



УДК 624.074.43:539.3

**С.К. Ельмуратов**

ПГУ им. С.Торайгырова, г. Павлодар

# ВЛИЯНИЕ РЕБЕР ЖЕСТКОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Исследования напряженно-деформированного состояния оболочек сопряжены с большими математическими трудностями поскольку описывающие их уравнения имеют достаточно высокий общий порядок. С усложнением схемы загрузки оболочек, появлением неоднородностей, связанными с усилением ребрами жесткости, трудности расчета резко возрастают. Все отмеченные и другие сложности в большинстве случаев исключают возможность аналитического расчета тонких оболочек. В этом случае на первый план выходят численные методы.

В статье рассматривается цилиндрическая оболочка, подкрепленная ребрами жесткости. Расчет производится методом криволинейных сеток [1÷5], основанном на идее корректной аппроксимации ковариантной производной вектор-функции в криволинейных системах координат. Метод обладает повышенной скоростью сходимости за счет исключения отрицательного влияния эффекта жестких смещений, имеющего место при использовании многих численных методов [6÷7].

Рассмотрим уравнение равновесия оболочки в векторной форме [1,4,5]

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

где  $\vec{N}^i = N^{i\alpha} \cdot \vec{e}_\alpha$  – контравариантный вектор внутренних усилий ( $i = 1, 2; \alpha = 1, 2, 3$ ).

Решение уравнения (1) выполним методом криволинейных сеток. Первое слагаемое уравнения (1) для  $j$ -го узла имеет вид (рис. 1).

$$\begin{aligned} \left( \sqrt{a} \frac{\partial \vec{N}^1}{\partial x^1} \right)_j &= \sqrt{a} \left[ \frac{\partial (N^{1\alpha} \vec{e}_\alpha)}{\partial x^1} \right]_j = \sqrt{a_j} \left( \frac{\partial N^{1\alpha}}{\partial x^1} \vec{e}_\alpha + N^{1\alpha} \frac{\partial \vec{e}_\alpha}{\partial x^1} \right)_j = \\ &= \sqrt{a_j} \left( \frac{\partial N^{1\alpha}}{\partial x^1} \vec{e}_\alpha + N^{1\alpha} \Gamma_{\alpha}^{\kappa} \vec{e}_\kappa \right) = \sqrt{a_j} \left( \frac{\partial N^{1\alpha}}{\partial x^1} \vec{e}_\alpha + N^{1\beta} \Gamma_{\beta 1}^{\gamma} \vec{e}_\gamma - Q^1 c_1^{\gamma} \vec{e}_\gamma + N^{1\gamma} c_{\gamma 1} \vec{e}_3 \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Gamma_{\beta 1}^{\gamma}$  – символы Кристоффеля второго рода;  $c_1^{\gamma}$ ,  $c_{\gamma 1}$  – коэффициенты второй квадратичной формы поверхности, определяемые из выражений

$$\begin{aligned} \Gamma_{\beta 1}^{\gamma} &= \frac{a^{\alpha n}}{2} \left( \frac{\partial a_{\beta n}}{\partial x^m} + \frac{\partial a_{\alpha n}}{\partial x^{\beta}} + \frac{\partial a_{\beta n}}{\partial x^n} \right), \quad c_1^{\gamma} = a^{\gamma \beta} c_{\gamma 1}, \\ c_{\gamma 1} &= - \frac{\partial \vec{e}_3}{\partial x^{\beta}} \vec{e}_m = \frac{\partial \vec{e}_{\beta}}{\partial x^m} \vec{e}_3; \quad (\alpha, \beta, \gamma, m, n = 1, 2). \end{aligned} \quad (3)$$

В уравнении (2) все слагаемые умножим скалярно на  $\bar{e}^i$  в точке  $j$  и получим

$$\left( \sqrt{a} \frac{\partial \bar{N}^1}{\partial x^1} \right)_j \cdot (\bar{e}^i)_j = \sqrt{a}_j \left( \frac{\partial N^{1\alpha}}{\partial x^1} \delta_\alpha^i + N^{1\beta} \Gamma_{\beta 1}^\gamma \delta_\gamma^i - Q^1 c_1^\gamma \delta_\gamma^i + N^{1\gamma} c_{\gamma 1} \delta_3^i \right), \quad (4)$$

где  $\delta_\alpha^i$  - символы Кронекера.

Аналогично распишем второе слагаемое и получим окончательно

$$\left( \sqrt{a} \frac{\partial \bar{N}^2}{\partial x^1} \right)_j \cdot (\bar{e}^i)_j = \sqrt{a}_j \left( \frac{\partial N^{2j}}{\partial x^2} \delta_\alpha^i + N^{2\gamma} \Gamma_{\beta 2}^\gamma \delta_\gamma^i - Q^2 c_{\gamma 1} \delta_\gamma^i + N^{2\gamma} c_1^\gamma \delta_\gamma^i \right). \quad (5)$$

В уравнении (1) третье слагаемое можно представить как полусумму векторов внешних нагрузок  $\bar{q}$ , действующих на смежных разностных интервалах относительно точки  $j$  (рис. 1).

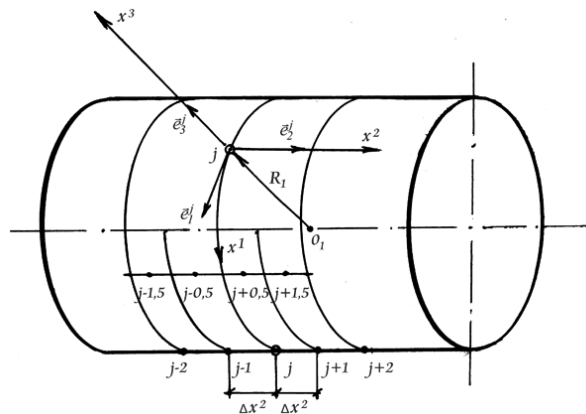


Рис. 1. Геометрия поверхности оболочки со схемой разностных узлов

$$\begin{aligned} (\sqrt{a} \cdot \bar{q})_j \cdot (\bar{e}^i)_j &= \left[ \frac{1}{2} (\sqrt{a}_j q^\alpha \bar{e}_\alpha)_j + \frac{1}{2} (\sqrt{a} q^\alpha \bar{e}_\alpha)_{j-0.5} \right] \cdot (\bar{e}^i)_j = \\ &= \frac{1}{2} (\sqrt{a} q^\alpha)_{j+0.5} \cdot a_{\alpha j+0.5}^{ij} + \frac{1}{2} (\sqrt{a} q^\alpha)_{j-0.5} \cdot a_{\alpha j-0.5}^{ij}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставим полученные выражения для усилий (4), (5) и для внешней нагрузки (6) в уравнение равновесия оболочки (1) и получим

$$\begin{aligned} &\frac{\sqrt{a}_{j+0.5}}{2} \left( \frac{\partial N^{1\alpha}}{\partial x^1} \delta_\alpha^i + N^{1\beta} \Gamma_{\beta 1}^\gamma \delta_\gamma^i - Q^1 c_1^\gamma \delta_\gamma^i + N^{1\gamma} c_{\gamma 1} \delta_3^i \right) + \\ &+ \frac{\sqrt{a}_{j-0.5}}{2} \left( \frac{\partial N^{1\alpha}}{\partial x^1} \delta_\alpha^i + N^{1\beta} \Gamma_{\beta 1}^\gamma \delta_\gamma^i - Q^1 c_1^\gamma \delta_\gamma^i + N^{1\gamma} c_{\gamma 1} \delta_3^i \right) + \\ &+ (\sqrt{a} N^{2\alpha})_{j+0.5} a_{\alpha j+0.5}^{ij} - (\sqrt{a} N^{2\alpha})_{j-0.5} a_{\alpha j-0.5}^{ij} + \\ &+ (\sqrt{a} q^\alpha / 2)_{j+0.5} a_{\alpha j+0.5}^{ij} + (\sqrt{a} q^\alpha / 2)_{j-0.5} a_{\alpha j-0.5}^{ij} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что в оболочках вращения векторы  $\vec{e}_1$  и  $\vec{e}^1$  в любой точке срединной поверхности ортогональны к другим базисным векторам, имеем соотношения:

$$\begin{aligned} (\vec{e}^1 \cdot \vec{e}^2) = (\vec{e}^1 \cdot \vec{e}_2) = (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}^2) = (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2) = (\vec{e}^1 \cdot \vec{e}^3) = (\vec{e}^1 \cdot \vec{e}_3) = (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}^3) = (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_3) = 0, \\ c_{12} = c_{21} = c_2^1 = c_1^2 = 0, \quad \Gamma_{11}^1 = \Gamma_{12}^2 = \Gamma_{21}^2 = \Gamma_{31}^3 = \Gamma_{32}^3 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Придавая индексу  $i$  последовательно значения 1, 2, 3 с учетом формулы Шварца-Кристоффеля

$$\frac{\partial \vec{e}_i}{\partial x^1} = \Gamma_{i1}^\gamma \vec{e}_\gamma; \quad \frac{\partial \vec{e}^i}{\partial x^1} = -\Gamma_{\gamma 1}^i \vec{e}^\gamma, \quad (9)$$

получим систему трех скалярных разностных уравнений для цилиндрических оболочек вращения

