НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОССТРОЯ СССР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ВОЛНИСТЫХ ПОКРЫТИЙ

КИЕВ — 1975

gost.e-ecolog.ru

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОССТРОЯ СССР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ВОЛНИСТЫХ ПОКРЫТИЙ

КИЕВ — 1975

УДК 624.074.4

Даны рекомендации по расчету сборных железобетонных волнистых покрытий из панелей-складок или панелей-оболочек с постоянными и переменными геометрическими параметрами при действии произвольной нагрузки. Разработанная методика расчета позволяет выполнять вычисления при эффективном использовании ЭВМ. Даны примеры, поясняющие метод расчета.

Рекомендации предназначаются для инженеров-проектировщиков и научных работников, занимающихся исследованиями и разработкой тонкостенных пространственных систем.

Рекомендации разработаны канд.техн.наук А.А.Цейтлиным, инж. В.И.Колчуновым /лаборатория конструкций одноэтажных зданий Научно-исследовательского института строительных конструкций Госстроя СССР/ при участии инж. В.М.Мельникова /институт "Киевпроект"/.

© Научно-исследовательский институт строительных конструкций Госстроя СССР, 1975.

В В Е Д Е Н И Е

В настоящее время при проектировании волнистых покрытий руководствуются "Временными указаниями по проектированию, изготовлению и возведению сборных железобетонных сводов двойной кривизны /РСН II-59 /", разработанными НИИСК б. АСиА УССР и утвержденными Госстроем УССР. Указания относятся к арочным волнистым покрытиям, собираемым из криволинейных панелей-оболочек, и в них изложены методы расчета волнистых сводов при простейших граничных условиях и нагрузках.

Метод расчета, приведенный в настоящих рекомендациях, разработан в результате проведенных исследований таких покрытий и относится к волнистым системам, собираемым из прямолинейных или незначительно искривленных в продольном направлении безраспорных панелей-складок и панелей-оболочек при произвольных нагрузках и граничных условиях. Кроме того, рекомендации являются дополнением к гл.УI Инструкции по проектированию железобетонных тонкостенных пространственных покрытий и перекрытий, разработанной НИИЖБ и ЦНИИСК в 1961 г.

При выполнении расчетов по предлагаемому методу наиболее трудоемкая часть вычислительной работы - решение систем алгебраических уравнений высоких порядков - весьма просто реализуется на ЭЦВМ по имеющимся стандартным программам. Подготовительная работа, которая заключается в вычислении по алгебраическим формулам элементов исходных матриц, может выполняться вручную или в "ап" /автоматическое программирование/ на малых ЭЦВМ "Наири", "Промінь", "Мир"/. Такая универсальность и сравнительная простота предложенной методики делает ее пригодной для использования широким кругом специалистов-расчетчиков. Использование ЭЦВМ позволяет рассмотреть сложные

схемы покрытий, особенности граничных условий и различные виды панелей-оболочек /сборные волнистые покрытия из панелей-складок и панелей-оболочек с переменными геометрическими параметрами; покрытия из оболочек, подкрепленных продольными ребрами /килем/; податливые опорные конструкции, поддерживающие волнистые покрытия; различные виды действующих нагрузок и т.п./.

В приложении к Рекомендациям приведена специально разработанная программа для ЭВМ на языке АЛГОЛ-60, позволяющая полностью автоматизировать вычислительный процесс.

В основу расчета волнистых и складчатых систем положена полубезмоментная теория В.З.Власова. Для решения полученных при этом дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами использован метод неопределенных коэффициентов.

Изложенная в Рекомендациях методика расчета и сходимость решений по этой методике проверена многовариантными численными исследованиями с помощью ЭЦВМ, а также подтверждена экспериментальными исследованиями на моделях и натурных конструкциях волнистых покрытий.

I. Характеристики геометрии поверхности и исходные положения

I.I. Рекомендации предназначаются для расчета волнистых покрытий из упругих панелей-складок и панелей-оболочек с постоянными или переменными геометрическими параметрами сечения по длине / рис.I.2/.

