



УДК 624.074.43

С.К. Ельмуратов  
ПГУ, г. Павлодар

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ УСТОЙЧИВОСТИ И ДИНАМИКИ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК И ПЛАСТИН

Прогрессивными видами конструкций в современном строительстве являются тонкостенные пространственные конструкции, совмещающие в себе несущие и ограждающие функции. К таким конструкциям можно отнести различного вида оболочки, позволяющие перекрывать большие пролеты.

В связи с тем, что исследование напряженно-деформированного состояния оболочек сопряжено со значительными математическими трудностями, в большинстве случаев трудно, а порой и невозможно применить аналитические методы. По этой причине расчет оболочек выполняется, главным образом, численными методами. Наиболее широкое распространение получили методы: конечных разностей, вариационно-разностный, конечных элементов. Каждый из перечисленных методов имеет множество модификаций, оправдывающих себя при решении определенных типов задач.

Однако, вследствие сложности уравнений теории оболочек, решения по устойчивости и динамике сопряжены с большими трудностями. Как отмечают большинство авторов [1-3], одной из основных причин медленной сходимости решений, полученных численными методами, является преобладающее влияние жестких смещений на ошибку дискретизации.

В настоящей работе рассматривается новая разностная схема – метод криволинейных сеток, который отличается улучшенной сходимостью решения за счет исключения ошибки аппроксимации дифференциальных соотношений вектор-функций жестких смещений. Идея метода подробно изложена в работах [4-6]. Приведены решения для задач устойчивости оболочек различного очертания. Исследована сходимость метода. В работах [7,8] метод криволинейных сеток применен к задачам динамики оболочек и пластин. Получены уравнения равновесия и движения для оболочек переменной жесткости в векторной форме. Дискретизация уравнений выполнена на основе метода криволинейных сеток. Приведены численные результаты по динамике тонких оболочек и пластин. Исследована сходимость метода применительно к задачам динамики оболочек и пластин.

В статье рассматривается оболочка двоякой кривизны, находящаяся под действием внешних статических и динамических нагрузок. Проведем сечения в направлении координатных осей  $x^1$  и  $x^2$  нормально к срединной поверхности оболочки. Выделим элемент оболочки, ограниченный линиями  $x^1 - dx^1/2, x^1 + dx^1/2$  в одном направлении и  $x^2 - dx^2/2, x^2 + dx^2/2$  – в другом (рис. 1).

Размер площадки определим величиной  $\sqrt{a} = \sqrt{a_{11}a_{22}}$ . Тогда на сторону  $x^1 - dx^1/2$  длиной  $\sqrt{a_{22}dx^2}$  действует сила

$$\vec{N}^1 \sqrt{a_{22} dx^2} = -\frac{\vec{N}^1}{a^{11}} \sqrt{a_{22} dx^2} = -\sqrt{a} \vec{N}^1 dx^2. \quad (1)$$

На сторону  $x^1 + dx^1/2$  действует сила

$$\left( \sqrt{a} \vec{N}^1 + \frac{\partial \sqrt{a} \vec{N}^1}{\partial x^1} \right) dx^2. \quad (2)$$

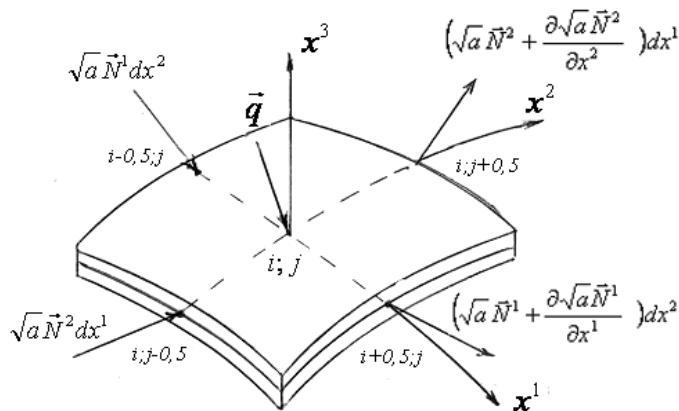


Рис. 1. Главные векторы усилий на срединной поверхности элемента оболочки

Суммарная сила получится путем складывания сил по параллельным сторонам элемента оболочки

$$\frac{\partial \sqrt{a} \vec{N}^1}{\partial x^1} dx^1 dx^2. \quad (3)$$

Знак минус в формуле (1) означает, что нормаль к рассматриваемой площадке направлена в сторону убывания координаты  $x^1$ .

Суммарная сила, действующая на две другие стороны, имеет вид:

$$\frac{\partial \sqrt{a} \vec{N}^2}{\partial x^2} dx^1 dx^2. \quad (4)$$

Внешние силы определяются выражением  $\vec{q} \sqrt{a} dx^1 dx^2$ . Здесь  $\vec{q}$  - приведенная к срединной поверхности внешняя нагрузка, отнесенная к единице площади.