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} (\sqrt{a_{j+0,5}} + \sqrt{a_{j-0,5}}) \cdot (\partial N^{11} / \partial x^1 + \Gamma_{12}^1 N^{12} - c_1^1 Q^1) + (\sqrt{a} N^{21})_{j+0,5} a_{1j+0,5}^{1j} - \\ & - (\sqrt{a} N^{21})_{j-0,5} a_{1j-0,5}^{1j} + \frac{1}{2} \left[ (\sqrt{a} q^1)_{j+0,5} a_{1j+0,5}^{1j} + (\sqrt{a} q^1)_{j-0,5} a_{1j-0,5}^{1j} \right] = 0 \\ & \frac{1}{2} (\sqrt{a_{j+0,5}} + \sqrt{a_{j-0,5}}) \cdot (\partial N^{12} / \partial x^1 + \Gamma_{12}^2 N^{11}) + (\sqrt{a} N^{22})_{j+0,5} a_{2j+0,5}^{2j} - \\ & - (\sqrt{a} N^{22})_{j-0,5} a_{2j-0,5}^{2j} + (\sqrt{a} Q^2)_{j+0,5} a_{3j+0,5}^{2j} - (\sqrt{a} Q^2)_{j-0,5} a_{3j-0,5}^{2j} + \\ & + \frac{1}{2} \left[ \sqrt{a_{j+0,5}} (q_{j+0,5}^2 a_{2j+0,5}^{2j} + q_{j+0,5}^3 a_{3j+0,5}^{2j}) + \sqrt{a_{j-0,5}} (q_{j-0,5}^2 a_{2j-0,5}^{2j} + q_{j-0,5}^3 a_{3j-0,5}^{2j}) \right] = 0 \\ & 1/2 (\sqrt{a_{j+0,5}} + \sqrt{a_{j-0,5}}) \cdot (\partial Q^1 / \partial x^1 + c_{11} N^{11}) + (\sqrt{a} N^{22})_{j+0,5} a_{2j+0,5}^{3j} - \\ & - (\sqrt{a} N^{22})_{j-0,5} a_{2j-0,5}^{3j} + (\sqrt{a} Q^2)_{j+0,5} a_{3j+0,5}^{3j} - (\sqrt{a} Q^2)_{j-0,5} a_{3j-0,5}^{3j} + \\ & + \frac{1}{2} \left[ \sqrt{a_{j+0,5}} (q_{j+0,5}^2 a_{2j+0,5}^{3j} + q_{j+0,5}^3 a_{3j+0,5}^{3j}) + \sqrt{a_{j-0,5}} (q_{j-0,5}^2 a_{2j-0,5}^{3j} + q_{j-0,5}^3 a_{3j-0,5}^{3j}) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

В результате получены уравнения равновесия для цилиндрической замкнутой оболочки в дискретной форме на основе метода криволинейных сеток.

Исследуем цилиндрическую оболочку, которая имеет ребра жесткости по направлению координатных осей  $x^1, x^2$ . Уравнения равновесия оболочки (10) дополним компонентами, которые характеризуют внутренние усилия в ребрах, а выражения для перерезывающих сил – величинами, характеризующими моменты ребер жесткости. Тогда функции напряжений для ребер жесткости можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \sigma^{\alpha\beta} = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \left[ \nu a^{\alpha\beta} \varepsilon_{\gamma\omega} + (1-\nu) a^{\alpha\gamma} a^{\beta\omega} \varepsilon_{\gamma\omega} \right] + \right. \\ \left. + Z \left[ \nu a^{\alpha\beta} a^{\gamma\omega} \mu_{\gamma\omega} + (1-\nu) a^{\alpha\gamma} a^{\beta\omega} \mu_{\gamma\omega} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Проинтегрируем выражение (11) по высоте ребер  $h_{p1}$ , получим выражения для ребер, расположенных вдоль координатной оси  $x^1$

$$\begin{aligned}
N_{p1}^{11} &= \int_{f_{p1}-\frac{h_{p1}}{2}}^{f_{p1}+\frac{h_{p1}}{2}} c_{p1} \sigma_{p1}^{11} dz; & N_{p1}^{12} &= \int_{f_{p1}-\frac{h_{p1}}{2}}^{f_{p1}+\frac{h_{p1}}{2}} c_{p1} \sigma_{p1}^{12} dz; \\
M_{p1}^{11} &= \int_{f_{p1}-\frac{h_{p1}}{2}}^{f_{p1}+\frac{h_{p1}}{2}} c_{p1} \sigma_{p1}^{11} z dz; & M_{p1}^{12} &= \int_{f_{p1}-\frac{h_{p1}}{2}}^{f_{p1}+\frac{h_{p1}}{2}} c_{p1} \sigma_{p1}^{12} z dz,
\end{aligned} \quad (12)$$

где  $N_{p1}^{1\alpha}$ ,  $M_{p1}^{1\alpha}$  – внутренние усилия и моменты в ребрах, расположенных по направлению координатной оси  $x^1$ ;  $f_{p1}$ ,  $h_{p1}$ ,  $c_{p1}$  – эксцентриситет, высота и ширина сечения ребра;  $\sigma_{p1}^{1\alpha}$  – напряжения в рассматриваемых ребрах.

Принято, что ребра, расположенные по направлению координатной оси  $x^1$ , имеют индексы  $p1$  и называются поперечными (кольцевыми). Ребра, расположенные вдоль координатной оси  $x^2$ , имеют индексы  $p2$  и называются продольными (меридианальными). Продольные ребра жесткости имеют особое значение при исследовании устойчивости центрально-сжатой оболочки, так как в этом случае именно они будут воспринимать значительную часть сжимающей нагрузки.

Интегрируя выражение (11) по высоте ребер  $h_{p2}$ , расположенных вдоль координатной оси  $x^2$ , получим

$$\begin{aligned}
N_{p2}^{22} &= \int_{f_{p2}-\frac{h_{p2}}{2}}^{f_{p2}+\frac{h_{p2}}{2}} c_{p2} \sigma_{p2}^{11} dz, & N_{p2}^{21} &= \int_{f_{p2}-\frac{h_{p2}}{2}}^{f_{p2}+\frac{h_{p2}}{2}} c_{p2} \sigma_{p2}^{21} dz, \\
M_{p2}^{22} &= \int_{f_{p2}-\frac{h_{p2}}{2}}^{f_{p2}+\frac{h_{p2}}{2}} c_{p2} \sigma_{p2}^{22} z dz, & M_{p2}^{21} &= \int_{f_{p2}-\frac{h_{p2}}{2}}^{f_{p2}+\frac{h_{p2}}{2}} c_{p2} \sigma_{p2}^{21} z dz,
\end{aligned} \quad (13)$$

где  $N_{p2}^{2\alpha}$ ,  $M_{p2}^{2\alpha}$  – внутренние усилия и моменты в ребрах, расположенных вдоль координатной оси  $x^2$ ;  $f_{p2}$ ,  $h_{p2}$ ,  $c_{p2}$  – эксцентриситет, высота и ширина сечения ребра;  $\sigma_{p2}^{2\alpha}$  – напряжения в рассматриваемых ребрах.

В продольных ребрах напряжения определим из выражений

$$\begin{aligned}
\sigma_{p1}^{11} &= E_{p1} (a^{11} a^{11} \varepsilon_{11} + a^{11} a^{22} \varepsilon_{12} + z a^{11} a^{11} \mu_{11} + z a^{11} a^{12} \mu_{12}) \\
\sigma_{p1}^{12} &= E_{p1} (a^{11} a^{21} \varepsilon_{11} + a^{11} a^{22} \varepsilon_{12} + z a^{11} a^{21} \mu_{11} + z a^{11} a^{22} \mu_{12}),
\end{aligned} \quad (14)$$

где  $E_{p1}$  – модуль упругости материала ребер.

Подставим (14) в (12) и, проинтегрировав по высоте ребер, получим выражения внутренних усилий и моментов в поперечных ребрах цилиндрической оболочки

$$\begin{aligned} N_{p1}^{11} &= E_{p1} A_{p1} a^{11} (a^{11} \varepsilon_{11} + a^{12} \varepsilon_{12} + a^{11} f_{p1} \mu_{11} + a^{12} f_{p1} \mu_{12}), \\ N_{p1}^{12} &= E_{p1} A_{p1} a^{11} (a^{21} \varepsilon_{11} + a^{22} \varepsilon_{12} + a^{21} f_{p1} \mu_{11} + a^{22} f_{p1} \mu_{12}), \\ M_{p1}^{11} &= E_{p1} a^{11} [A_{p1} f_{p1} (a^{11} \varepsilon_{11} + a^{12} \varepsilon_{12}) + A_{p1} f_{p1}^2 (a^{11} \mu_{11} + a^{12} \mu_{12}) + J_{p1} (a^{11} \mu_{11} + a^{12} \mu_{12})], \\ M_{p1}^{12} &= E_{p1} a^{11} [A_{p1} f_{p1} (a^{21} \varepsilon_{11} + a^{22} \varepsilon_{12}) + A_{p1} f_{p1}^2 (a^{11} \mu_{11} + a^{12} \mu_{12}) + J_{p1} (a^{11} \mu_{11} + a^{12} \mu_{12})]. \end{aligned} \quad (15)$$

где  $A_{p1}$  – площадь поперечного сечения ребра;  $J_{p1}$  – момент инерции сечения ребра относительно собственной нейтральной оси поперечного ребра.