I.2. Указанные в п.I.I. панели-оболочки могут иметь различные способы соединения между собой /жесткое, шарнирное/ и различные способы опирания по торцам /опирание на стены, упругие арки, балки, рамы/.

I.3. Оболочки волнистых покрытий могут быть гладкими или подкрепленными ребрами /рис.3/, со складчатым или криволинейным очертанием поперечного сечения.

I.4. При расчете системы из панелей-оболочек с криволинейным очертанием поперечного контура оболочка для

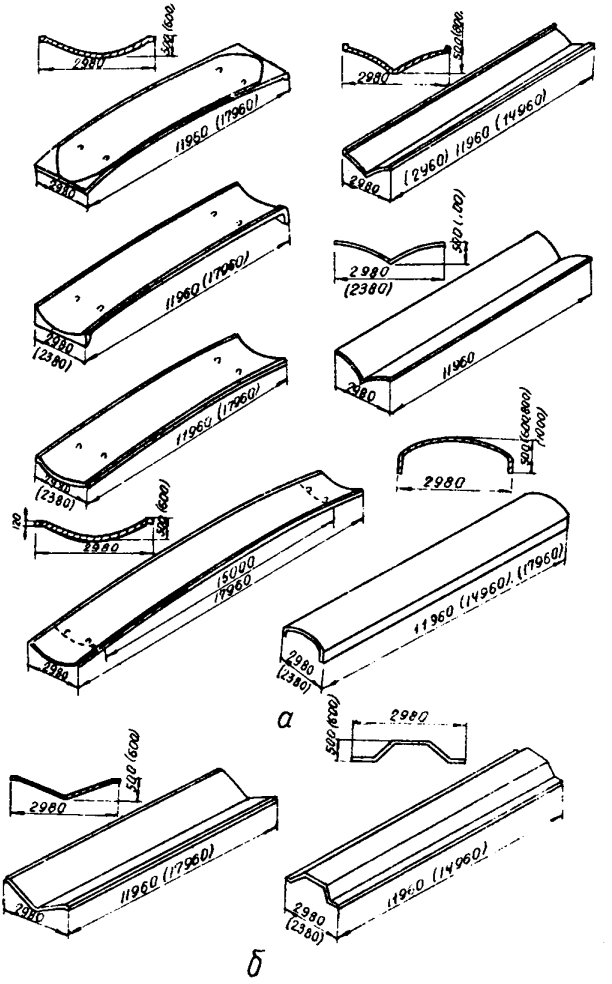


Рис.I. Панели с постоянными геометрическими параметрами: а – панели-оболочки; б – панели-складки.