Для рассматриваемого элемента оболочки запишем условие равенства нулю главного вектора всех сил

$$\frac{\partial \sqrt{a} \vec{N}^1}{\partial x^1} + \frac{\partial \sqrt{a} \vec{N}^2}{\partial x^2} + \sqrt{a} \vec{q} = 0. \quad (5)$$

Векторы усилий для заданной срединной поверхности являются составляющими контравариантного тензора с векторными компонентами

$$\begin{aligned} \vec{N}^1 &= N^{11} \vec{e}_1 + N^{12} \vec{e}_2 + Q^1 \vec{e}_3, \\ \vec{N}^2 &= N^{21} \vec{e}_1 + N^{22} \vec{e}_2 + Q^2 \vec{e}_3. \end{aligned} \quad (6)$$

Выражения для усилий имеют вид:

$$\begin{aligned} N^{\alpha\alpha} &= \frac{Eh}{1-\nu^2} [va^{\alpha\alpha}a^{\beta\beta}\varepsilon_{\beta\beta} + (1-\nu)a^{\alpha\beta}a^{\beta\alpha}\varepsilon_{\beta\beta}] \\ N^{11} &= \frac{Eh}{1-\nu^2} [va^{11}a^{22}\varepsilon_{\beta\beta} + (1-\nu)a^{1\beta}a^{\beta 1}\varepsilon_{\beta\beta}] = \\ &= \frac{Eh}{1-\nu^2} [va^{11}a^{11}\varepsilon_{11} + va^{11}a^{22}\varepsilon_{22} + a^{11}a^{11}\varepsilon_{11} - va^{11}a^{11}\varepsilon_{11}] = \frac{Eh}{1-\nu^2} [va^{11}a^{22}\varepsilon_{22} + a^{11}a^{11}\varepsilon_{11}] \\ N^{22} &= \frac{Eh}{1-\nu^2} [a^{22}a^{22}\varepsilon_{22} + va^{11}a^{22}\varepsilon_{11}] \end{aligned} \quad (7)$$

Из полученных выражений (7) видно, что физико-механические свойства и геометрические характеристики оболочки можно задавать дискретно, что позволяет их менять весьма произвольно.

Выражения для перерезывающих сил  $Q^\beta$  определяются из условий равенства нулю главного момента внутренних усилий и моментов, действующих на элемент оболочки.

$$\frac{\partial \sqrt{a} \bar{M}^\beta}{\partial x^\beta} + [\bar{e}_\beta, \bar{N}^\beta] \sqrt{a} = 0. \quad (8)$$

Вектор внутренних моментов определяется по формуле

$$\bar{M}^\beta = C_{\alpha\gamma} \bar{M}^{\beta\alpha} \bar{e}^\gamma, \quad (9)$$

где  $C_{\alpha\gamma}$  - дискриминантный тензор поверхности ( $C_{11}=C_{22}=0$ ,  $C_{12}=\sqrt{a}$ ,  $C_{21}=-\sqrt{a}$ ).

Выразим векторы внутренних моментов через их ковариантные компоненты:

$$\bar{M}^1 = \sqrt{a} (M^{11}\bar{e}^2 - M^{12}\bar{e}^1), \bar{M}^2 = \sqrt{a} (M^{21}\bar{e}^2 - M^{22}\bar{e}^1). \quad (10)$$

Подставляя (10) в (8) и умножая результат на полученные векторы  $\bar{e}_1$  и  $\bar{e}_2$  основного локального базиса, получим соответственно выражения для  $Q_1$  и  $Q_2$  [9]:

$$\begin{aligned} Q_{i+0.5,j}^1 &= [(aM^{11})_{i+1,j} a^{2i+1,j}_{2i+0.5,j} - (aM^{11})_{i,j} a^{2i,j}_{2i+0.5,j} + (aM^{12})_{i,j} a^{1i,j}_{2i+0.5,j} - \\ &- (aM^{12})_{i+1,j} a^{1i+1,j}_{2i+0.5,j} + (aM^{21})_{i+0.5,j+0.5} a^{2i+0.5,j+0.5}_{2i+0.5,j} - \\ &- (aM^{21})_{i+0.5,j-0.5} a^{2i+0.5,j-0.5}_{2i+0.5,j} + (aM^{22})_{i+0.5,j-0.5} a^{1i+0.5,j-0.5}_{2i+0.5,j} - (aM^{22})_{i+0.5,j+0.5} a^{1i+0.5,j+0.5}_{2i+0.5,j}] / a_{i+0.5,j}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Q_{i;j+0.5}^2 &= [(aM^{11})_{i-0.5;j+0.5} a^{2i-0.5;j+0.5}_1 - (aM^{11})_{i+0.5;j+0.5} a^{2i+0.5;j+0.5}_{1i;j+0.5} + \\ &+ (aM^{12})_{i+0.5;j+0.5} a^{1i+0.5;j+0.5}_{1i;j+0.5} - (aM^{12})_{i-0.5;j+0.5} a^{1i-0.5;j+0.5}_{1i;j+0.5} + \\ &+ (aM^{21})_{i;j} a^{2i;j}_{1i;j+0.5} - (aM^{21})_{i;j+1} a^{2i;j+1}_{1i;j+0.5} + (aM^{22})_{i;j+1} a^{1i;j+1}_{1i;j+0.5} - (aM^{22})_{i;j} a^{1i;j}_{1i;j+0.5}] / a_{i;j+0.5}. \end{aligned} \quad (12)$$