В продольных ребрах напряжения будем определять из выражений

$$\begin{aligned} \sigma_{p2}^{11} &= E_{p2} a^{22} [a^{21} \varepsilon_{21} + a^{22} \varepsilon_{22} + 2(a^{21} \mu_{21} + a^{22} \mu_{22})], \\ \sigma_{p2}^{12} &= E_{p2} a^{22} [a^{11} \varepsilon_{21} + a^{12} \varepsilon_{22} + 2(a^{11} \mu_{21} + a^{12} \mu_{22})]. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя выражения для напряжений (16) в формулы (13) и интегрируя, получим выражения внутренних усилий и моментов в продольных ребрах жесткости

$$\begin{aligned} N_{p2}^{11} &= E_{p2} A_{p2} a^{22} (a^{21} \varepsilon_{21} + a^{22} \varepsilon_{22} + a^{21} f_{p2} \mu_{21} + a^{22} f_{p2} \mu_{22}), \\ N_{p2}^{12} &= E_{p2} A_{p2} a^{22} (a^{11} \varepsilon_{21} + a^{12} \varepsilon_{22} + a^{12} f_{p2} \mu_{21} + a^{12} f_{p2} \mu_{22}), \\ M_{p2}^{11} &= E_{p2} a^{22} [A_{p2} f_{p2} (a^{21} \varepsilon_{21} + a^{22} \varepsilon_{22}) + A_{p2} f_{p2}^2 (a^{21} \mu_{21} + a^{22} \mu_{22}) + J_{p2} (a^{21} \mu_{21} + a^{22} \mu_{22})], \\ M_{p2}^{12} &= E_{p2} a^{22} [A_{p2} f_{p2} (a^{11} \varepsilon_{21} + a^{12} \varepsilon_{22}) + \\ &+ A_{p2} f_{p2}^2 (a^{11} \mu_{21} + a^{12} \mu_{22}) + J_{p2} (a^{11} \mu_{21} + a^{12} \mu_{22})]. \end{aligned} \quad (17)$$

Для расчета подкрепленных цилиндрических оболочек с ребрами жесткости составлена программа на ЭВМ, позволяющая менять физико-механические и геометрические характеристики оболочки и ребер жесткости в широком диапазоне значений. Примем ряд параметров, определяющих степень усиления оболочки ребрами, типы сечений ребер и их геометрические характеристики

$$\lambda_{1i} = G_{pi} / G_o, \quad \lambda_2 = A_{p1} / A_{p2}, \quad \lambda_{3i} = h_i / b_i, \quad \lambda_4 = l_1 / l_2,$$

где  $G_{pi}$ ,  $G_o$  – вес ребер и гладкой оболочки;  $A_{p1}$ ,  $A_{p2}$  – площади поперечных сечений ребер в направлении соответствующих осей;  $h_i$ ,  $b_i$ ,  $l_i$  – высота, ширина и длина ребер ( $i = 1, 2$ ); отношение критического параметра  $K$  подкрепленной оболочки к соответствующему параметру гладкой оболочки  $K_{кр}$  обозначим  $\eta = K / K_{кр}$ .

Одной из важных проблем при проектировании подкрепленных оболочек является схема расположения ребер жесткости по поверхности оболочки. Рассмотрим поведение цилиндрической оболочки при различном расположении продольных и поперечных ребер жесткости. Примем, что оболочка сжата вдоль образующей равномерно распределенной нагрузкой. По торцам оболочка усилена диафрагмами, работающими жестко в плоскости торца оболочки и гибко из плоскости, тем самым обеспечивая шарнирное закрепление по торцам. Будем исследовать влияние поперечных и продольных ребер на устойчивость цилиндрической оболочки. Примем длину продольных ребер « $v$ », равной длине поперечных, то есть длине окружности  $2\pi R_1$ . Тогда ширина оболочки « $c$ » должна быть

равна  $c = 2R_1 = b/\pi$ . Сечения всех ребер примем одинаковыми.

На первом этапе будем усиливать оболочку только поперечными ребрами, поэтапно добавляя по два ребра жесткости, доведя общее число ребер до восьми ( $n_k=8$ ). Построим график изменения параметра критической нагрузки при увеличении числа поперечных ребер. На рис. 2 он представлен в виде кривой 1. Ребра жесткости в этом случае мало влияют на устойчивость цилиндрической оболочки.

На втором этапе будем усиливать оболочку только продольными ребрами жесткости. Как и в первом случае, ребра жесткости будем добавлять попарно. Отметим, что и продольные и поперечные ребра одинаковы по длине, размерам сечения и весу. Таким образом, по расходу материала имеем равнозначные варианты. Однако во втором случае зависимость критического параметра подкрепленной оболочки от числа ребер жесткости значительно более существенная. Продольные ребра ведут к резкому увеличению критического параметра. На рис. 2 график зависимости параметра  $\eta$  от числа продольных ребер  $n_m$  отражен кривой 2.

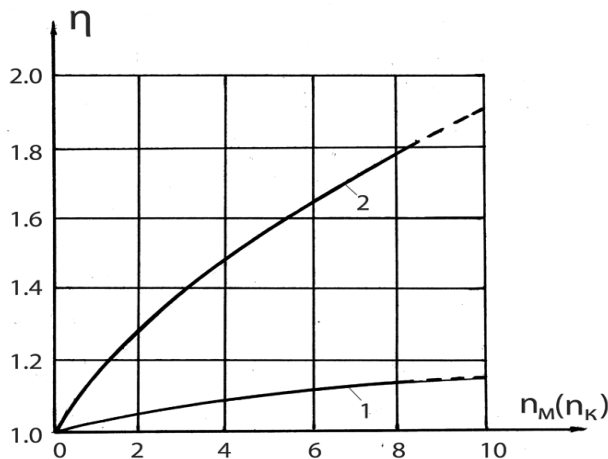


Рис. 2. Зависимость критического параметра от схемы расположения ребер жесткости

Следовательно, схема расположения ребер жесткости существенно влияет на устойчивость подкрепленной оболочки и в каждом конкретном случае зависит от схемы загрузки оболочки внешними нагрузками и условий опирания.

#### Список литературы

1. Ельмуратов С.К. Уравнения равновесия и движения тонких пластин и оболочек и их численная реализация // Наука и техника Казахстана. -Павлодар, 2005.-№ 1.-С.24-33.
2. Ельмуратов С.К., Жадрасинов Н.Т. Численное исследование тонких пологих оболочек методом криволинейных сеток//Труды университета. - Караганда, 2005. - № 3. - С. 43-47.
3. Жадрасинов Н.Т. Нелинейная деформация составных оболочек. - Алматы: Ғылым, 1998.-174 с.
4. Ельмуратов С.К. Расчет тонких оболочек и пластин на устойчивость и динамику // Вестник ПГУ. - Павлодар, 2005. - № 3.- С.43-51
5. Ельмуратов С.К. Исследование устойчивости и колебаний тонких оболочек и пластин //Поиск. Серия естественных и технических наук. - Алматы, 2005. - № 4.- С.312-317.
6. Кантин Дж. Смещения криволинейных конечных элементов как жесткого целого // Ракет.

- техника и космонавтика. – 1970. – Т.8. – № 7. – С.84-88  
7. Фрид А. Функции формы и точность криволинейных конечных элементов // Ракет. техника и космонавтика. – 1973. – Т.11. – № 3. – С. 40-46.

Получено 26.04.06.

УДК 631.432: 536.246

**А.К. Кыялбаев**

Комитет развития транспортной инфраструктуры Министерства транспорта и коммуникаций Республики Казахстан, г. Астана

**Н.С. Сайлаубекова**

Государственный университет им. Коркыт Ата, г. Кызылорда

**С.Н. Кыялбай**

Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М.Тынышпаева, г. Алматы

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЯХ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

Дороги в сильной степени отличаются от подавляющего большинства других строительных сооружений. В конструктивном отношении они характеризуются чрезвычайной протяженностью, приближенностью к естественному рельефу, малой массивностью («тонкостенностью») основного конструктивного элемента – дорожного покрытия и развитой его поверхностью, контактирующей в равной мере с двумя разнородными средами – наружным воздухом и подстилающим грунтом.

Грамотное проектирование дорог невозможно без учета климатических особенностей данной местности, региона. В настоящее время городские территории представляют собой сплошные покрытия асфальтобетонных дорог, площадей и кровель зданий, которые в жаркий период времени воспринимают большое количество тепловой энергии и постепенно выделяют его в окружающую среду. Это приводит к появлению в черте города обширного теплового пояса, который также влияет на тепловые процессы внутри дорожного покрытия.

Передача теплоты теплопроводностью связана с наличием разности температур тела. Теплопроводность определяется тепловым движением микрочастиц тела – хаотическим тепловым движением молекул. Совокупность значений температур всех точек тела в данный момент времени называется температурным полем. Геометрическое место точек, имеющих одинаковую температуру, называется изотермической поверхностью [1,2,3]. Согласно закону Фурье, количество теплоты  $d^2Q_\tau$ , проходящее через элемент изотермической поверхности  $dF$  за промежуток времени  $d\tau$ , пропорционально температурному

градиенту  $\frac{\partial t}{\partial n}$  :

$$d^2 Q_{\tau} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau . \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности (знак минус указывает на то, что теплота передается в направлении уменьшения температуры).

Количество теплоты, прошедшее в единицу времени через единицу изотермной поверхности, называется плотностью теплового потока:

$$q = \frac{d^2 Q_{\tau}}{dF d\tau} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda \text{grad} t . \quad (2)$$

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через изотермную поверхность  $F$ , называется тепловым потоком:

$$Q = \int_F q dF = - \int_F \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF . \quad (3)$$

Из (1) коэффициент теплопроводности определяется

$$\lambda = - \frac{d^2 Q_{\tau}}{\frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau} \quad (4)$$

и является физическим параметром вещества, характеризующим его способность проводить теплоту.

Передача теплоты в конструктивные слои дорожной одежды происходит от нагретого воздуха над поверхностью покрытия за счет солнечной радиации. А значит, этот процесс надо рассматривать как передачу теплоты от подвижной среды (воздух) через твердую поверхность (асфальтобетонное покрытие), которая называется теплопередачей.