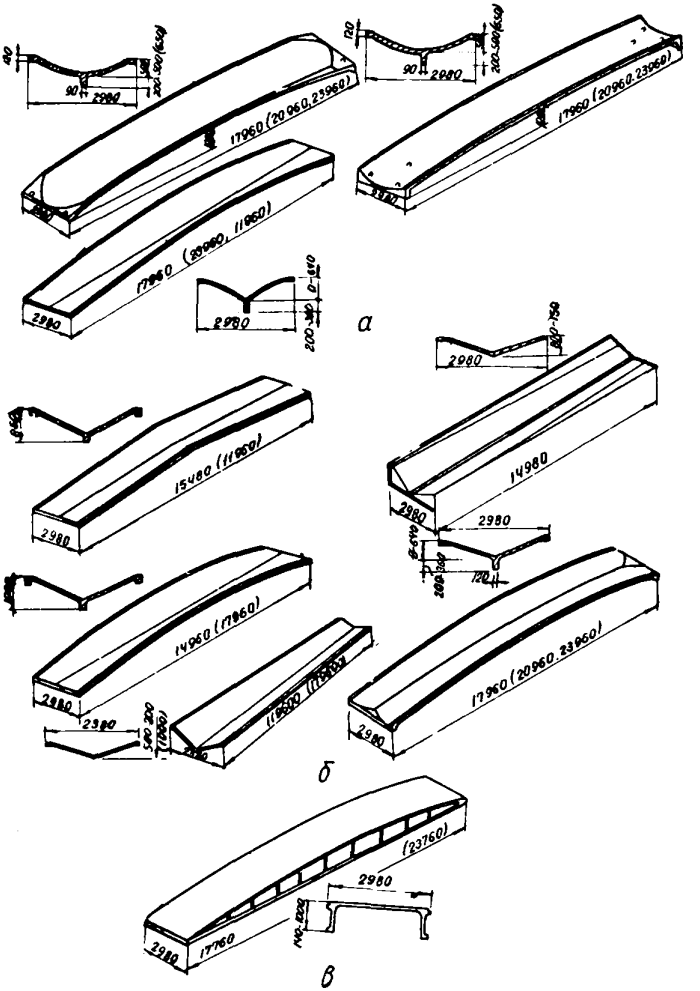


Рис.2. Панели с переменными геометрическими параметрами:
а – панели-оболочки; б – панели-складки;
в – панели типа КЖС.

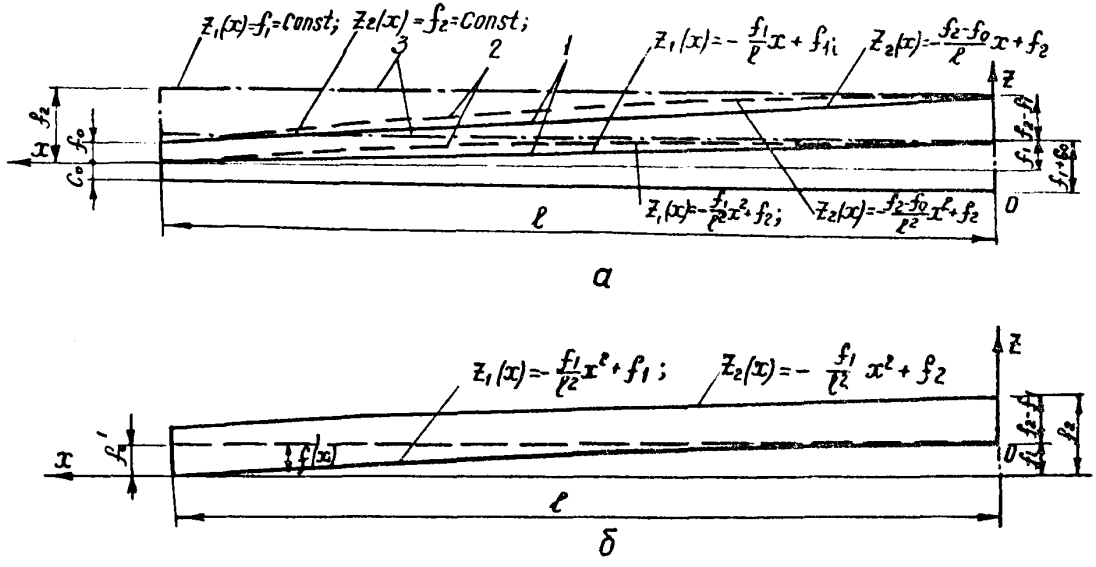


Рис.3. Продольные сечения панели-оболочки /панели-складки/ с переменными параметрами: а – подкрепленной продольным ребром-килем; б – без ребра.

расчета заменяется вписанной в нее призматической складчатой, состоящей из конечного числа прямоугольных граней /рис.4/, усилия в которой определяются путем решения усеченной системы алгебраических уравнений /заменяющей исходную систему дифференциальных уравнений/, описывающей напряженно-деформированное состояние конструкции.

I.5. Для расчета первоначально оболочку следует заменить двумя гранями, а затем число граней, в случае необходимости, уточняется расчетом методом последовательных приближений до заданной точности полученных расчетных усилий.

I.6. В практических расчетах достаточная точность обеспечивается заменой каждой панели-оболочки двухгранной складкой. Для панелей-оболочек, подкрепленных продольным ребром-килем, достаточную точность расчета обеспечивает замена оболочки четырехгранной складкой, а киля - сосредоточенным стрингером вдоль нижнего ребра заменяющей складчатой системы.