Внешняя нагрузка  $\vec{q}$  может меняться во времени по определенному закону. Тогда, согласно принципу Даламбера, необходимо учитывать силы инерции. В этом случае нагрузка в векторной форме будет иметь вид

$$\vec{q} = \vec{q}(t) - \rho h \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2}. \quad (13)$$

Здесь первый член представляет собой внешнюю нагрузку, меняющуюся во времени весьма произвольно; второй член определяет инерционную силу. В выражении (13):

$\rho$  - плотность материала,  $\vec{U}$  - вектор перемещений. Для случая гармонических свободных колебаний оболочки решение (5) можно записать в виде

$$\vec{U}(x^1, x^2, t) = \vec{U}(x^1, x^2) \sin(\omega t + \varphi), \quad (14)$$

где  $\vec{U}(x^1, x^2)$  - амплитуда синусоидальных колебаний,  $\omega$  - частота собственных колебаний.

Подставляя (14) в (5) и сокращая на  $\sin(\omega t + \varphi)$ , получим уравнение собственных колебаний оболочки

$$\frac{\partial \sqrt{a} \vec{N}^1}{\partial x^1} + \frac{\partial \sqrt{a} \vec{N}^2}{\partial x^2} + \omega^2 \rho h \vec{U} = 0. \quad (15)$$

Для вынужденных колебаний решение ищем в виде

$$\vec{U}(x^1, x^2, t) = \vec{U}(x^1, x^2) \sin \theta t, \quad (16)$$

где  $\theta$  - частота возмущающей силы.

С учетом (16) можно записать

$$\frac{\partial \sqrt{a} \vec{N}^1}{\partial x^1} + \frac{\partial \sqrt{a} \vec{N}^2}{\partial x^2} - \frac{\rho \theta^2 h}{g} \vec{U} = \vec{q}(t). \quad (17)$$

Для гармонических вынужденных колебаний  $q$  задается в виде

$$q(t) = R \sin \theta t - \frac{P}{g} \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2}. \quad (18)$$

Во всех остальных случаях  $q(t)$  может меняться во времени по определенному для каждого случая закону.

Для дискретизации полученных уравнений применим новую численную схему – метод криволинейных сеток – основанную на идее корректной аппроксимации ковариантной производной вектор-функции в криволинейных системах координат.

В качестве координатной системы удобно использовать координаты, соответствующие номерам узлов разностной сетки в направлении  $x^1, x^2$  с постоянным интервалом  $\Delta x^1 = \Delta x^2 = 1$  при любой сетке. Величины  $\sqrt{\alpha_{11}}$  и  $\sqrt{\alpha_{12}}$  определяют расстояние между узлами в направлениях  $x^1$  и  $x^2$ .

Тогда векторное уравнение

$$\frac{\partial \sqrt{\alpha} \cdot \vec{N}^i}{\partial x^i} + \sqrt{\alpha} q = 0 \quad (19)$$

можно преобразовать к разностному виду, учитывая, что  $\vec{N}^i = N^{ij} \vec{e}_j$  ( $i = 1, 2; j = 1, 2, 3$ ) – векторы внутренних усилий (рис. 1),

$$\begin{aligned} & \left[ \sqrt{a} (N^{11} \vec{e}_1 + N^{12} \vec{e}_2 + \vec{e}_3) \right]_{+0,5;j} - \left[ \sqrt{a} (N^{11} \vec{e}_1 + N^{12} \vec{e}_2 + Q^1 \vec{e}_3) \right]_{-0,5;j} + \\ & + \left[ \sqrt{a} (N^{21} \vec{e}_1 + N^{22} \vec{e}_2 + Q^2 \vec{e}_3) \right]_{i,j+0,5} - \left[ \sqrt{a} (N^{21} \vec{e}_1 + N^{22} \vec{e}_2 + Q^2 \vec{e}_3) \right]_{i,-0,5} + \\ & + \left[ \sqrt{a} (q^1 \vec{e}_1 + q^2 \vec{e}_2 + q^3 \vec{e}_3) \right]_{i,j} = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Выполним усреднение геометрических характеристик  $\sqrt{a}$  и нагрузки в узлах. Проектируя конечно-разностное выражение векторного уравнения равновесия элемента оболочки с центром в узле  $(i, j)$  на векторы взаимного локального базиса в узле  $(i, j)$ , получим

