \right] \frac{w(t-\tau)}{1} - \\
 & - \frac{A_\eta \tau^2(\lambda+2G)[w(z+h, t-\tau) + w(z-h, t-\tau)]}{\rho h^2} - \\
 & - \frac{A_\eta \tau^2(\lambda+G)[u(x+h, z+h, t-\tau) + u(x-h, z-h, t-\tau) - u(x+h, z-h, t-\tau) - u(x-h, z+h, t-\tau)]}{4\rho h^2}
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$-\frac{A\eta\tau^2G[w(x+h,t-\tau)+w(x-h,t-\tau)]}{\rho h^2},$$

где $A\eta = \frac{\theta}{\tau}$; $\lambda = \frac{\mu \cdot E}{(1+\mu)(1-2\mu)}$; $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, η – коэффициент динамической вязкости.

Для определения достаточного условия устойчивости применяется «испытание» разностной схемы с помощью теста «шахматная доска» [14].

Особенность данных рекуррентных соотношений заключается в построении конфигурации под «чашей прогиба» деформированной дорожной одежды в два первоначальных момента времени t и $t - \tau$ (Рис.3). В этом случае задаем перемещения в узлах сетки, моделируя отклонения узлов из положения равновесия, которые в дальнейшем совершают собственные колебания, моделируем движение активной массы. Основное достоинство описанной вычислительной процедуры состоит в том, что фактически не нужно решать совместно систему уравнений. На каждом временном шаге решаются отдельные уравнения с одним неизвестным на верхнем временном слое $(t + \tau)$ [16].

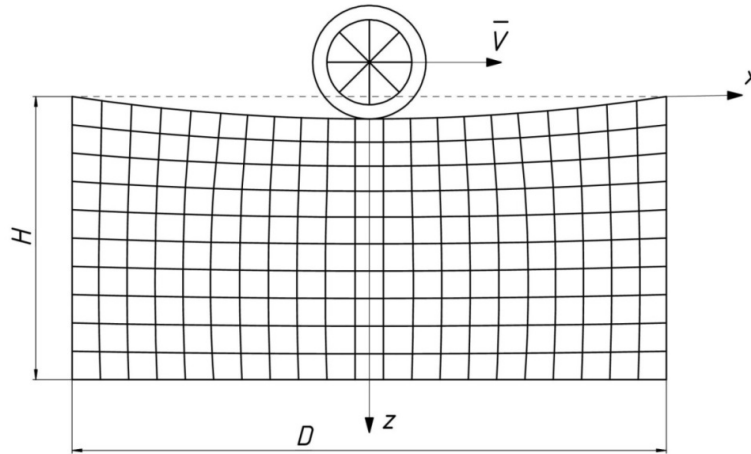


Рис.3. Модель деформированной дорожной одежды

Вычислительный эксперимент.

В качестве вычислительного эксперимента была принята возмущенная зона дорожной одежды с параметрами: геометрические характеристики $D = 1,9$ м, $H = 1$ м, шаг по координате $h = 0,1$ м, шаг по времени $\tau = 10^{-4}$ с (удовлетворяет достаточному условию устойчивости решения). Начальные и граничные условия показаны на рис. 4. Для начальных условий принимаем $u(t) = u(t - \tau)$, $w(t) = w(t - \tau)$, что означает равенство нулю скоростей всех точек в начальный момент времени. В предположении, что вне активной массы колебания отсутствуют, были введены фиктивные слои с нулевыми перемещениями, которые соответствуют граничным условиям защемления [16].

Физико-механические характеристики дорожной одежды приведены в табл. 1.

Таблица 1
Приведенные физико-механические характеристики дорожной одежды

№ эксперимента	μ	E , МПа	ρ , кг/м ³	η , Па*с
1	0,3	300	2000	100
2				1000
3				10000

На рис. 5 показан отклик дорожной одежды на проезд транспортного средства при различных значениях коэффициента динамической вязкости.