I.7. Каждая грань складки рассматривается как прямоугольная переменной жесткости балка, в сечениях которой возникают постоянные по толщине нормальные напряжения σ и касательные усилия S ; продольными изгибающими и крутящими моментами можно пренебречь.

Панели-оболочки, из которых собирается покрытие, в общем случае рассматриваются как элементы с переменными по длине параметрами, обусловленными переменными /рис.5/: глубиной волны оболочки, углом наклона граней, геометрией продольных подкрепляющих ребер, расположением по высоте сечения оболочки сосредоточенными стрингерами или их переменной площадью.

I.8. Предполагаемую методику расчета на произвольную статическую нагрузку рекомендуется применять при таких условиях:

а/ если панели-оболочки /панели-складки/ имеют переменные параметры, которые по длине изменяются плавно и в ограниченных пределах: угол наклона касательной к продольным ребрам панели-оболочки не превышает 20 , продольная кривизна оболочек не велика:

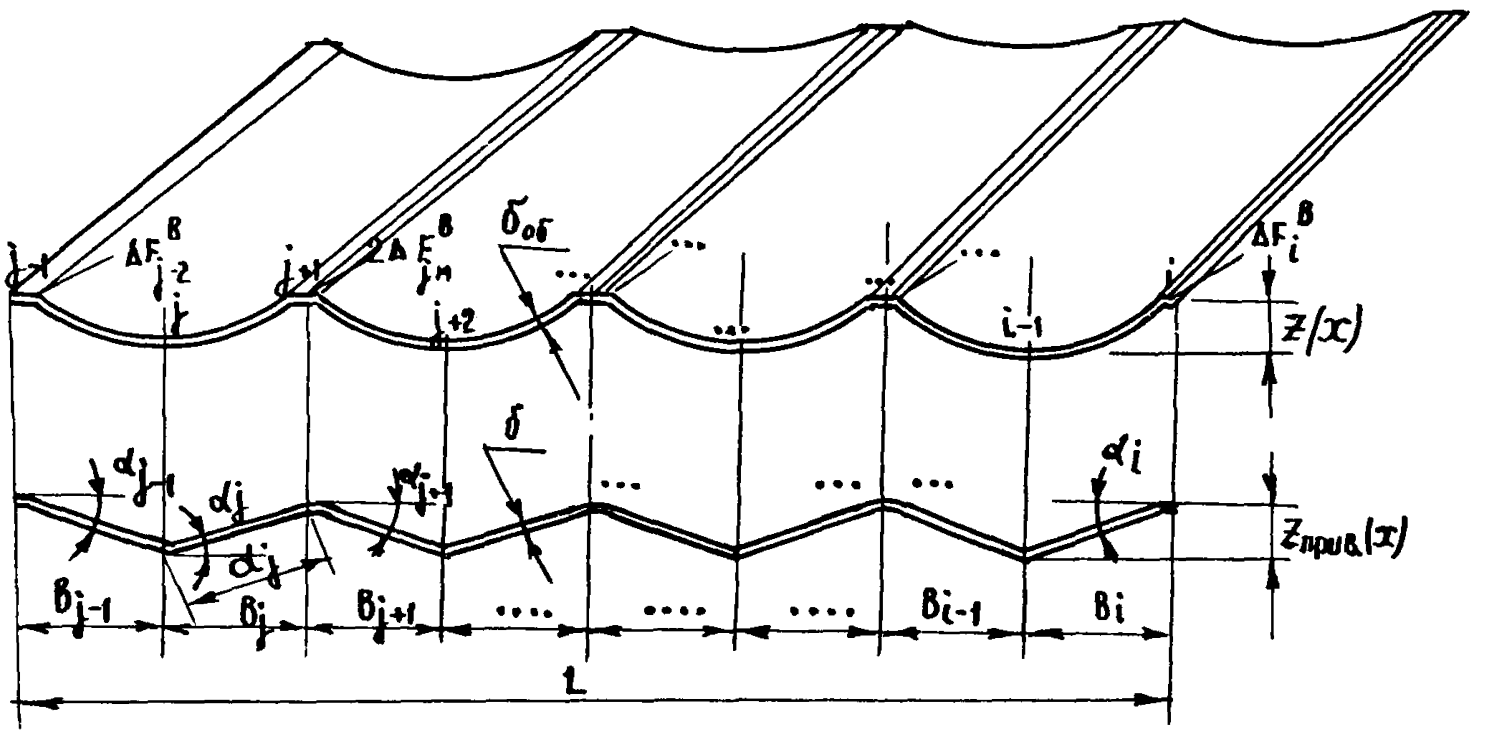


Рис.4. Заданная волнистая система и заменяющая ее складчатая.

