

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Г.Л. Колмогоров, А.А. Лежнева, Н.С. Корзникова

Пермский государственный технический университет

Представлен анализ напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия как модели пластины на упругом основании, произведен расчет надежности дорожного полотна в зависимости от варьирования физико-механических характеристик материала покрытия.

Непрерывный рост интенсивности движения на автомобильных дорогах, повышение грузоподъемности транспортных средств и осевых нагрузок, увеличение скоростных режимов движения требуют нового подхода к рассмотрению вопросов долговечности дорожных покрытий в условиях реального динамического воздействия транспортных средств на дорожные конструкции.

Основными факторами, обуславливающими долговечность асфальтобетонных покрытий, являются транспортные нагрузки, конструкция и состояние дорожной одежды, климатические условия. Разработка эффективных путей повышения долговечности асфальтобетонных покрытий должна базироваться на исследованиях свойств асфальтобетона с учетом реальных режимов нагружения, в частности – с учетом особенностей воздействия современных транспортных средств на дорожные конструкции.

Дорожную одежду следует проектировать с требуемым уровнем надежности, обеспечивающим безотказную работу в течение межремонтного периода. Отказ конструкции по прочности физически может характеризоваться образованием продольной и поперечной неровности поверхности дорожной одежды, связанной с прочностью конструкции (поперечные неровности, колея, усталостные трещины), с последующим развитием других видов деформаций и разрушений (частые трещины, сетка трещин, выбоины, просадки и т.д.) [1].

При движении автомобильного транспорта дорожное покрытие находится под действием поперечной нагрузки, вызывающей изгиб и соответствующее изгибу напряженное состояние. Поперечная нагруз-

ка при этом приводится либо к равномерно распределенной по контактной поверхности «колесо – покрытие», либо к сосредоточенной силе, соответствующей результирующим нагрузкам от колес движущегося автотранспорта [2]. На рис. 1 представлена расчетная схема квадратной пластинки, покоящейся на упругом основании, как фрагмент дорожного полотна (например, в случае ямочного ремонта), под действием сосредоточенной силы, приложенной в центре пластинки.

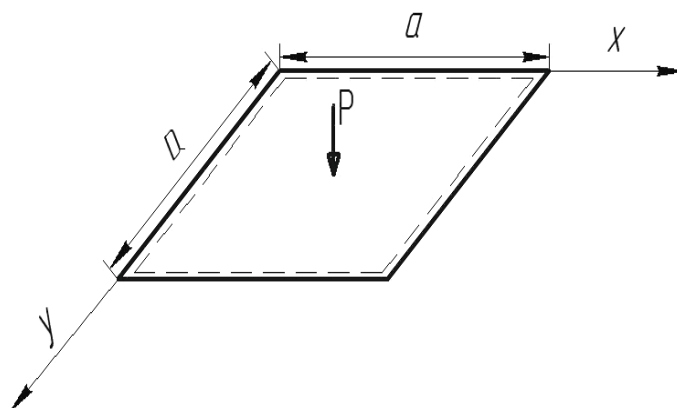


Рис. 1. Расчетная схема

Пластина считается свободно опертой по контуру. Дифференциальное уравнение изгиба пластины на упругом основании имеет следующий вид [3]:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p - kw}{D}, \quad (1)$$

где $w(x, y)$ – функция прогибов пластинки; p – поперечная нагрузка; k – коэффициент упругого основания (коэффициент постели);

$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость пластинки; E – модуль уп-

ругости материала пластинки; μ – коэффициент Пуассона материала; h – толщина пластинки.

Для свободно опертой пластинки решение уравнения (1) ищется в виде двойного тригонометрического ряда

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (2)$$

где a_{mn} – неизвестные коэффициенты; a, b – размеры пластинки.

Функции синуса ряда (2) удовлетворяют всем граничным условиям свободного опирания пластинки по контуру.

Для ряда (2) после определения коэффициентов a_{mn} из условий нагружения пластинки находится функция прогибов, которая для приложенной в центре квадратной пластинки сосредоточенной силы P имеет вид [3]:

$$w(x, y) = 4Pa^2 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi}{2} \sin \frac{n\pi}{2}}{\pi^4 D(m^2 + n^2)^2 + ka^4} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{a}\right),$$

$m, n=1,3,5\dots$ (3)

На рис. 2 приведены рассчитанные по формуле (3) зависимости максимальных прогибов асфальтобетона ($E = 18000 \text{ кг/см}^2$ [1]), соответствующих центру пластинки с $a = 100 \text{ см}$, от толщины пластинки для различных значений коэффициента постели. В расчетах принято $P = 350 \text{ кг}$ (1/4 веса автомобиля ВАЗ-2114), коэффициент Пуассона асфальтобетона $\mu = 0,35$.