систему трех скалярных уравнений равновесия при  $\alpha = 1, 2, 3$ .

$$\begin{aligned}
 & \frac{(\sqrt{a}_{i+0,5;j+0,5} + \sqrt{a}_{i+0,5;j-0,5})}{2} (N^{11}a_1^{\alpha i,j} + N^{12}a_2^{\alpha i,j} + Q^1 a_3^{\alpha i,j})_{i+0,5;j} - \\
 & - \frac{(\sqrt{a}_{i-0,5;j+0,5} + \sqrt{a}_{i-0,5;j-0,5})}{2} (N^{11}a_1^{\alpha i,j} + N^{12}a_2^{\alpha i,j} + Q^1 a_3^{\alpha i,j})_{i-0,5;j} + \\
 & + \frac{(\sqrt{a}_{i+0,5;j+0,5} + \sqrt{a}_{i-0,5;j+0,5})}{2} (N^{21}a_1^{\alpha i,j} + N^{22}a_2^{\alpha i,j} + Q^2 a_3^{\alpha i,j})_{i;j+0,5} - \\
 & - \frac{(\sqrt{a}_{i+0,5;j-0,5} + \sqrt{a}_{i-0,5;j+0,5})}{2} (N^{21}a_1^{\alpha i,j} + N^{22}a_2^{\alpha i,j} + Q^2 a_3^{\alpha i,j})_{i;j-0,5} + \\
 & + \frac{1}{4} [\sqrt{a}(q^1 a_1^{\alpha i,j} + q^2 a_2^{\alpha i,j} + q^3 a_3^{\alpha i,j})]_{i+0,5;j+0,5} + \frac{1}{4} [\sqrt{a}(q^1 a_1^{\alpha i,j} + q^2 a_2^{\alpha i,j} + q^3 a_3^{\alpha i,j})]_{i+0,5;j-0,5} + \\
 & + \frac{1}{4} [\sqrt{a}(q^1 a_1^{\alpha i,j} + q^2 a_2^{\alpha i,j} + q^3 a_3^{\alpha i,j})]_{i-0,5;j+0,5} + \frac{1}{4} [\sqrt{a}(q^1 a_1^{\alpha i,j} + q^2 a_2^{\alpha i,j} + q^3 a_3^{\alpha i,j})]_{i-0,5;j-0,5},
 \end{aligned} \quad (21)$$

где  $a_{\beta i \pm 0,5; j \pm 0,5}^{\alpha i,j} = \vec{e}_{\beta i \pm 0,5; j \pm 0,5}(\alpha, \beta = 1, 2, 3)$  – коэффициенты преобразования векторных компонент при переходе из локального базиса точки  $i \pm 0,5; j \pm 0,5$  в локальный базис точки  $i, j$ .

Аналогично получаем дискретные выражения для компонент тензоров деформаций. В методе криволинейных сеток формирование уравнений производится путем последовательной подстановки в уравнение равновесия векторных компонент напряжений и перемещений. В этом случае граничные условия удовлетворяются последовательным исключением их нулевых компонент. Подробнее о том, как формируются граничные условия, изложено в работе [7]. В результате, уравнения равновесия и движения оболочки совместно с граничными условиями образуют замкнутую систему уравнений теории оболочек.

На основе предлагаемой численной схемы разработан алгоритм расчета оболочек и пластин на устойчивость и динамику. Программа составлена на языке Turbo Pascal. Решены тестовые задачи по устойчивости и колебаниям пластин и оболочек [7, 9], которые показали хорошее совпадение результатов расчета на основе метода криволинейных сеток с имеющимися решениями, полученными другими методами. Затем решались задачи по собственным и вынужденным колебаниям оболочек и пластин с учетом геометрической нелинейности. В начале исследовались собственные колебания пластин и оболочек при больших прогибах. Построены зависимости «прогиб-частота» для собственных нелинейных колебаний оболочки двойкой кривизны – кривая 1, и для прямоугольной пластины – кривая 2 (рис. 2), при следующих исходных данных:

– для оболочки

$$\begin{aligned}
 E &= 2,1 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2; G = 0,8076 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2; \\
 \nu &= 0,3; \quad \mu = 1,5; \quad k_1 = 20; \quad k_2 = 10; \quad Z = 1,1;
 \end{aligned}$$

– для пластины

$$\begin{aligned}
 E &= 2,1 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2; G = 0,8076 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2; \\
 \nu &= 0,3; \quad \mu = 1,5; \quad k_1 = 0; \quad k_2 = 0; \quad Z = 1,2,
 \end{aligned}$$

где  $\mu = a/b$  – отношение сторон оболочки или пластины в плане;

$k_1, k_2$  – безразмерные параметры кривизн оболочки;

$z$  – отношение конечных толщин.