В инженерных расчетах чаще всего рассматривается теплопередача от одной подвижной среды к другой через разделяющую их твердую многослойную поверхность. При этом задаются температуры сред  $t_{ж1}$  и  $t_{ж2}$  и их коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Так как дорожная одежда состоит из конструктивных слоев, то ее можно рассматривать как многослойную поверхность, состоящую из  $n$  слоев. Коэффициент теплопроводности каждого слоя обозначим  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ , толщины слоев, соответственно –  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ . Примем, что контакт между слоями совершенный, тогда температура на соприкасающихся поверхностях двух слоев будет одинакова.

В этом случае, согласно закону Фурье, общее количество теплоты, которое передается в процессе теплопередачи через единицу поверхности  $F$  за время  $\tau$ , определяется

$$Q_{\tau} = k(t_{ж1} - t_{ж2})F\tau . \quad (5)$$

Величина  $k$  называется коэффициентом теплопередачи, который выражает количество теплоты, проходящее через единицу площади поверхности за единицу времени при разности температур между горячей и холодной средой в  $1^{\circ}\text{C}$ . Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется полным термическим сопротивлением теплопередачи

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} . \quad (6)$$

Чем меньше сопротивление  $R$ , тем интенсивнее процесс теплопередачи, и наоборот, чем больше сопротивление, тем менее интенсивен процесс теплопередачи.

Температурное поле может быть стационарным или нестационарным. Если с течением времени температура тела не изменяется, то температурное поле называется стационар-



ным. Если температура тела с течением времени изменяется, то такое температурное поле называется нестационарным.

Как было указано выше, нагрев дорожного покрытия происходит от солнечной радиации, а значит, температура покрытия с течением времени изменяется, причем носит периодический характер. Рассмотрим периодический тепловой процесс покрытия дорожной одежды.

Обычно температура на поверхности дорожного покрытия  $T_n$  ( $z=0$ ) изменяется по гармоническому закону [2]:

$$\vartheta_n = T_n - \bar{T} = \vartheta_0 \cos(\omega\tau), \quad (7)$$

где  $\bar{T}$  – среднее значение температуры поверхности;  $\vartheta_0$  – амплитуда колебаний;  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота колебания температуры;  $f$  – количество колебаний в единицу времени.

Если подобные колебания продолжаются достаточно долго, то влияние начального распределения температуры на ход процесса исчезает и в слоях устанавливается квазистационарное состояние, при котором температура в каждой точке совершает гармонические колебания около неизменного значения  $\bar{T}$ . Распределение температуры в этом случае имеет вид:

$$\theta = \vartheta / \vartheta_0 = \cos(\omega\tau - z\sqrt{\omega/2a}) \exp(-z\sqrt{\omega/2a}), \quad (8)$$

где  $\vartheta = T(z, \tau) - \bar{T}$ ;  $T(z, \tau)$  – температура на расстоянии  $z$  от поверхности тела в момент времени  $\tau$ ;  $a$  – температуропроводность материала тела.

Амплитуда колебаний  $\vartheta_0 \exp(-z\sqrt{\omega/2a})$  быстро уменьшается с ростом  $z$  и на расстоянии, равном одной длине волны  $\ell = 2\pi\sqrt{2\frac{a}{\omega}}$ , составляет менее 0,2 %  $\vartheta_0$ . Поэтому решение (8) можно с достаточной точностью использовать для определения температуры в конструктивных слоях дорожной одежды.

Наряду с амплитудой изменяется и фаза колебаний температуры. В точках с координатой  $z$  момент, когда температура принимает свое среднее значение  $\bar{T}$ , наступает позднее, чем на поверхности, на  $\Delta\tau = z / \sqrt{2a\omega}$ .

Скорость распространения тепловой волны  $u$  рассчитывается как  $u = z / \Delta\tau = \sqrt{2a\omega}$ .

Плотность теплового потока  $q_{z=0}$  на поверхности дорожного покрытия

$$q_{z=0} = \lambda \vartheta_0 \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right). \quad (9)$$

Колебания амплитуды температуры  $\vartheta_0$  отстают по фазе на  $\pi/4$  от колебания плотности теплового потока  $q_{z=0}$ .

Если сравнить полученные результаты теоретических исследований температурного поля воздушной массы над дорожным покрытием в зависимости от скорости ветра, то можно сделать вывод, что с увеличением скорости ветра уменьшается температурный пограничный слой. Результат этого анализа показан на рис. 1.

Для теоретического исследования изменения температуры воздуха над покрытием с течением времени на различной высоте была использована эмпирическая формула для нахождения числа Нуссельта:

$$Nu = 0,66 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,3} (Pr/Pr_c)^{0,25}. \quad (10)$$

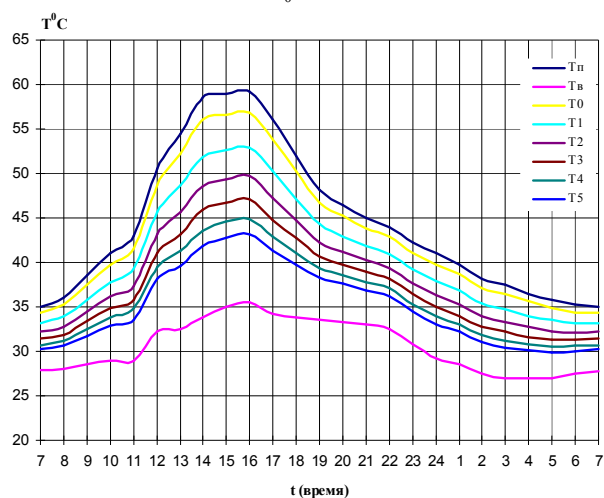
Причем настоящая формула может быть использована только при небольших скоростях движения воздуха (скорость ветра не должна превышать 4-5 м/с), так как при больших скоростях результаты расчета будут с большой погрешностью.

Для определения температуры при данной скорости набегающего потока необходимо определить число Нуссельта,  $Nu$ . При помощи числа  $Nu$  определим коэффициент теплоотдачи из формулы  $Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda}$  и, подставив в уравнение (10), получим:

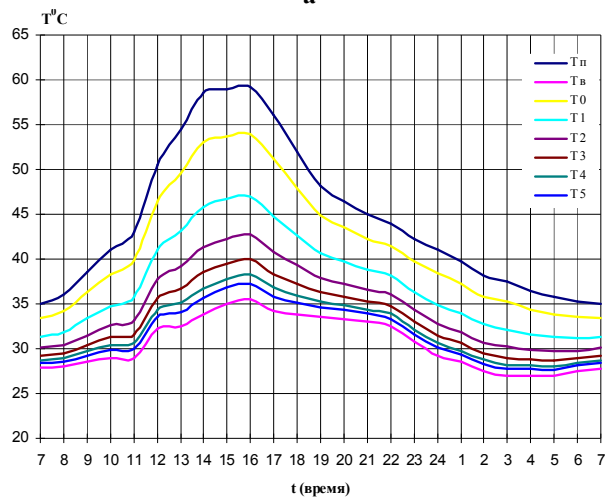
$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{l_0} = \frac{\lambda}{v} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (11)$$

или

$$dT = \frac{Nu v}{l_0} dz. \quad (12)$$



а



б

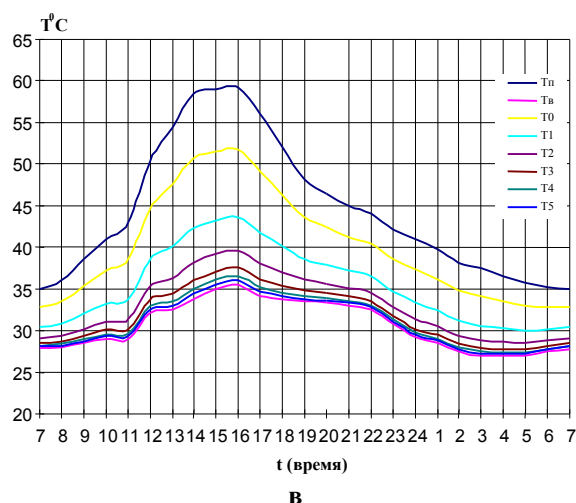


Рис. 1. Результаты теоретических исследований температурного поля воздушной массы над асфальтобетонной поверхностью при скорости ветра: а - 0,1 м/с; б - 0,5 м/с; в - 1 м/с.

Если сравнить полученные результаты теоретических исследований температурного поля воздушной массы над дорожным покрытием в зависимости от скорости ветра, то можно сделать вывод, что с увеличением скорости ветра уменьшается температурный погранслои.

При заданном коэффициенте пропускания света атмосферой  $t_a$ , который зависит от высоты стояния солнца и прозрачности воздуха  $P$ , освещенность от солнца на горизонтальной поверхности  $E_c^{\Gamma}$  определяется по формуле

$$E_c^{\Gamma} = \frac{E_c^o}{\Delta^2} \cdot P^m \cdot \sin h_0, \quad (13)$$

где  $\Delta$  – расстояние от солнца в заданный момент, определяется по астрономическим таблицам;  $P$  – прозрачность воздуха: при отличной видимости – 0,9, хорошей – 0,8, плохой – 0,7 и в больших промышленных городах – 0,6;  $m$  – воздушная масса, которую необходимо преодолеть солнечным лучам при прохождении через атмосферу;  $h_0$  – высота стояния солнца.

Значения  $m$  изменяются в зависимости от высоты стояния солнца и определяются из табл. 1.

Таблица 1. Значения  $m$  в зависимости от высоты стояния солнца

| Высота стояния солнца | 0°   | 5°   | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80°   | 90° |
|-----------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|
| Значения $m$          | 26,9 | 10,4 | 5,6 | 3,2 | 2   | 1,6 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,015 | 1   |

Сумма тепла в ккал/м<sup>2</sup>, поступающего в июне при безоблачном небе от солнечной прямой радиации, приведена в табл. 2.