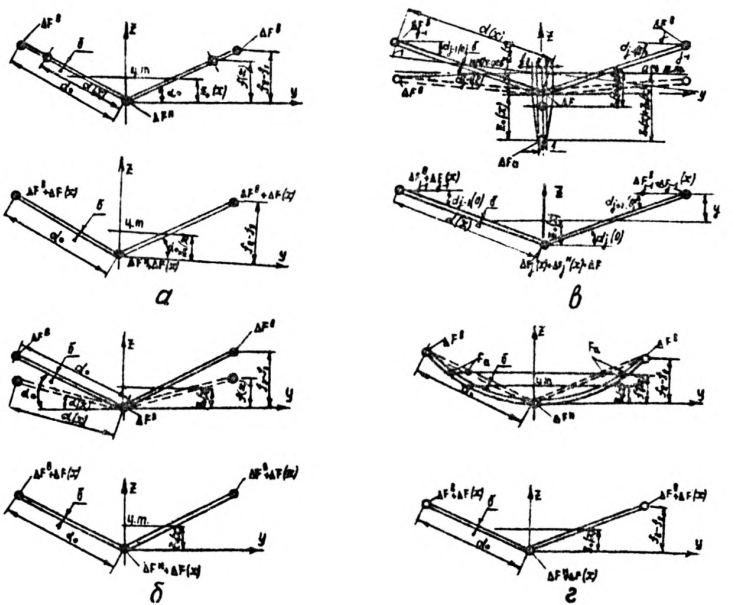


Рис.5. Заданные и приведенные поперечные сечения панелей-оболочек /панелей-складок/:
а - с переменной глубиной складки; б - с переменным углом наклона граней складки ;
в - с переменной геометрией продольных подкрепляющих ребер; г - с переменным расположением стрингеров по высоте сечения.

$$\frac{f_1}{\ell} \leq \frac{1}{15} \div \frac{1}{20} \qquad \frac{f_2 - f_1}{\ell} \leq \frac{1}{15} \ ,$$

где f_1 – стрела под"ема вертикального ребра-киля;

$f_2 - f_1$ – глубина волны по середине пролета;

б/ если стержни-оболочки подкреплены продольными вертикальными ребрами, площадь поперечного сечения которых составляет не более 0,8 ÷ 0,9 от площади поперечного сечения собственно оболочки.

I.9. В расчете рекомендуется принимать следующие обозначения / см. рис.3-5/:

ℓ – половина пролета панели-оболочки /или панели-складки/;

L – пролет опорной конструкции;

δ – толщина грани складки;

d_o – ширина грани в начальном сечении / $x = 0$ /;

$f_2 - f_1$ – глубина волны оболочки в начальном сечении;

c_o – высота продольного вертикального ребра-киля в опорном сечении / $x = \ell$ /;

b – ширина поперечного сечения вертикального ребра-киля по низу;

b' – разность между шириной вертикального ребра по низу и по верху;

ΔF^b – площадь сосредоточенного стрингера верхнего ребра;

ΔF – то же нижнего ребра;

E – модуль упругости бетона панели-оболочки,

$f(x)$ – глубина волны панели-оболочки;

$Z_o(x)$ – координата центра тяжести сечения панели-оболочки;

$Z_p(x)$ – высота вертикального ребра-грани панели-оболочки в сечениях x ;

ΔF_a – площадь рабочей арматуры вертикального ребра-киля;

$f'(x)$ – высота расположения стрингера от низа оболочки;