На рис. 2 принято  $V_0$  – отношение частоты собственных нелинейных колебаний к частоте основного тона малых колебаний.

После этого решались задачи о вынужденных колебаниях оболочки и пластины. Менялась частота возмущающей силы  $\theta$  от нуля в сторону увеличения до резонанса. Дорезонансная зависимость на рис. 2 обозначена кривой  $1'$ . Далее, меняя  $\theta$ , построена послерезонансная кривая  $1''$ . Аналогичные зависимости построены для пластины в виде кривых  $2'$  и  $2''$ .

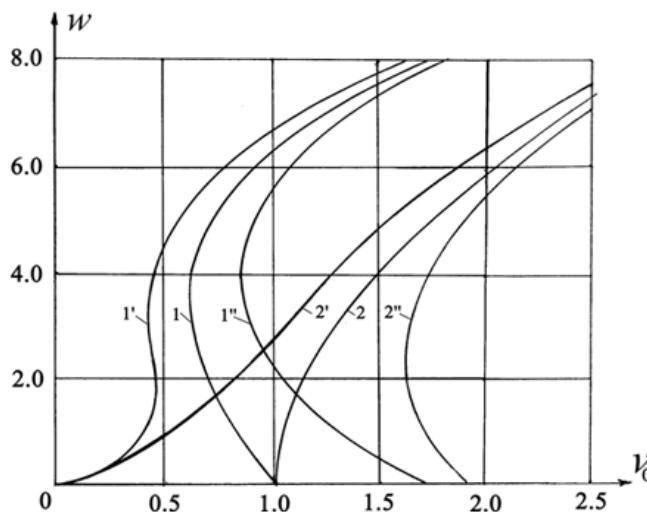


Рис. 2. Резонансные кривые для тонкой оболочки и пластины

Предлагаемая численная схема расчета оболочек и пластин на основе метода криволинейных сеток дает хорошее совпадение результатов с точными решениями, обладает повышенной скоростью сходимости расчетов и может успешно применяться для исследования тонких оболочек и пластин на устойчивость и динамику.

#### Список литературы

- Argyris I.H., Buck K.E., Frid I., Mareczek G. and Scharpt D.W/ Sowe new elewentes for the matrix displacement method. 2 and. Couf. on matrix methods in structural mechanics, Air Force Institute of Technology, Wright - Patterson Base, Ohio, 1968.
- Кантин Дж. Смещения криволинейных конечных элементов как жесткого целого // Ракет.техника и космонавтика. - 1970. - Т.8. - № 7.
- Фрид А. Функции формы и точность криволинейных конечных элементов // Ракет.техника и космонавтика. - 1973. - Т.11. - № 3.
- Жадрасинов Н.Т. Нелинейная деформация составных оболочек. - Алматы: Гылым, 1998.
- Ельмуратов С.К. Построение разрешающих уравнений пологой оболочки в векторной форме/ С.К. Ельмуратов, Н.Т. Жадрасинов// Вестник ПГУ им. С. Торайгырова, серия «Физика и математика». - Павлодар, 2005. - Вып.2.
- Гоцуляк Е.А. Сходимость метода криволинейных сеток в задачах теории оболочек /Е.А. Гоцуляк, В.Н. Ермишев, Н.Т. Жадрасинов //Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1981.- Вып. 39.
- Ельмуратов С.К. Уравнения равновесия и движения тонких пластин и оболочек и их численная реализация // Наука и техника Казахстана. - Павлодар, 2005. - Вып.1.
- Ельмуратов С.К. Расчет тонких оболочек и пластин на устойчивость и динамику// Вестник ПГУ, серия «Физика и математика». - Павлодар, 2005. - Вып.3.
- Ельмуратов С.К. Численное исследование тонких пологих оболочек методом криволинейных сеток/ С.К. Ельмуратов, Н.Т. Жадрасинов//Труды университета. - Караганда, 2005. - Вып. 3.

Получено 10.11.05

УДК 625.855

**Н.А. Мачина, Т.В. Медведева**  
АО «КаздорНИИ», г. Алматы

**АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД  
УЛИЦ ГОРОДА АЛМАТА**

В рамках проведения работ по проектированию капитального ремонта улиц города Алматы специалистами КаздорНИИ было выполнено техническое обследование улиц Каирбекова, Тлендиева, Курмангазы и Жангильдина.