Таблица 2. Количество тепла, поступающего в июне

| Географическая широта, град | 38   | 40   | 45   | 50   | 55   | 60   | 65   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| за сутки                    | 5940 | 5890 | 5800 | 5760 | 5790 | 5860 | 6035 |

|                     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| максимальная за час | 711 | 705 | 665 | 645 | 608 | 579 | 540 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

Итак, механизм передачи тепла от конструктивных слоев дорожной одежды обусловлен движением микроструктурных элементов тела и зависит от физических свойств их материалов. В воздушной среде (над покрытием) перенос энергии осуществляется за счет хаотичного молекулярного движения, диффузии молекул, интенсивность которой пропорциональна температуре, а также путем перемещения в пространстве неравномерно нагретых объемов среды. При этом главным источником тепла, передаваемого в конструктивные слои дорожной одежды, является солнечная энергия и отработавшие газы от движущихся транспортных средств. Причем в притрассовой зоне с увеличением скорости движения транспортных средств повышается активность кинетической энергии в атомах воздуха, что приводит к изменению теплового баланса в городской среде.

#### Список литературы

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
2. Литвинов А.М. Теоретические основы теплотехники. – М.: Энергия, 1964. – 367 с.
3. Попова В.В. Материалы для теплоизоляционных и гидроизоляционных работ. – М.: Высшая школа, 1988. – 151 с.

Получено 16.05.06.

УДК 72036: 725.218 (574.51)

#### С.Г. Космериди

Казахская головная архитектурно-строительная академия, г. Алматы

#### ПОИСКИ СОВЕТСКИХ АРХИТЕКТОРОВ ПО ОРГАНИЗАЦИИ БЫТОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В 1920-1960-х гг.

Советская власть поставила перед архитекторами задачу создания нового в социальном отношении типа жилища, поиски которого велись еще, начиная в процессе становления социалистического быта.

20 августа 1918 г. Президиум ВЦИК издал Декрет «Об отмене частной собственности на недвижимость в городах». В распоряжение местных Советов перешли все наиболее ценные жилые строения. Началось массовое переселение рабочих из лачуг и подвалов в дома, конфискованные у буржуазии. В Москве в благоустроенные квартиры было переселено в 1918-1924 гг. почти 500 тыс. человек, в Петрограде – 300 тыс.

Массовое переселение рабочих в дома буржуазии сопровождалось процессом стихийного возникновения бытовых коммун, которые преследовали как социально-политические, так и чисто хозяйственные цели. Бывшие доходные дома рассматривались как рабочие жилища нового типа, в которых хозяйственный уклад и организация быта должны были способствовать развитию коллективистских навыков у населения, воспитывать коммунистическое сознание. Получив жилище в бесплатное пользование (до введения НЭПа рабочие пользовались жилищем бесплатно), рабочие создали в каждом доме органы самоуправления, которые не только ведали эксплуатацией здания, но и организовывали такие домовые коммунальные учреждения, как общие кухни-столовые, детские сады, ясли, красные уголки, библиотеки-читальни, прачечные и т.д. Эта форма коллективного содержания рабочими жилых домов (на началах самообслуживания) была широко распространена в первые годы Советской власти. Например, в Москве к концу 1921 г.

насчитывалось 865 домов-коммун, в Харькове в 1922-1925 гг. было 242 дома-коммуны. Однако даже в годы наибольшего подъема движения за организацию в национализированных жилищах рабочих домов-коммун коммунальные формы быта в них развивались крайне медленно. Причину такого положения видели тогда прежде всего в том, что старые типы домов не соответствовали новым формам быта. Считалось, что проблема перестройки быта будет решена путем строительства специально разработанных новых типов жилого дома (с общественными помещениями).

При этом не было единой точки зрения на сам архитектурно-планировочный тип нового жилища: одни предлагали ориентироваться на рабочий поселок-коммуну (состоящий из индивидуальных домов и сети общественных зданий), другие главную роль отводили комплексным домам-коммунам с обобществлением быта, третьи считали необходимым разработать переходный тип дома, который способствовал бы постепенному внедрению в быт новых форм.

Возникшие в национализированных жилищах рабочие дома-коммуны явились базой для социального заказа на разработку нового типа жилого дома, они сыграли роль экспериментальной площадки, где рождались и проверялись новые формы быта. Здесь возникли и получили широкое распространение создаваемые на началах самообслуживания своеобразные зародыши развившейся в будущем системы коммунально-бытового обслуживания. Прежде всего это те элементы коммунально-бытовых и культурно-общественных учреждений, которые были связаны с решением таких важнейших социально-политических задач, как раскрепощение женщин от домашнего хозяйства с целью вовлечения ее в производство и общественную жизнь (столовые, общие кухни, прачечные, детские сады и ясли и т.д.) и осуществление культурной революции (библиотеки-читальни, красные уголки и т.д.).

В первой половине 20-х гг. XX в. в процессе изучения опыта рабочих домов-коммун вырабатывалась программа нового типа жилища, создавались первые проекты домов-коммун (экспериментальные и конкурсные).

Дома-коммуны проектировались в середине 20-х гг. XX в. и для других городов. Часть из них была осуществлена. Однако острая жилищная нужда приводила к тому, что эти дома заселялись с нарушением предусмотренного программой режима их эксплуатации (коммунальные учреждения не работали, общественные помещения отводились под жилье, предназначенные для одиноких и малосемейных, корпуса заселялись семьями с детьми и т.д.), что создавало неудобства и вызывало резкую критику самого типа дома-коммуны.

В процессе строительства новых жилищ отмирали одни и рождались другие элементы организации быта. Переход к НЭПу и к хозяйственной самоокупаемости городских жилых домов (введение квартплаты) привел к существенным изменениям в самой экономической основе функционирования рабочих домов-коммун. Основанная на бесплатной эксплуатации дома и полном самообслуживании бытовая коммуна уступала место новой форме бытового коллектива – жилой кооперации с долевым участием членов в финансировании строительства и эксплуатации дома.

В первые годы Советской власти дом-коммуна противопоставлялся как основной тип рабочего жилища многоквартирному дому с участком, разработка которого началась после Октябрьской революции.

Стремясь сделать малоэтажное жилище более экономичным и в то же время сохранить ха-

рактир усадебной застройки (вход в каждую квартиру непосредственно с улицы, озелененный участок каждой семье), архитекторы в начале 20-х гг. XX в. создают большое количество различных вариантов двух-, четырех- и восьмиквартирных, а также блокированных домов.

В начале 20-х гг. XX в. малоэтажное жилище становится наиболее распространенным типом строительства для рабочих не только в поселках, но и в городах.

Однако к середине 20-х гг. XX в. стало ясно, что малоэтажное жилище и дома-коммуны не могут рассматриваться как основные типы массового жилищного строительства. Обострение жилищной нужды требовало перехода на массовое строительство многоэтажных квартирных жилых домов для рабочих, на создание действительно экономичного типа жилища [1, С. 78-80].

Получившие широкое распространение идеи создания домов-коммун с полным обобществлением быта и с отказом от семьи были попыткой архитектурно оформить и рационализировать бытовой уклад молодежного общежития. Характерна и судьба построенных в расчете на такой молодежный коллектив домов-коммун. Те из них, которые создавались для студенческих бытовых коммун, долгие годы функционировали как благоустроенные общежития, так как в них постоянно поддерживался заданной программой возрастной и семейный состав жильцов. Те же дома-коммуны, которые строились для бытовых коммун рабочей молодежи, постепенно по мере создания их жильцами семей превращались в неудобные жилища, ибо менявшийся бытовой уклад уже никак не соответствовал предусмотренной проектом организации быта молодежной коммуны.

Формирование таких коммун все же оказало определенное влияние на проектирование и строительство студенческих общежитий в конце 20-х годов XX в.

В этот период в Москве был построен экспериментальный студенческий дом-коммуна на 2000 человек (архитектор И. Николаев, 1929-1930 гг.) (рис.1). В большом восьмизэтажном корпусе расположены небольшие комнаты (6 м<sup>2</sup>) на два человека, предназначавшиеся только для сна. Этот корпус соединялся с трехэтажным общественным корпусом, в котором размещались спортивный зал, зрительный зал на 1000 мест, столовая, читальный зал на 150 человек, зал для занятий на 300 человек, кабины для индивидуальных занятий. Были запроектированы также прачечная, починочная, детские ясли на 100 мест, комнаты для кружков и т.д.

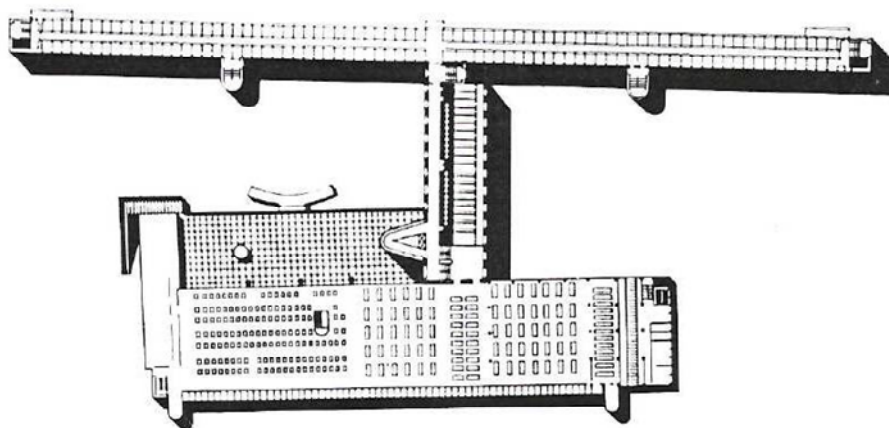


Рис. 1. Москва. Дом-коммуна (студенческие общежития), 1929-1930 гг. Архитектор И. Николаев. План

Среди осуществленных домов-коммун, общественно-коммунальные помещения в которых успешно функционировали в комплексе с жилыми ячейками, можно назвать дом общества политкаторжан в Ленинграде (начало 30-х гг. XX в., архитекторы Г. Симонов, П. Абросимов, А. Хряков), состоящий из трех соединенных внутренними переходами корпусов. В двух корпусах галерейного типа расположены двухкомнатные квартиры, а в секционном корпусе – большие трехкомнатные квартиры. На первом этаже размещаются общие помещения: вестибюль, фойе, зрительный зал, столовая, библиотека-читальня и др. [1, С. 85, 87].