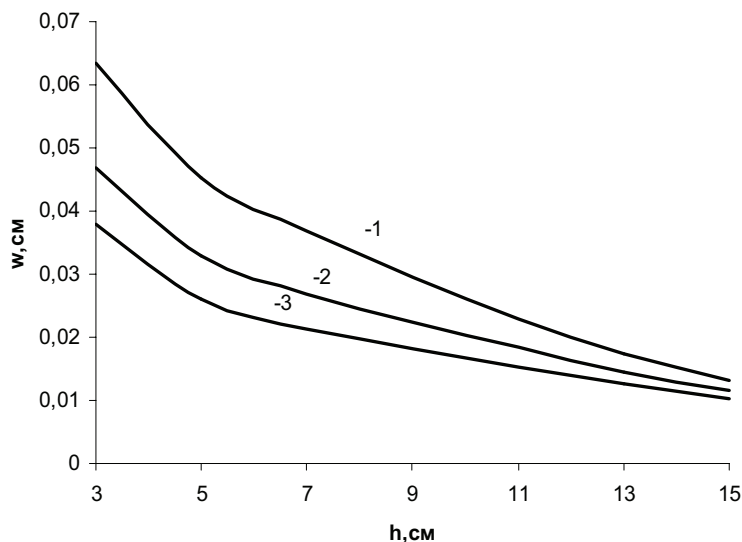


Рис. 2. Зависимость прогиба дорожного покрытия от его толщины при различных коэффициентах постели: 1 – $k = 10 \text{ кг/см}^2/\text{см}$; 2 – $15 \text{ кг/см}^2/\text{см}$; 3 – $20 \text{ кг/см}^2/\text{см}$

Из рис. 2 следует, что с увеличением толщины пластинки максимальный прогиб уменьшается. Увеличение коэффициента упругого основания также приводит к уменьшению возникающих прогибов.

При известной функции прогибов (3) определяются действующие в пластинке изгибающий и крутящий моменты

$$\begin{cases} Mx = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \\ My = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right); \\ Mxy = D(1 - \mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{cases} \quad (4)$$

Максимальные изгибающие моменты соответствуют центру пластинки ($x = a/2$; $y = b/2$), которым соответствуют, в свою очередь, максимальные напряжения:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma = \frac{24P\pi^2 D}{h^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(m^2 + \mu n^2) \sin \frac{m\pi}{2} \sin \frac{n\pi}{2}}{\pi^4 D(m^2 + n^2)^2 + ka^4} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{a}\right),$$

$m, n = 1, 3, 5 \dots$ (5)

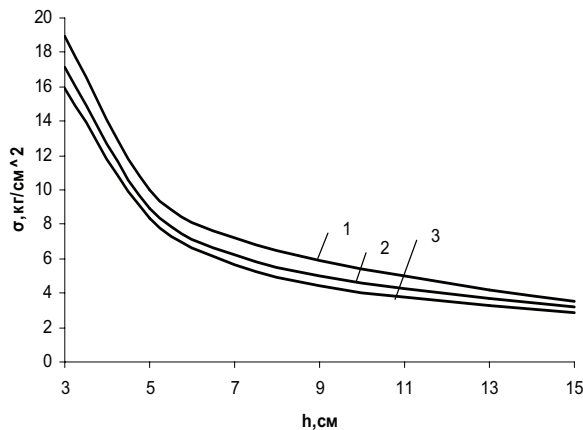


Рис. 3. Зависимость напряжений, возникающих в дорожном покрытии от толщины при различных коэффициентах постели: 1 – $k = 10$ кг/см²/см; 2 – 15 кг/см²/см; 3 – 20 кг/см²/см

На рис. 3 приведены расчетные зависимости напряжений $\sigma_x = \sigma_y$, соответствующих центру пластинки, от толщины асфальтобетонного покрытия для ряда значений k . Из рис. 3 следует, что с увеличением коэффициента k действующие напряжения снижаются. На напряженном состоянии увеличение коэффициента k также сказывается благоприятно. Следует отметить, что предельные напряжения асфальтобетона при изгибе находятся в пределах $[\sigma_{\text{пред}}] = 1,6\text{--}3,2$ МПа [1], сопоставление

расчетных напряжений с допускаемыми говорит о том, что для принятых в расчетах исходных данных прочность асфальтобетона обеспечивается.