При визуальном обследовании улиц города было отмечено, что наиболее выраженным и чаще всего наблюдаемым дефектом покрытия является наличие частых поперечных трещин, сопровождающихся просадками по ним, которые свидетельствуют о недостаточной прочности существующего покрытия, кромочность, выбоины. Визуальная оценка прочности дорожной одежды и состояния дорожного покрытия была повсеместно оценена баллом II [1].

Интенсивность движения, измеренная на вышеуказанных улицах, соответствует дороге I технической категории или магистральной улице общегородского значения. В составе потока преобладают легковые автомобили (около 84 %); на грузовые автомобили, автобусы, троллейбусы приходится порядка 16 %.

Измерение ровности дорожного покрытия по всем улицам показало высокие значения по толчкомеру ТЭД-2М, соответствующие оценке «неудовлетворительно», согласно требованиям [2] (табл. 1), что ведет к снижению скорости транспортных средств, увеличению времени в пути, экономическим потерям.

Результаты вскрытия дорожной одежды показали ее несоответствие конструктивным требованиям [3], а именно: отсутствие укрепленного верхнего слоя основания из материалов, имеющих более высокий модуль упругости, чем гравийно-песчаная смесь. Наиболее часто встречающаяся конструкция дорожной одежды обследованных улиц представлена, как правило, из нижнего слоя (неукрепленной гравийно-песчаной смеси толщиной от 10 до 50 см) и верхнего слоя (покрытия из асфальтобетона толщиной от 20 до 50 см). На некоторых улицах наблюдается чередование вышеуказанных слоев, представляя собой своеобразный «слоистый пирог» (рис. 1)

Таблица 1. Результаты оценки ровности дорожных покрытий

Расстояние, м	Прямое направление		Оценка	Обратное направление		Оценка
	Отсчет, см/200 м	Время, с		Отсчет, см/200 м	Время, с	
ул. Каирбекова (от ул. Богенбай Батыра до ул. Макатаева)						
200	136	44	неуд.	128	36	неуд.
200	102	33	неуд.	105	28	неуд.
200	156	24	неуд.	144	22	неуд.

200	138	22	неуд.	132	26	неуд.
200	136	28	неуд.	124	25	неуд.
200	77	40	неуд.	69	35	неуд.

Примечание. Данные по оценке ровности на ул. Каирбекова приведены в качестве примера.



Рис. 1. Конструкция дорожной одежды на ул. Каирбекова  
(между ул. Макатаева и ул. Жибек Жолы)

Измеренные значения упругого прогиба и результаты вскрытия показали значительные колебания коэффициента прочности на обследованных участках. Значения упругого прогиба были использованы для расчета фактического модуля упругости дорожной конструкции. Полученные в результате расчетов значения коэффициента прочности на всех участках не удовлетворяют требуемому значению при заданном уровне надежности ( $K_n=0,95$   $K_{np}=1,0$ ) в соответствии с [3].

В результате анализа полученных данных были выполнены расчеты требуемого модуля упругости конструкции согласно [3], который составил 230 МПа. Была запроектирована конструкция, предполагающая фрезерование 15 см существующего слоя асфальтобетона с заделкой отражающих и укладкой слоя основания из черного щебня толщиной 8 см и слоя покрытия из мелкозернистого асфальтобетона толщиной 7 см. Данная конструкция отвечает требованиям по всем параметрам согласно [3].

Таким образом, по результатам обследования технического состояния улиц города Алматы была запроектирована конструкция их усиления.

#### Список литературы

1. ПР РК 218-27-04. Инструкция по диагностике и оценке транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог.
2. ПР РК 218-03-02. Инструкция по оценке ровности дорожных покрытий толчкомером.
3. СН РК 3.03-19-2003. Проектирование дорожных одежд нежесткого типа.
4. ПР РК 218-04-97. Инструкция по учету интенсивности движения транспортного потока на автомобильных дорогах.

Получено 31.11.05

УДК 625.855

**Т.В. Медведева**  
ОАО КаздорНИИ, г. Алматы

**ТРЕБОВАНИЯ К РОВНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ  
ПО МЕЖДУНАРОДНОМУ ИНДЕКСУ РОВНОСТИ IRI**

Ускоренное развитие международных торгово-экономических связей и развитие мировых интеграционных процессов ставит совершенно новые задачи перед мировой транспортно-эксплуатационной системой.

В условиях возрастающих темпов реконструкции и строительства автодорог Республики Казахстан и увеличения транзитного потока иностранных автомобилей по международным маршрутам, очень важно иметь требования к ровности дорожных покрытий, соответствующие международным, тем более, что ровность автодорожного покрытия является одной из наиболее важных технико-эксплуатационных характеристик дороги, которая влияет на эффективность работы автомобильного транспорта, в том числе на скорость движения автомобиля, удобство и безопасность движения, износ шин и основных узлов автомобиля и т.д. Поэтому, решение задач по освоению международных требований к методам и приборам по оценке ровности дорожных покрытий является весьма значимым и своевременным для дорожной отрасли.