Задачи улучшения бытовых условий трудящихся, стоявшие в рассматриваемый период перед архитекторами, предполагали как совершенствование самих квартир, так и развитие сети коммунально-бытового обслуживания.

Реальные процессы формирования быта свидетельствовали, что семья оказалась устойчивой первичной ячейкой общества. Бытовая коммуна, основанная на полном добровольном самообслуживании ее членов, оказалась утопией, так как она не учитывала реальные экономические отношения людей при социализме («от каждого по способностям, каждому по труду»), и как структурная единица общества не получила развития [1, С. 87, 89-90].

Эти и многие другие жилые дома и комплексы, запроектированные в конце 1920-х годов, наглядно свидетельствуют о том, что тип массового городского жилого дома к этому времени находился еще в стадии поисков. Архитекторов уже не удовлетворяли ни секционные дома с большими квартирами для покомнатного заселения, ни дома-коммуны с жилыми «кабинами», лишенными подсобных помещений. Велись поиски экономичной жилой ячейки на семью, форм взаимосвязи жилого дома с учреждениями коммунально-бытового обслуживания [1, С. 93].

Однако поиск оптимальных решений и эксперименты продолжались и для выявления принципов социально-бытовой организации и планировочной структуры жилища нового типа, а также привлечения широких кругов архитекторов к решению этой важнейшей задачи. Госстрой СССР совместно с Союзом архитекторов СССР в 1964 г. провели открытый конкурс, участники которого разрабатывали жилой комплекс на 2000 человек с первичным и повседневным обслуживанием. Творческое соревнование было успешным. Положительная роль таких конкурсов заключается в том, что они разбудили мысль и наметили возможные пути решения жилища будущего, с развитием системы обслуживания.

Идеи, заложенные в конкурсных проектах (для средней полосы), были развиты в экспериментальных проектах, разработанных в Москве, Ленинграде, Киеве.

Таким образом, после конкурса была сделана первая попытка экспериментального строительства в 10 микрорайоне Новых Черемушек в Москве жилого комплекса с развитым общественным сектором (архитекторы Н. Остерман, А. Петрушкова, И. Канаева, Г. Константиновский, инженер С. Керштейн) (рис. 2).

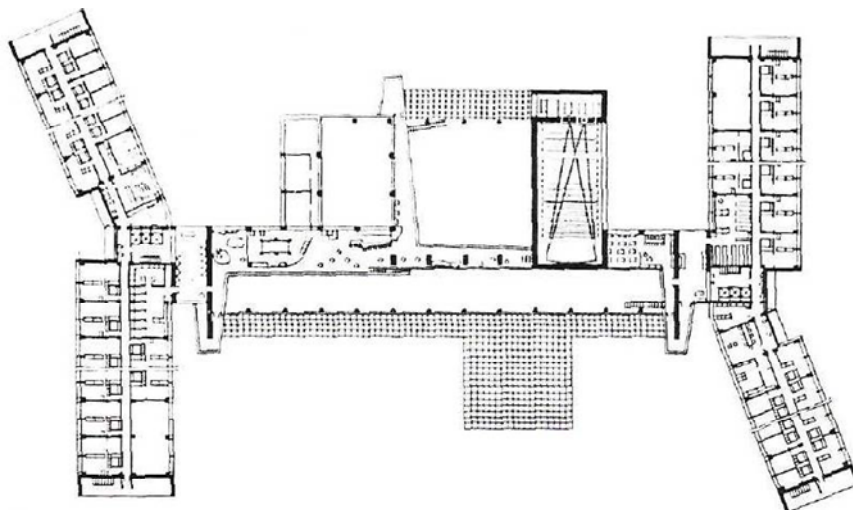


Рис. 2. Москва. Жилой дом с развитым общественным обслуживанием (Дом нового быта).  
Архитекторы Н. Остерман, А. Петрушкова, И. Канаева, Г. Константиновский. 1969 г. План

В основу проекта был заложен принцип органического сочетания высокого стандарта индивидуальной квартиры с высоким уровнем общественного обслуживания [1, С. 601, 605].

Так называемый Дом нового быта (ДНБ) состоит из двух 16-этажных домов гостиничного типа и объединяющего их блока обслуживания. Общественные учреждения располагаются также в первых этажах жилых домов. В жилых домах комплекса запроектированы 772 однокомнатных квартиры и 340 двух- и трехкомнатных квартир без кухонь, с агрегатами для эпизодического питания. Общественное питание организуется в четырех ступенях комплекса – центральная столовая, поэтажная столовая, поэтажные самостоятельные кухни, квартирные кухни-шкафы.

ДНБ насыщен различными общественными помещениями, превышающими перспективные нормы для микрорайона на 9-10 тыс. человек более чем в 2,5 раза. Их эксплуатация требует больших трудовых затрат. Здесь на 2200 жителей имеются, кроме указанных помещений, общий клуб с универсальным залом, бассейном, кружковыми комнатами, клуб по интересам, технический клуб, административно-хозяйственный центр, медицинский центр, кулуары, зимний сад, зал выставок, местное радио- и телевидение, гостиница, помещение хозяйственно-бытового обслуживания и т.п. [2].

ДНБ в Москве, в отличие от Марсельского дома-комплекса, решенного в едином объеме, состоит из трех зданий различной этажности, композиционно взаимосвязанных между собой, широко раскинувшихся на участке.

Однако предусмотренные в ДНБ общественные помещения относятся к различным учреждениям и ведомствам (зрелищным, спортивным, медицинским, выставочным, общественного питания, радио и телевидения и др.), которые не имеют прямого отношения к службе быта как к отрасли; само название предполагало наличие в нем расширенного ассортимента оказываемых бытовых услуг. Поэтому ДНБ не стал образцом дальнейшего подражания, так как в нем отсутствовали многие виды бытовых услуг.

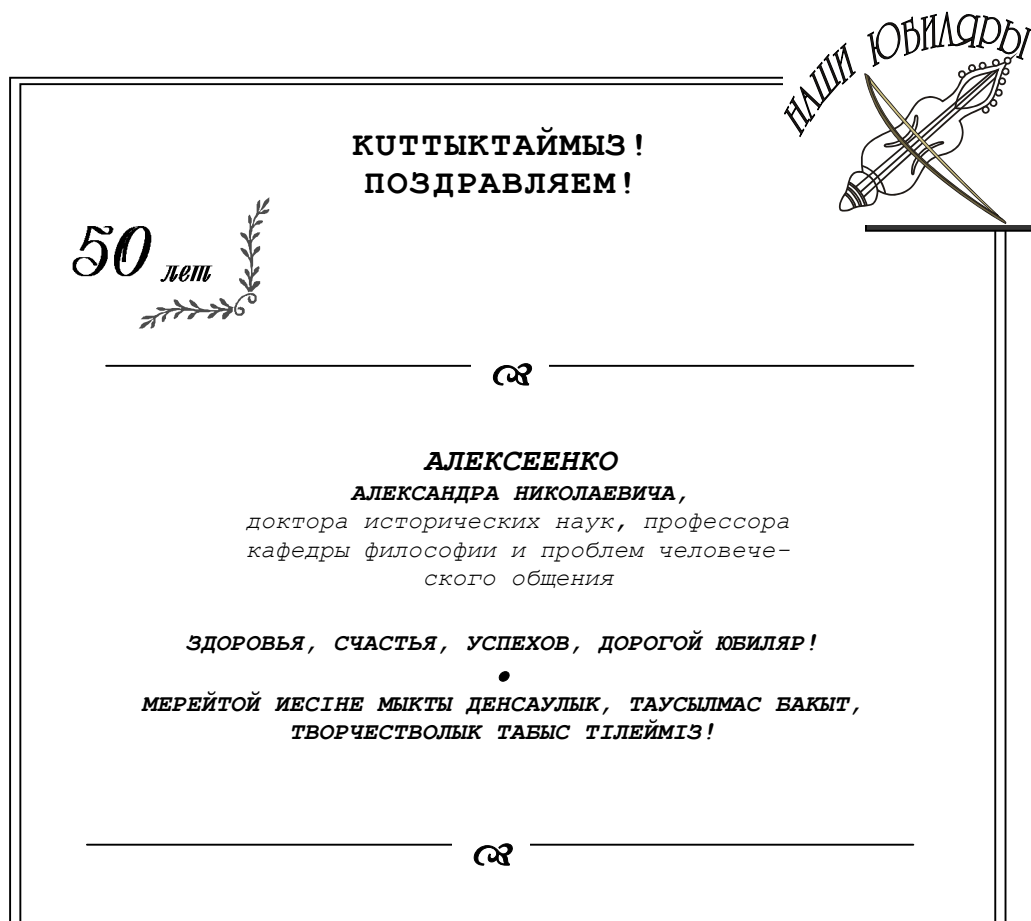
#### Список литературы

1. ВИА. Т. 12.