U, MM																				
0,00	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,12	0,09	0,06	0,03	0,00	-0,03	-0,06	-0,09	-0,12	-0,15	-0,12	-0,09	-0,06	-0,03	0,00
0,00	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,00	-0,02	-0,03	-0,05	-0,06	-0,08	-0,06	-0,05	-0,03	-0,02	0,00
0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00
0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
0,00	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00
0,00	-0,02	-0,03	-0,05	-0,06	-0,08	-0,06	-0,05	-0,03	-0,02	0,00	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,00
0,00	-0,02	-0,03	-0,05	-0,07	-0,08	-0,07	-0,05	-0,03	-0,02	0,00	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,07	0,05	0,03	0,02	0,00
0,00	-0,02	-0,03	-0,05	-0,06	-0,08	-0,06	-0,05	-0,03	-0,02	0,00	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,00
0,00	-0,01	-0,03	-0,04	-0,05	-0,07	-0,05	-0,04	-0,03	-0,01	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,07	0,05	0,04	0,03	0,01	0,00
0,00	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
W, MM																				
0,00	0,29	0,54	0,77	0,96	1,13	1,26	1,37	1,44	1,49	1,50	1,49	1,44	1,37	1,26	1,13	0,96	0,77	0,54	0,29	0,00
0,00	0,26	0,49	0,69	0,86	1,01	1,13	1,23	1,30	1,34	1,35	1,34	1,30	1,23	1,13	1,01	0,86	0,69	0,49	0,26	0,00
0,00	0,23	0,43	0,61	0,77	0,90	1,01	1,09	1,15	1,19	1,20	1,19	1,15	1,09	1,01	0,90	0,77	0,61	0,43	0,23	0,00
0,00	0,20	0,38	0,54	0,67	0,79	0,88	0,96	1,01	1,04	1,05	1,04	1,01	0,96	0,88	0,79	0,67	0,54	0,38	0,20	0,00
0,00	0,17	0,32	0,46	0,58	0,68	0,76	0,82	0,86	0,89	0,90	0,89	0,86	0,82	0,76	0,68	0,58	0,46	0,32	0,17	0,00
0,00	0,14	0,27	0,38	0,48	0,56	0,63	0,68	0,72	0,74	0,75	0,74	0,72	0,68	0,63	0,56	0,48	0,38	0,27	0,14	0,00
0,00	0,11	0,22	0,31	0,38	0,45	0,50	0,55	0,58	0,59	0,60	0,59	0,58	0,55	0,50	0,45	0,38	0,31	0,22	0,11	0,00
0,00	0,09	0,16	0,23	0,29	0,34	0,38	0,41	0,43	0,45	0,45	0,45	0,43	0,41	0,38	0,34	0,29	0,23	0,16	0,09	0,00
0,00	0,06	0,11	0,15	0,19	0,23	0,25	0,27	0,29	0,30	0,30	0,30	0,29	0,27	0,25	0,23	0,19	0,15	0,11	0,06	0,00
0,00	0,03	0,05	0,08	0,10	0,11	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,11	0,10	0,08	0,05	0,03	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Рис.4. Начальные и граничные условия.