$F_{об}(x), S_{об}(x)$ – площадь и статический момент сечения панели-оболочки /без ребра/ относительно низа оболочки;

α_j – угол наклона j-й грани системы к горизонтальной оси y.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ И ПОСТОЯННЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАНЕЛЕЙ-ОБОЛОЧЕК

2.1. Высота вертикального ребра-грани /для оболочек с [illegible]ами/ определяется по формуле

$$Z_p(x) = \frac{f_1 - c_o}{\ell^n} x^n + f_1 \qquad / 1 /$$

где f_1, c_o, ℓ – геометрические размеры, обозначение которых приведено на рис.3,а.

В формуле /1/ $n = 1$, если $Z_1(x)$ и $Z_2(x)$ изменяются по линейному закону; $n = 2$, если $Z_1(x)$ и $Z_2(x)$ изменяются по закону квадратной параболы.

2.2. Площадь и статический момент оболочки / см.рис.5/ соответственно равны:

$$F_{об}(x) = 2\Delta F^{\delta} + \frac{2\delta}{\sin\alpha}\left[\frac{f_1 - f_2 + f_o}{\ell^n} x^n + f_2 - f_1\right] + \Delta l$$

$$S_{об}(x) = 2\Delta F^{\delta}\left(\frac{f_1 - f_2 + f_o}{\ell^n} x^n + f_2 - f_1\right), \frac{\delta}{\sin\alpha_o}\left(\frac{f_1 - f_2 + f_o}{\ell^n} x^n + f_2 - f_1\right)^2 \qquad /2/$$

где n – то же, что и в формуле 1.

Для случаев, приведенных на рис.5,б и 5, г, д в формуле /2/ надо принять $x = 0$.

2.3. Координата центра тяжести сечения оболочки равна:

$$z_0(x) = \frac{S_{ob}(x) - \frac{1}{2} b z_p^2(x) - \frac{1}{6} b' z_p^2(x) - \Delta F_a z_p(x)}{F_{ob}(x) + b z_p(x) + \frac{1}{2} b' z_p(x) + \Delta F_a} \qquad / 3 /$$

где n – то же, что и в формуле /I/;

b – ширина поперечного сечения вертикального ребра /киля/ по низу;

b' – разность между шириной вертикального ребра по низу и по верху;

ΔF_a – приведенная к бетону площадь рабочей арматуры ребра.

2.4. Площадь эквивалентного приведенного стрингера, заменяющего подольное вертикальное ребро /киль/, определяется по формуле

$$\Delta F''(x) = \frac{z_p(x)\left\{b\left[\frac{1}{2} z_p(x) + z_0(x)\right]^2 + \frac{1}{2} b'\left[\frac{1}{3} z_p(x) + z_0(x)\right]^2\right\} + \Delta F_a\left[z_p(x) + z_0(x)\right]^2 + z_p^3(x)\left(\frac{b}{12} + \frac{b'}{36}\right)}{z_0^2(x)} \qquad / 4 /$$

2.5. Для случая, приведенного на рис.5 г площадь сосредоточенного стрингера, заменяющего сосредоточенную арматуру определяется по формуле

$$\Delta F(x) = \frac{\Delta F_a\left[f'(x) - z_0(x)\right]^2}{\left[(f_2 - f_1) - z_0(x)\right]^2} \qquad / 5 /$$

где $f'(x)$ – высота расположения преднапряженной арматуры от низа оболочки.

В пунктах 2.I – 2.5 значения $z_p(x)$, $z_0(x)$, $\Delta F''(x)$, $\Delta F(x)$ вычисляются при $x = 0 \div l$ с интервалом $0{,}1\,l$.

2.6. При полосовых, сосредоточенных и других неравномерных нагрузках, действующих по верхнему ребру складки, площадь эквивалентного приведенного стрингера $\Delta F''(x)$ определяется методом последовательных приближений с учетом

поворота нейтральной оси сечения складки. При этом в первом приближении принимается, что нейтральная ось совпадает с горизонтальной осью, проходящей через центр тяжести сечения складки. Затем, после определения напряжений в складке по первому приближению, уточняется положение нейтральной оси, вновь вычисляется $\Delta F^{H}(x)$ и делается расчет по второму приближению. Процесс повторяется до достижения заданной точности.