2. Градов Г.А. Город и быт. – М.: Стройиздат. – С.85.

Получено 10.04.06.



УДК 665.45: 691.16

**Ш.Ж. Суранкулов, А.Б. Сагындыков**

ТарГУ им. М.Х. Дулати, г. Тараз

#### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОНКОМОЛОТОГО ФОСФОГИПСА С БИТУМОМ

Смесь битума с минеральным порошком играет важную роль в формировании структуры асфальтобетона и его физико-механических свойств, и является определяющим фактором при получении материала с заданными свойствами. При смешивании и твердении смеси битума с минеральным порошком происходит комплекс физико-химических

процессов на границе раздела битум – минеральный порошок, к которым относятся физические процессы, протекающие на межфазных границах; хемосорбционные процессы; диффузия битума вовнутрь минеральных зерен.

Учеными в основном исследуются физические свойства битумов: пластичность, вязкость, текучесть и т.д. Однако по утверждению ряда исследователей [4], минеральный порошок рассматривается не как структурообразующий компонент, а как тонкий заполнитель межзернового пространства. Наличие свободного, несвязанного битума резко снижает качество асфальтобетона и водостойкость, способствует образованию колеи и трещин.

В технологии изготовления асфальтобетона, и в частности, органо-минеральных композитов в основном используются следующие минеральные компоненты: известняк, мел, доломит и т.д. Для нас представляло интерес использование в качестве минерального порошка фосфогипса – крупнотоннажного отхода производства минеральных удобрений. Полученный по дигидратной технологии из фосфорного сырья фосфогипс значительно отличается по содержанию основных компонентов, а именно, масс %: 24,4-32,4 CaO; 34,8-46,2 SO<sub>3</sub>; 1,2-5,8 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 0,1-0,4 F.

Известно, что адгезионные, химические и каталитические свойства твердых тел зависят от химии и геометрии их поверхности [1]. Причем согласно исследованиям [2], свойства поверхности дисперсных наполнителей не всегда соответствуют его составу и свойству в объеме.

Фосфогипс, используемый в качестве минерального порошка, был предварительно испытан согласно ГОСТ 12784-78 «Порошок минеральный для асфальтобетонных смесей. Методы испытаний». Основные показатели имеют следующие значения: зерновой состав – менее 0,315 мм – 98,3 %, 0,14 мм – 80,3 %, 0,071 мм – 75 %; удельный вес – 2,10 г/см<sup>3</sup>; плотность – 1,68 г/см<sup>3</sup>; пористость – 20 %; показатель битумоемкости - 30 г; влажность – 0,2 %, коэффициент водостойкости образцов – 0,80.

О характере взаимодействия битума с поверхностью фосфогипса оценивали по изменению ИК-спектров битума после контакта с фосфогипсом. Сцепление битума с фосфогипсом определяли по адсорбции метиленового голубого.

ИК-спектры образцов снимали на спектрофотометре UR-20 в области чистот 400- 3800 см<sup>-1</sup> (рис. 1). Образцы готовили методом литья из состава битум-фосфогипс в соотношении по массе 50:50; 40:60; 30:70. В исходном фосфогипсе присутствуют полосы 455, 475, 495, 510, 530, 555, 575, 600, 615, 685, 870, 920, 950, 1030, 1140, 1160, 1180, 1624, 1687, 3410, 3555 см<sup>-1</sup>. Основной фазой рассматриваемых продуктов является дигидрат сульфата кальция. В области деформационных колебаний воды присутствует дублет 1627 и 1682 см<sup>-1</sup>, характерный для спектра CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O.

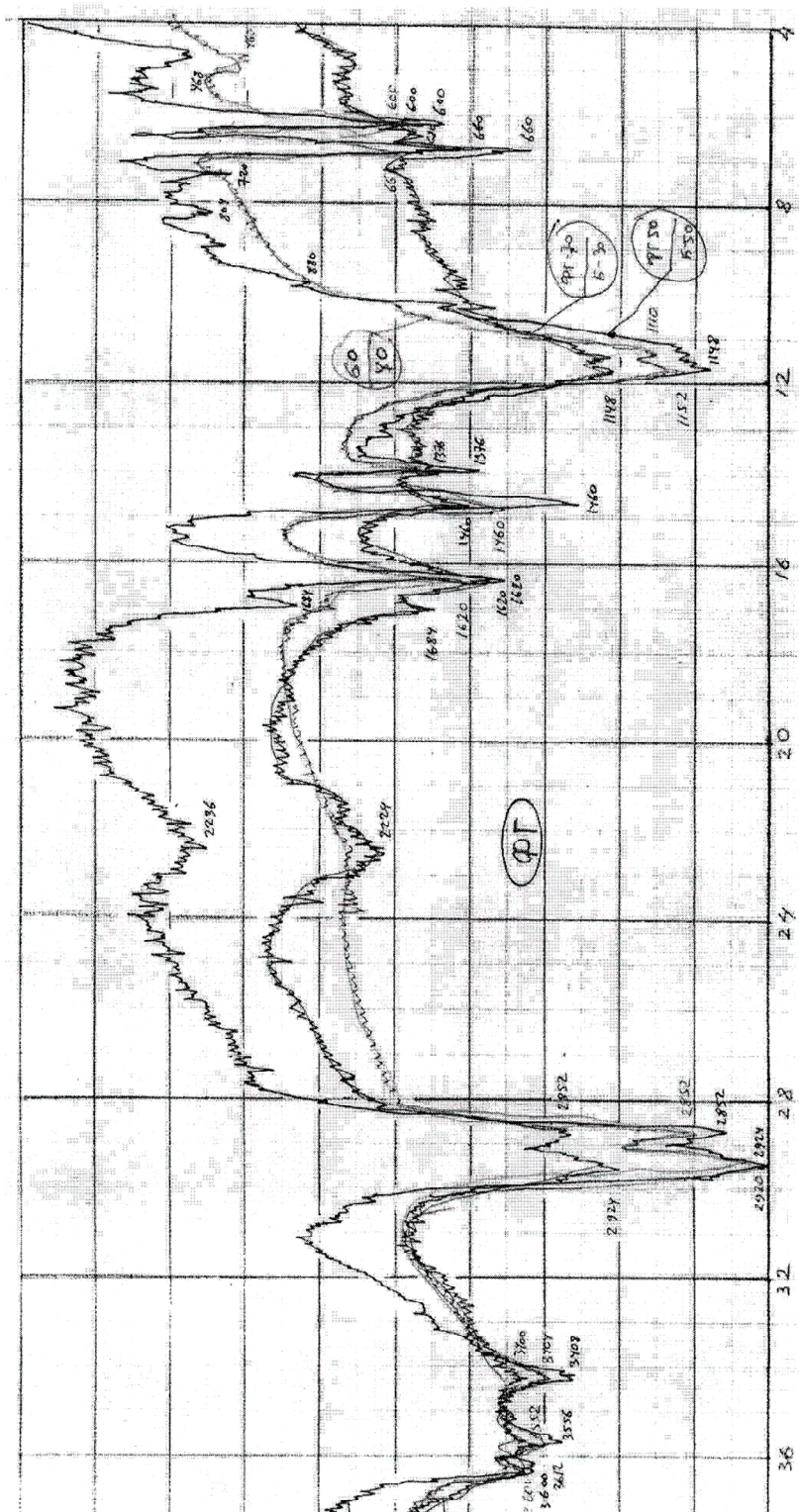


Рис. 1. ИК-спектр минерального порошка фосфогипса при различном содержании битума, (ФГ/Б) в %

Инфракрасные спектры свидетельствуют о том, что при введении фосфогипса происходит адгезионное взаимодействие в предельно-концентрационной дисперсной системе. В инфракрасных спектрах присутствуют области частот  $1750-1700\text{ см}^{-1}$ , которые связаны с колебаниями карбонильными и гидрооксильными группами ( $-\text{OH}; -\text{C}=\text{O}; >\text{C}=\text{O}$ ). На наличие водородных связей указывают полосы  $3330\text{ см}^{-1}$ .

Сернистые соединения -  $\text{SO}>\text{SO}_2$  способствуют обогащению битума высокомолекулярными кислотами, серо- и кислородосодержащими соединениями, которые вступают в химическое взаимодействие с катионами щелочноземельных металлов, а именно  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , находящимися на поверхности фосфогипса, в результате чего образуются нерастворимые поверхностные соединения типа сульфанатов.

С увеличением содержания битума наблюдается уменьшение интенсивности полосы поглощения в области  $2920, 2852\text{ см}^{-1}$  и увеличение интенсивности в области  $1152, 1148\text{ см}^{-1}$ . Это свидетельствует об изменении соотношения между группами  $\text{CH}_2$  (метиленовых) и  $\text{CH}_3$  (метильных) и об изменении структурных связей между углеводородами. Наблюдается также увеличение интенсивности полос поглощения в области частот  $660$  и  $600\text{ см}^{-1}$ .

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о взаимодействии фосфогипса и битума с образованием нерастворимых соединений типа сульфанатов и структурной перестройки составляющих компонентов битума.

#### Список литературы

1. Киселев В.Ф. Асфальтобетонные процессы на поверхности полупроводников и диэлектриков. - М.: Наука, 1978. - 259 с.
2. Липатов Ю.С. Физико-химия наполненных полимеров. - Киев: Наукова думка, 1967. - 256 с.
3. Начипоренко А.П. Кислотно-основные свойства поверхности твердых веществ. - Л.: ЛТЧ, 1989. - 22 с.
4. Багинский Н. Бальзам для дорог // Автомобильные дороги. - 2004. - №4.