При известном напряженном состоянии пластинки появляется возможность оценки надежности асфальтобетонного покрытия. Проанализируем, как меняется надежность дорожного полотна в зависимости от его коэффициента постели k , толщины h и предельного значения напряжения при изгибе покрытия $\sigma_{\text{пред}}$. Варьируя эти параметры, определим наиболее выгодное и рациональное использование того или иного покрытия, при этом учтем условие максимальной надежности дорожного полотна. Для этого воспользуемся элементами теории надежности и предположим, что коэффициент постели является случайной величиной.

Будем считать, что рассматриваемый элемент сохраняет работоспособность при условии $\sigma_{\text{пред}} > \sigma$, при этом все характеристики распределены по нормальному закону. Тогда надежность можно определить следующим образом [4]:

$$H = P(S > R) = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\beta_0} e^{-\frac{\beta^2}{2}} d\beta,$$

где $S = [\sigma_{\text{пред}}]$ – предельная характеристика; $R = \sigma$ – рабочая характеристика; $S = [\sigma_{\text{пред}}] = 1,6 \dots 3,2$ МПа, $\beta_0 = \frac{m_S - m_R}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_R^2}}$, где m_S, m_R – средние

значения предельной и рабочей характеристик; σ_S, σ_R – среднеквадратичное отклонение предельной и рабочей характеристик.

Поскольку h – случайная величина, σ также будет случайной величиной. Определим математическое ожидание и дисперсию рабочей характеристики, используя приближенный метод разложения в ряд:

$$m_R = \sigma(h) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \sigma(h)}{\partial h^2} D_h,$$

$$D_R = \left(\frac{\partial \sigma(h)}{\partial h} \right)^2 D_h,$$

где $D_h = \sigma_h^2$, σ_h – отклонение случайной величины от его среднего значения ($\sigma_h = 0,1h$).

На рис. 4 представлены результаты расчетов по вышеприведенным формулам.

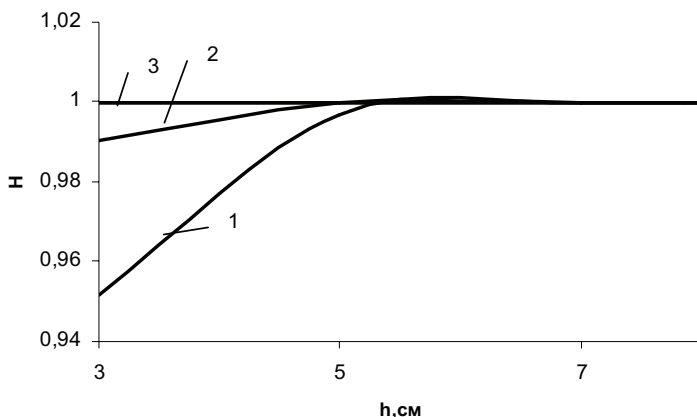


Рис. 4. Зависимость надежности дорожного покрытия от его толщины при заданном предельном значении напряжения ($\sigma = 2,4$ МПа) и при различных коэффициентах постели: 1 – $k = 10$ кг/см²/см; 2 – 15 кг/см²/см; 3 – 20 кг/см²/см

Из рис. 4 следует, что с увеличением коэффициента постели надежность дорожного покрытия возрастает. Обратим внимание на то, что начиная со значения толщины $h = 5$ см надежность стремится к единице.

Сделаем следующие выводы:

1. Предложена методика прочностного расчета фундамента дорожного покрытия в виде прямоугольной пластинки на упругом основании.
2. Предложена методика оценки надежности дорожного покрытия при известном напряженном состоянии покрытия.

Список литературы

1. Бабков В.Ф. Андреев О.В. Проектирование автомобильных дорог: учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1987. – 368 с.
2. Состояние и перспективы транспорта. Обеспечение безопасности дорожного движения / под ред. Б.С. Юшкова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009.
3. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Наука, 1966. – 635 с.
4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.

Получено 16.08.2010