2.7. Геометрические коэффициенты контурной линии заменяющей складки при неограниченном количестве граней равны:

$$\left.\begin{aligned}
&S_{jj-2}=\frac{1}{d_{j-1}d_j\sin\alpha_{j-1}};\quad S_{jj+2}=\frac{1}{d_j d_{j+1}\sin\alpha_{j+1}};\\
&S_{jj-1}=-\frac{1}{d_j^2}\left(ctg\alpha_j+ctg\alpha_j+\frac{d_j}{d_{j-1}\sin\alpha_{j-1}}+\frac{d_j}{d_{j+1}\sin\alpha_j}\right);\\
&S_{jj}=\left[\frac{1}{d_j^2}\left(ctg\alpha_{j-1}+ctg\alpha_j\right)+\frac{2}{d_j d_{j+1}\sin\alpha_j}+\frac{1}{d_j^2}\left(ctg\alpha_j+ctg\alpha_{j+1}\right)\right];\\
&S_{jj+1}=-\frac{1}{d_j^2}\left(ctg\alpha_j+ctg\alpha_{j+1}+\frac{d_{j+1}}{d_j\sin\alpha_j}+\frac{d_{j+1}}{d_{j+2}\sin\alpha_{j+1}}\right).
\end{aligned}\right\}\ /6/$$

2.8. При замене оболочки двухгранной складкой геометрические коэффициенты определяются по упрощенным формулам:

$$\left.\begin{aligned}
&S_{jj+2}=\frac{1}{d_o^2\sin 2\alpha_{j+1}};\quad S_{jj-2}=\frac{1}{d_o^2\sin 2\alpha_{j-1}};\\
&S_{jj}=\frac{2}{d_o^2\sin 2\alpha_j};\quad S_{jj-1}=S_{jj+1}=0.
\end{aligned}\right\}\ /7/$$

2.9. Момент инерции сечения панели-оболочки по середине пролета равен / см. рис.5 /:

$$J_o=\left[\Delta F^{B}+\Delta F(0)\right]\times\left[f_2-f_1-Z_o(0)\right]^2+2\delta d\left[\frac{1}{2}\left(f_2-f_1\right)-Z_o(0)\right]^2+$$

$$+\Delta F(0)\,Z_o^2(x)+\delta Z_p(0)\left[Z_o(0)+\frac{1}{2}Z_p(0)\right]^2+\frac{1}{2}\delta' Z_p(0)\left[Z_o(0)+$$

$$+\frac{1}{3}Z_p(0)\right]^2+f_a\left[Z_p(0)+Z_o(0)\right]^2+\frac{\delta Z_p^3(0)}{12}+\frac{\delta' Z_p^3(0)}{36}\ . \qquad /8/$$

3. ГРУЗОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

3.1. Эквивалентный изгибающий момент в j -й грани складчатой системы равен:

$$M_j^{экв\delta}(x)=\frac{J_o M_j(x)\left[f(x)-Z_o(x)\right]}{y_o\left[2\Delta F^{\delta}+\Delta F(x)\right]\left[f(x)-Z_o(x)\right]^2+} \qquad /9/$$

$$\overline{+d_o(x)\,\delta y_o\left[\frac{1}{3}f(x)+Z_o(x)\right]^2+y_o\left[\Delta F(x)+\Delta F''(x)\right]Z_o^2(x)}.$$

где y_o – координата верхнего ребра грани по середине пролета;

$M_j(x)$ – изгибающий моментт в грани складки, вычисленный как в однопролетной элементарной балке от приходящейся на нее внешней нагрузки в сечении x.

Значение $M_j^{экв\delta}(x)$ рекомендуется вычислять для $x=0\div\ell$ с интервалом $0{,}1\,\ell$.