Получено 24.04.06.

УДК 624.012.36

**В.Ф. Шевляков, О.В. Руденко**

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

#### УСИЛИЯ И ПРОГИБЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ ЧАСТИЧНОЙ РАЗГРУЗКЕ ДО ПОГАСЕНИЯ МОМЕНТА ОТ СОБСТВЕННОГО ВЕСА В СЕРЕДИНЕ ПРОЛЕТА

Предварительно напряженные плиты перекрытия с начала момента бетонирования испытывают нагрузки от собственного веса, а с момента отпуска усилия предварительно натяжения – усилия обжатия. При формовании (бетонировании) положение нижней поверхности плиты, ее прогибы или выгибы определяются деформациями и положением горизонтальной поверхности днища формы. При отпуске усилия предварительного напряжения после набора прочности бетоном при пропаривании плита получает выгиб вверх от усилия обжатия, который уменьшается действием собственного веса. При этом плита в середине пролета может иметь зазор с поверхностью днища при выгибе или за-

нимать форму поверхности днища. При установлении на опоры (при транспортировании на склад готовой продукции, на площадке складирования, в проектное положение) в плите имеются суммарные прогибы (выгибы) от прогибов (выгибов) при бетонировании, от выгибов от усилия обжатия, прогибов от собственного веса, прогибов от нагрузки. Прогибы плиты от действия собственного веса и выгибы от действия сил обжатия предлагается определять методом разгрузки.

Схема загрузки и испытания плиты, эпюры  $M$ ,  $N$  и  $Q$  от усилия обжатия и собственного веса изображены на рис. 1, а схема загрузки и испытания плиты, эпюры  $M$ ,  $N$  и  $Q$  от усилия обжатия, собственного веса и усилия разгрузки изображены на рис. 2.

При совместном действии сил обжатия и собственного веса преднапряженная плита, установленная на две опоры, чаще всего имеет выгиб, а ее нижняя грань сжата. Расчеты плиты с максимальной длиной для пустотных плит ПК 90.15-8АВт (серия 1.241-1 выпуск 21), установленной на две опоры показали, что при нагрузке от собственного веса и действия сил обжатия трещины у нижней грани не образуются. Испытываемые плиты при указанных нагрузках трещин не имели. При действии сил обжатия и разгрузке нижняя грань плиты еще больше сжимается, что отодвигает ее от момента образования трещин на нижней грани. Такая плита может рассматриваться при загрузке собственным весом и силами обжатия как изгибаемый элемент, работающий без трещин на нижней грани. Трещины у нижней грани, так же как и у верхней, могут образовываться при больших пролетах, собственном весе и силе обжатия. В первом случае должно быть учтено влияние верхних трещин на прогибы, а во втором – плита должна рассматриваться как элемент, работающий с трещинами.

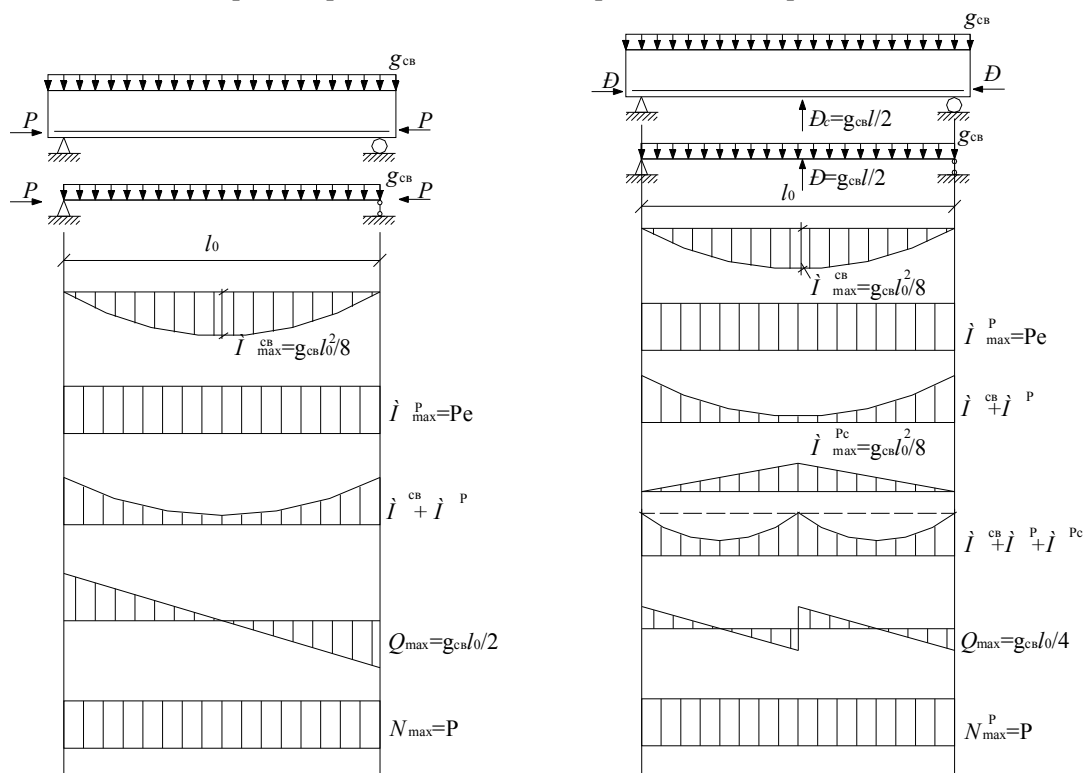


Рис. 1. Схема загрузки и испытания плиты, Рис. 2. Схема загрузки и испытания плиты,

эпюры  $M$ ,  $N$  и  $Q$  от усилия обжатия и собственного веса

эпюры  $M$ ,  $N$  и  $Q$  от усилия обжатия, собственного веса и усилия разгрузки

Прогибы от собственного веса плиты при опирании ее по двум сторонам можно измерить, фиксируя положение нижней грани в середине пролета при действии сил обжатия и собственного веса и после разгрузки при погашении момента от собственного веса. При этом расстояние от горизонтальной линии до нижней грани плиты в середине пролета будет характеризовать выгиб от действия сил обжатия. На рис. 3. изображены эпюры прогибов (выгибов) от совместного действия сил обжатия и собственного веса (а-1) и от действия сил обжатия при разгрузке (б-2). При этом максимальный выгиб при разгрузке в середине пролета будет равен максимальному выгибу в середине пролета от действия сил обжатия (б-3).

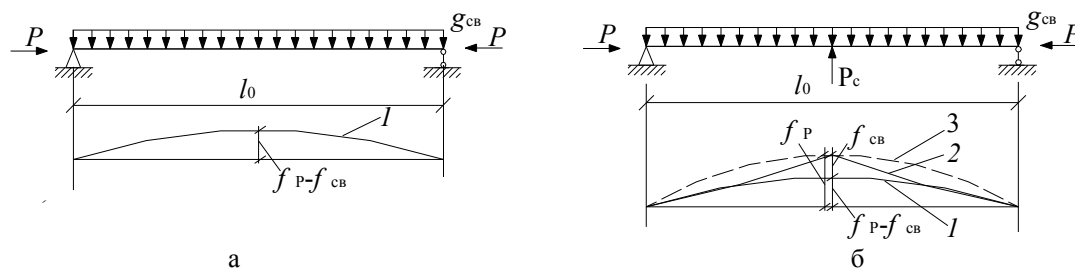


Рис. 3. Эпюры прогибов (выгибов) от совместного действия сил обжатия и собственного веса (а-1, б-1) и от действия сил обжатия при разгрузке (б-2)

Выгибы от действия сил обжатия можно определить по формуле (269) [1], не учитывая прогибы от усадки и ползучести от сил обжатия, которые проявляются при длительных эксплуатационных нагрузках

$$f = \frac{1}{8} \left( \frac{1}{r} \right) \ell_0^2, \quad (1)$$

где  $\frac{1}{8} = \rho_m$  – при постоянно действующем моменте от сил обжатия,

$\ell_0$  – расчетная длина,

$\frac{1}{r}$  – кривизна.

Кривизну от действия сил обжатия можно определить по формуле (157) [1]

$$\left( \frac{1}{r} \right)_3 = \frac{Pe_{0p}}{\varphi_{b1} E_b I_{red}}. \quad (2)$$

Кривизну от нагружения собственным весом следует определять по формуле (156) [1] при действии нагрузки с небольшим промежутком времени после изготовления:

$$\left( \frac{1}{r} \right)_3 = \frac{M_{cв}}{\varphi_1 E_b I_{red}}. \quad (3)$$

Прогиб при этом, согласно формуле [2], равен

$$f = \frac{5}{48} \left( \frac{1}{r} \right)_1 \ell_0^2. \quad (4)$$

Расчетные прогибы от действия собственного веса, подсчитанные для пустотной с максимальной длиной плиты марки ПК 90.15-8AVт равны 1,42 см, а выгибы от действия сил обжатия составляют 2,96 см. Расчетные прогибы от действия собственного веса, подсчитанные для пустотной преднапряженной плиты минимальной длины (4,8 м), равны 1,63 мм, а выгибы от действия сил обжатия составляют 2,18 мм. Указанные величины прогибов и выгибов могут быть измерены при испытании методом разгрузки с достаточной точностью с помощью индикаторов часового типа, или прогибомеров, имеющих цену деления 0,01 мм.

Список литературы

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/ Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 78 с.
2. Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов (к СНиП 2.03.01-84)/ ЦНИИ Промзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – Ч.1. – 144 с.

Получено 4.05.06.