В международной практике оценку ровности дорожного покрытия выполняют с использованием специальных лазерных приборов или путем нивелирования поверхности. Распространенным является метод установления корреляционной связи между показанием различных модификаций бампингтеграторов (например, бампингтегратора Farnell, Romdes и др.) и показателем IRI (International Roughness Index) – Международным индексом ровности, представляющим собой сумму вертикальных отклонений фактической поверхности дороги от идеализированной ровной поверхности. Показатель IRI может быть определен с использованием измерительного устройства «Мерлин» (рис. 1), предназначенного для проведения непосредственных измерений ровности дорожных покрытий – отклонений поверхности покрытия от условной прямой или для калибровки других приборов по измерению ровности [1].

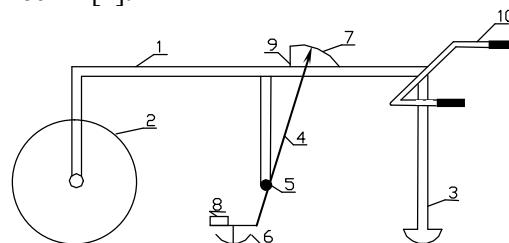


Рис. 1. Общий вид измерительного устройства «Мерлин»: 1 – рама; 2 – колесо; 3 – стойка с кри-

волинейным основанием; 4 – рычаг; 5 – ось; 6 – зонд; 7 – указатель; 8 – груз; 9 – крепление листа; 10 – ручки

Методика производства измерений ровности автодорог и обработка результатов измерений выполняются согласно методическим положениям, освещенным в СТ РК 1219-2003 «Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий» [2].

При подготовке данного стандарта в КаздорНИИ была проведена масштабная работа по установлению корреляционных связей между показаниями казахстанских и зарубежных приборов по измерению ровности дорожных покрытий.

Для получения зависимости показаний толчкомера ТЭД-2М, используемого в Казахстане в качестве базового, и прибором «Мерлин», характеризующим значения Международного индекса ровности IRI, были выбраны участки дорог для обследования с различным состоянием покрытия по показателю ровности. На одних и тех же участках параллельно были проведены замеры ровности покрытия двумя вышеуказанными приборами и получено значительное количество показаний в широком диапазоне неровностей.

По результатам замеров было построено поле корреляции (рис. 2) и составлено уравнение аппроксимирующей связи в виде прямой, описывающей искомую зависимость [2]:

$$IRI = 0,0241 \cdot S + 0,8253, \quad (1)$$

где  $S$  – показания толчкомера ТЭД-2М, см/км.

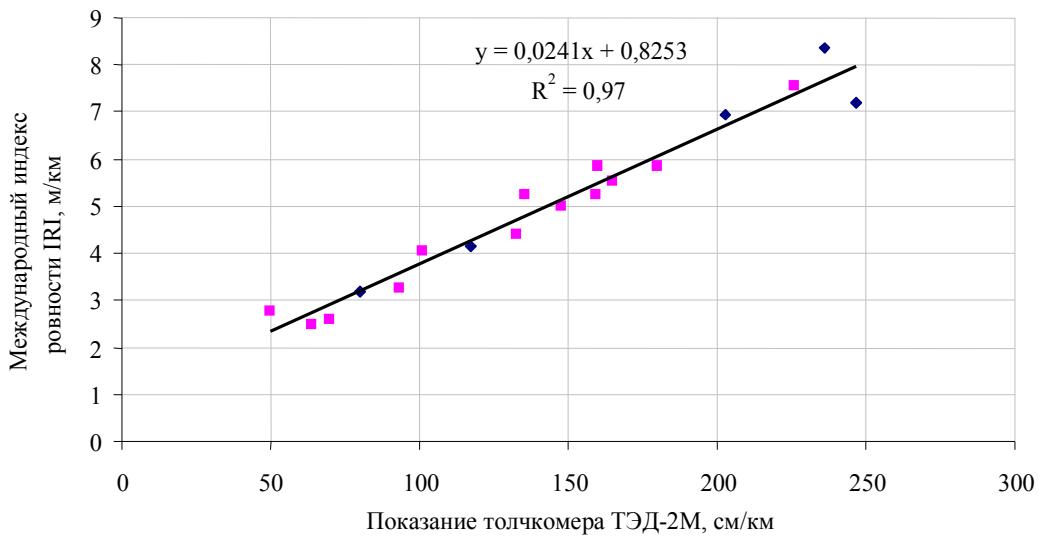


Рис. 2. Корреляционная зависимость Международного индекса ровности IRI от показаний толчкомера ТЭД-2М

Представленное уравнение должно корректироваться для каждого толчкомера на основе калибровочных испытаний с измерительным устройством «Мерлин».