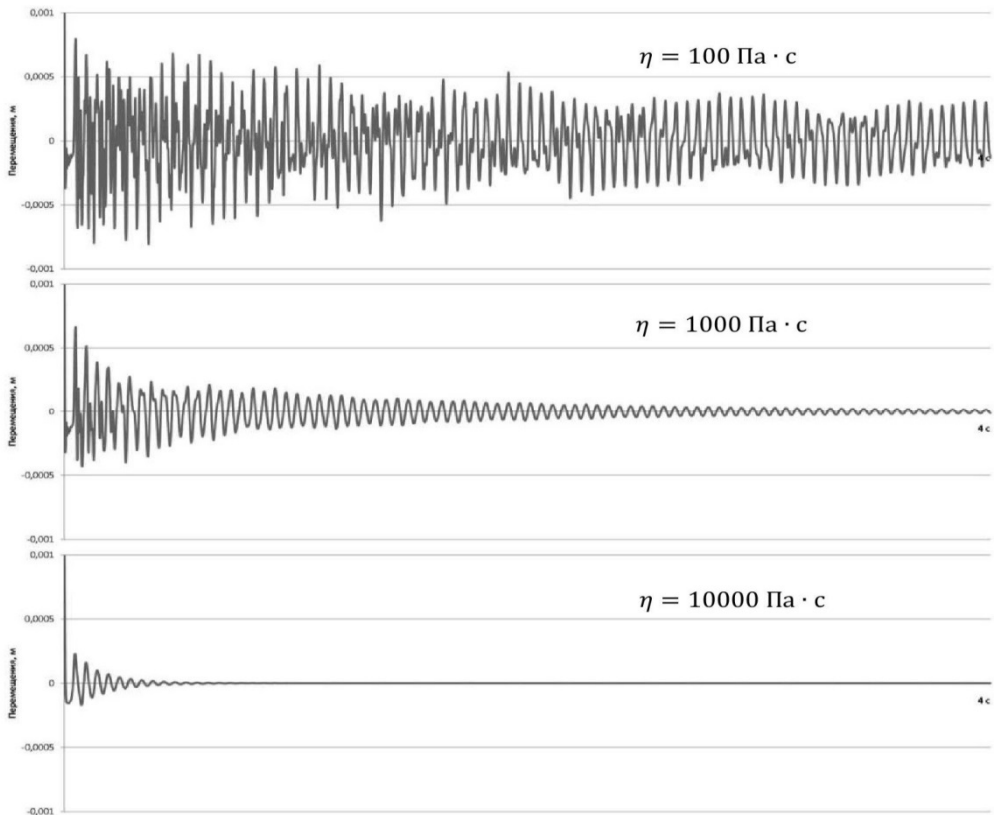


Рис.5

Из рисунка видно, что с ростом коэффициента динамической вязкости, колебания затухают более интенсивно.

Результат расчета амплитудно-частотной характеристики вертикального перемещения w для принятого узла, при варьировании приведенного модуля упругости представлен на рис.6. Физико-механические характеристики дорожной одежды приведены в табл. 2.

Таблица 2
Приведенные физико-механические характеристики дорожной одежды

№ эксперимента	μ	E , МПа	ρ , кг/м ³	η , Па*с
1	0,3	300	1500	100
2		400		
3		500		

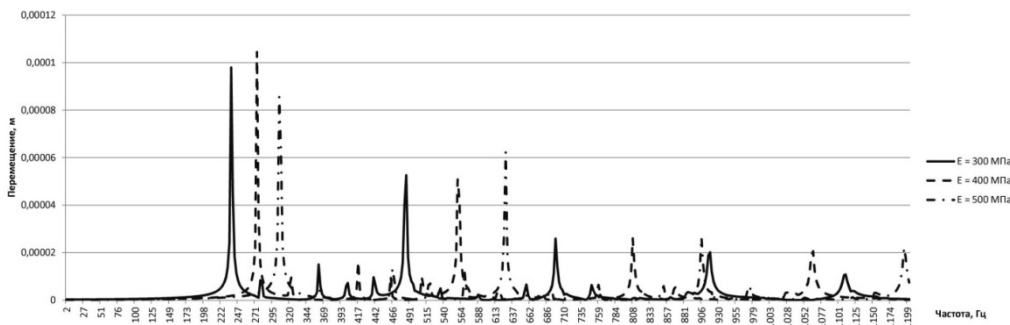


Рис.6

Обработка результатов расчета с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ) в диапазоне частот f_i от 0 до 1200 Гц представлены в табл.3, из которой видно, что с ростом приведенного модуля упругости материала, растет собственная частота колебаний.

Таблица 3. Обработка результатов расчета

E , МПа	f_1 , Гц	f_2 , Гц	f_3 , Гц	f_4 , Гц
300	237	486	698	916
400	273	559	808	1062
500	305	627	906	1194

Амплитудно-частотная характеристика вертикального перемещения w дорожной конструкции в принятом узле при изменении плотности приведена на рис.7. Приведенные физико-механические характеристики дорожной одежды записаны в табл.4.

Таблица 4. Приведенные физико-механические характеристики дорожной одежды

№ эксперимента	μ	E , МПа	ρ , кг/м ³	η , Па*с
1	0,3	300	1500	100
2			2000	
3			2500	

Обработка результатов расчета с использованием процедуры БПФ в диапазоне частот f_i от 0 до 1200 Гц представлены в табл.5, из которой видно, что с ростом плотности среды, спектр смещается в низкочастотную область.

Таблица 5. Обработка результатов расчета

ρ , кг/м ³	f_1 , Гц	f_2 , Гц	f_3 , Гц	f_4 , Гц
1500	237	486	698	916
2000	205	420	603	791
2500	186	376	540	706

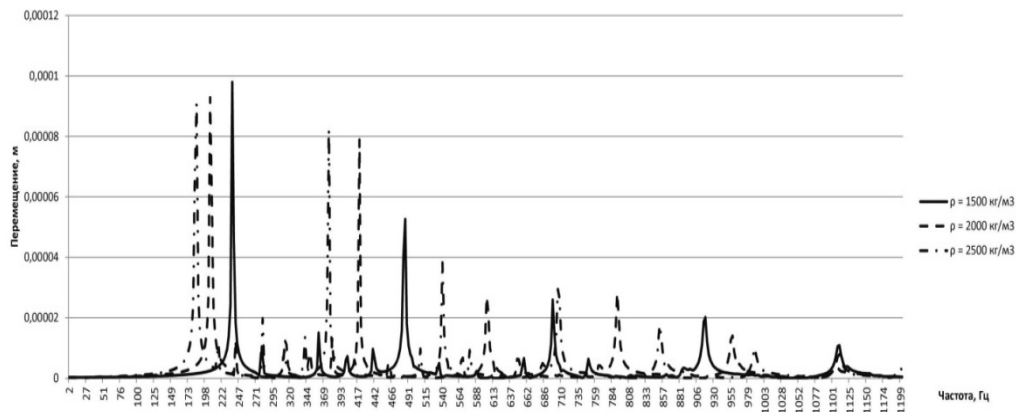


Рис.7

Выводы

1. Предложен конечно-разностный метод для определения спектра собственных частот и амплитуд колебаний дорожной конструкции с учетом изменения физико-механических характеристик.
2. Теоретически показана возможность учета реальных транспортных нагрузок путем задания конфигурации чаши прогиба в качестве начального состояния элементов расчетной модели.
3. В вычислительном эксперименте осуществлено моделирование затухающих колебаний, на основании которых восстанавливается спектр собственных частот.
4. Получена достаточно полная информация о колебаниях дорожной конструкции в удобном для анализа виде.
5. Использование полученных результатов расчета применительно к условиям моделирования реальных процессов нагружения автомобильной дороги позволяет уточнить динамические характеристики, что позволяет повысить качество принимаемых решений о техническом состоянии эксплуатируемых автомобильных дорог в процессе их диагностики.

Литература

1. *Илиополов С. К., Селезнев М.Г., Углова Е.В.* Динамика дорожных конструкций: Монография – Ростов н/Д: Рост.гос. строит. ун-т, 2002. – 258 с.
2. *Осиновская В.А.* Разработка теории вибрационного разрушения нежестких дорожных одежд и путей повышения их долговечности. Автореф. дисс. на соиск. уч. степени д.т.н. – Москва, 2011. – 43 с.
3. *Углова, Е. В.* Теоретические и методологические основы оценки остаточного усталостного ресурса асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук / Е. В. Углова. – Ростов - на - дону., 2009. – 372 с.
4. *Матвеев С. А., Немировский Ю. В.* Армированные дорожные конструкции: моделирование и расчет. – Новосибирск: Наука, 2006.– 348 с.
5. *Илиополов С.К., Селезнев М.Г.* Разработка математических моделей и исследование на их основе энергетических характеристик воздействия автотранспорта на дорожную конструкцию и распределение колебаний в элементах системы «дорожная конструкция грунт» // Дороги России. – 2003. – № 8. – С. 49–51.
6. *Немчинов М.В., Осиновская В.А.* Заметки о расчете дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 1. – С. 34–36.
7. *Матуа В.П., Баранова Е.М., Чирва Д.В.* Совершенствование методов проектирования нежестких дорожных одежд // Вестник ХНАДУ. – 2006. – № 34–35. – С. 23–25.
8. *Kwan A.K.H., Ng P.L.* Effects of traffic vibration on curing concrete stitch: Part I – test method and control program // Engeneering Structures. – 2007. – Vol. 29. – P. 2871–2880.

9. Zhao Yan-ging, Zhou Chang-kong, Wang Guo-zhong, Wang Zhi-chao Dalian ligong-daxue xuebao // Dalian Univ. Technol. – 2011. – №1. – P. 73–77.
10. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. – М., 2001. – 116 с.
11. Колмогоров Г.Л., Кычкин В.И., Есипенко И.А. Интеллектуализация вибродиагностической лаборатории автомобильных дорог // Вестник ПНИПУ «Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности». – 2013. – №1. – С. 69–77.
12. Лугов С.В. Основные положения методики расчета глубины колеи на дорожных одеждах с асфальтобетонным покрытием. Дис. ... канд. техн. наук. - М., 2004. – 267 с.
13. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. школа, 1982. – 264 с.
14. Маквецов Е.Н. Модели из кубиков. – М.: Сов. радио, 1978. – 192 с.
15. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. - М.: Наука, 1971. - 552 с.
16. Маквецов Е.Н., Тартаковский А.М. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1993. – 200 с.: ил.