С использованием данной зависимости получены нормы ровности дорожных оснований и покрытий по индексу IRI в период после строительства, реконструкции или капитального ремонта и в период эксплуатации для капитальных, облегченных, переходных и низших типов покрытий в зависимости от интенсивности движения транспорта [2]. В табл. 1 и 2 представлены нормы ровности дорожных покрытий по Международному индексу ровности IRI.

Таблица 1. Нормы ровности дорожных покрытий и оснований по Международному индексу ровности IRI. Оценка в период после строительства, реконструкции или капитального ремонта

Оценка в зависимости от значений Международного индекса ровности IRI, м/км			
1	2	3	4
Отлично	Хорошо	Удовлетворит.	Неудовлетвор.
I. Асфальтобетонные, укладываемые в горячем состоянии и цементобетонные основания и покрытия			
Для дорог I категории			
До 2,0	Св. 2,0 до 2,3	Св. 2,3 до 2,4	Св. 2,4
Для дорог других категорий			
До 2,5	Св. 2,5 до 2,8	Св. 2,8 до 3,0	Св. 3,0
II. Основания и покрытия из черного щебня, холодных асфальтобетонных и дегтебетонных смесей, щебеночных смесей по способу пропитки органическими вяжущими и способом смешения на дороге из крупнообломочных, песчаных и глинистых грунтов и отходов промышленности, укрепленных органическими и неорганическими вяжущими			
Для дорог I, II и III категорий			
До 3,5	Св. 3,5 до 3,8	Св. 3,8 до 4,2	Св. 4,2
Для дорог IV и V категорий			
До 3,8	Св. 3,8 до 4,2	Св. 4,2 до 4,6	Св. 4,6
III. Щебеночные, гравийные и шлаковые основания и покрытия. Основания и покрытия из щебеночных, гравийных и песчаных материалов, обработанных неорганическими вяжущими материалами			
Для дорог I, II и III категорий			
До 5,4	Св. 5,4 до 5,9	Св. 5,9 до 6,4	Св. 6,4
Для дорог IV и V категорий			
До 6,0	Св. 6,0 до 6,7	Св. 6,7 до 7,6	Св. 7,6

Таблица 2.. Нормы ровности дорожных покрытий и оснований по Международному индексу ровности IRI. Оценка в период эксплуатации

Интенсивность движения, авт/сут	Нормы ровности по Международному индексу ровности IRI, м/км			
	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
I. Капитальные типы покрытий				
До 2500	До 3,6	3,6-4,2	4,2-4,7	Св. 4,7
2500-3000	До 3,4	3,4-3,7	3,7-4,1	Св. 4,1
3000-4500	До 3,1	3,1-3,6	3,6-3,8	Св. 3,8
Св. 4500	До 2,6	2,6-3,1	3,1-3,4	Св. 3,4

II. Облегченные типы покрытий				
До 1000	До 4,3	4,3-5,0	5,0-5,6	Св. 5,6
1000-1500	До 4,0	4,0-4,4	4,4-5,0	Св. 5,0
1500-2500	До 3,6	3,6-4,3	4,3-4,8	Св. 4,8
Св. 2500 до 3000	До 3,6	3,6-4,2	4,2-4,7	Св. 4,7
III. Переходные типы покрытий				
1. Грунтовые, укрепленные битумом или эмульсиями				
До 500	До 5,0	5,0-5,9	5,9-6,6	Св. 6,6
500-700	До 4,6	4,6-5,3	5,3-6,0	Св. 6,0
Св. 700 до 1000	До 4,3	4,3-5,0	5,0-5,6	Св. 5,6
окончание табл. 2				
2. Щебеночные, гравийные и шлаковые. Грунтовые, улучшенные минеральными добавками				
До 500	До 6,5	6,5-7,6	7,6-8,7	Св. 8,7
Св. 500 до 1000	До 5,9	5,9-6,7	6,7-7,8	Св. 7,8
IV. Низкие. Грунтовые профилированные				
	До 7,1	7,1-8,3	8,3-9,5	Св. 9,5

Примечания: Интенсивность движения соответствует двум полосам движения.

При трех и более полосах показатель интенсивности движения следует умножить на коэффициент приведения: 2/3, 2/4 и т.д.

Список литературы

1. Красиков О.А. Установление корреляционной зависимости между показанием толчкомера и международным индексом ровности: Сборн. науч. тр./О.А. Красиков, С.Л. Ларичев, З.Э. Рацен. - Иркутск: ИРДУЦ, 1998. - 124 с.
2. Красиков О.А. Инструкция по оценке ровности дорожных покрытий толчкомером ПР РК 218-03-02/О.А.Красиков, Т.В.Медведева, Ф.К.Андрющик, Ю.В.Немченко. - Алматы, 2003.

Получено: 31.11.05