References

1. Iliopolov, S. K., Seleznev, M.G., Uglova, E.V. (2002). *Dinamika dorozhnykh konstruktciy*: Monografiya, Rostov n/D: Rost. gos. stroit. un-t, 258 s.
2. Osinovskaya, V.A. (2011). Razrabotka teorii vibratsionnogo razrusheniya nezhestkikh dorozhnykh odezhd i putei povysheniya ih dolgovechnosti, *Avto-ref.diss. nadoisk.uch. stepenid.t.n*, Moskva, 43 p.
3. Uglova, E.V. (2009). Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy ocenki ostatochnogo ustalostnogo resursa asfaltobetonnnykh pokrytiy avtomobilnykh dorog: *Dis. na soisk. uch. step. d-ratehn. nauk*, Rostov-na-Donu., 372 p.
4. Matveev, S.A., Nemirovski, Y. V. (2006). *Armirovannyye dorozhnyye konstrukticii: modelirovanie i raschet*, Novosibirsk: Nauka, 348 p.
5. Iliopolov, S.K., Seleznev, M.G. (2003). Razrabotka matematicheskikh modeley i issledovanie na ih osnove energeticheskikh harakteristik vozdeistviya avtotransporta na dorozhnyuyu konstruktciyu i raspredelenie kolebaniy v elementah sistemy «dorozhnaya konstruktciya grunt», *Dorogi Rossii*, № 8, pp. 49–51.
6. Nemchinov, M.V., Osinovskaya, V.A. (2011). Zametki o raschete dorozhnykh odezhd, *Nauka i tehnika v dorozhnoy otrasli*, № 1, pp. 34–36.
7. Matua, V.P., Baranova, E.M., Chirva, D.V. (2006). Sovershenstvovanie metodov proektirovaniya nezhestkikh dorozhnykh odezhd, *Vestnik HNADU*, № 34–35, pp. 23–25.
8. Kwan, A.K.H., Ng P.L. (2007). Effects of traffic vibration on curing concrete stitch: Part I – test method and control program, *Engeneering Structures*, Vol. 29, pp. 2871–2880.
9. Zhao Yan-ging, Zhou Chang-kong, Wang Guo-zhong, Wang Zhi-chao (2011). Dalian ligongdaxue xuebao, *Dalian Univ. Technol.*, №1, pp. 73–77.
10. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд, М., 2001, 116 p.
11. Kolmogorov G.L., Kychkin V.I., Esipenko I.A. (2013). Intellektualizatsiya vibrodiagnosticheskoy laboratorii avtomobilnykh dorog, *Vestnik PNIPIU «Ohrana okruzhayushchey sredy, transport, bezopasnost zhiznedeyatelnosti»*, №1, pp. 69–77.
12. Lugov S.V. (2004). Osnovnyye polozheniya metodiki rascheta glubiny koleina dorozhnykh odezhdakh s asfaltobetonnym pokrytiem, *Dis. ... kand. tehn. nauk*, М., 267 p.
13. Samul V.I. (1982). *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti: Ucheb. Posobie dlya studentov vuzov: 2-e izd., pererab.*, М.: Vyssh. shkola, 264 p.
14. Makvetcov E.N. (1978). *Modeli iz kubikov*, М.: Sov. radio, 192 p.
15. Samarski A.A. (1971). *Vvedenie v teoriyu raznostnykh shem*, М.: Nauka, 552 p.
16. Makvetcov E.N., Tartakovski, A.M. (1993). *Mehanicheskie vozdeistviya i zashchita radioelektronnoy apparatury: Uchebnik dlia vuzov*, М.: Radio i sviaz, 200 p.

THE FINITE DIFFERENCE METHOD IN PAVEMENTS RESEARCH WITH REAL TRANSPORT LOADING

G.L. Kolmogorov, V.I. Kychkin, I.A. Esipenko

The finite differences method application model to calculation of pavements dynamic characteristics is offered. The recurrence relations allow establishing amplitude-time and amplitude-frequency characteristics taking into account viscoelastic material properties. Results of computing experiment are received at varied values of physic mechanical characteristics.

KEYWORDS: pavement, the finite differences method, recurrence relations, flexural bowl, active weight, free frequency.