3.2. По графику $M_j^{экв\delta}(x)$ методом наименьших квадратов функцию $M_j^{экв\delta}(x)$ следует заменить полиномом n-й степени:

$$M_j^{экв\delta}(x)=\sum_{n=0}^{n} M_{jn}^{экв\delta}\,x^n\ . \qquad /10/$$

3.3. В формуле /10/ степень полинома рекомендуется принимать равной 6; 8 или 10 /четные значения, т.е. $n=0$, 2,4,6,8,10/. Если кривая $M_j^{экв\delta}(x)$, вычисленная по /9/ изменяется более плавно и равномерно, то n принимается равным 6 и наоборот, при более резком и неравно-

мерном изменении $M_j^{экв}(x)$ порядок аппроксимирующего полинома следует повышать.

3.4. "Эквивалентная", с учетом влияния переменных параметров нагрузка определяется по формуле

$$p_j^{экв} = -\sum_{n=2}^{n} n(n-1)\, M_j^{экв} x^n \,. \qquad / II /$$

3.5. Соответственно коэффициенты правой части системы алгебраических уравнений определяются по формуле

$$R_{jn}^{экв} = \frac{p_{(j+1)n}^{экв}}{2d_j \sin\alpha_{j+1}} - \frac{p_{jn}^{экв}}{d_j \sin\alpha_j} - \frac{p_{(j-1)n}^{экв}}{2d_j \sin\alpha_{j-1}} \,. \qquad /I2/$$

где $p_{j+1}^{экв} = n(n-1)\, M_{(j+1)n}^{экв}$; $p_{jn}^{экв} = n(n-1)\, M_{jn}^{экв}$; $p_{(j-1)n}^{экв} = n(n-1) M_{(j-1)n}^{экв}$

3.6. Для систем из оболочек с переменными параметрами к коэффициентам S_{ji} необходимо ввести дополнительно множители /коэффициентов полинома/:

$$\sum_{n=0}^{n} m_{jn} x^n = \frac{p_j^{экв}(x)}{p_j(x)} \qquad /I3/$$

где $p_j(x)$ – заданная внешняя нагрузка, выраженная в виде полинома[x/].

Коэффициенты m_{jn} также определяются методом наименьших квадратов по графику функции $m_j(x) = p_j^{экв}(x) / p_j(x)$. Для систем из панелей-оболочек с постоянными геометрическими параметрами $m_{jn} = I$

---

x/ Если внешняя нагрузка задана в виде другой функции, то ее можно представить полиномом по методу наименьших квадратов.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ УСИЛИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

4.I. Коэффициенты полиномов, выражающие искомые усилия, определяются путем решения системы

$$L\bar{P} = \bar{R} \qquad / \text{I4} /$$

где L – матрица коэффициентов при неизвестных, которая в развернутом виде записывается так:

$$L = \left|\begin{array}{cccccccc|cccccccc}
B_{11} & A_{12} & & & & & & 0 & C_{13} & & & & & & & 0 \\
A_{21} & B_{22} & A_{23} & & & & & & C_{23} & C_{24} & & & & & & \\
 & A_{32} & B_{33} & A_{34} & & & & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & & & & & \\
 & & A_{43} & B_{44} & A_{45} & & & & C_{43} & C_{44} & C_{45} & \cdot & & & & \\
 & & & A_{54} & B_{55} & A_{56} & & & C_{53} & C_{54} & C_{55} & \cdot & \cdot & & & \\
 & & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & C_{64} & C_{65} & \cdot & \cdot & \cdot & & \\
 & & & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & C_{75} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\
 & & & & & & A_{(i-1)(i-2)} & B_{(i-1)(i-1)} & A_{(i-1)i} & & & & \ddots & \ddots & \ddots & \\
0 & & & & & & & A_{i(i-1)} & B_{ii} & 0 & & & & & C_{i(i-4)} & C_{i(i-3)} & C_{i(i-2)} \\
\hline
a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & & & 0 & D_{33} & D_{34} & & & & & & 0 \\
 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & & & D_{43} & D_{44} & D_{45} & & & & & \\
 & & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & & & D_{54} & D_{55} & D_{56} & & & & \\
 & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \\
 & & & & & \ddots & \ddots & a_{(i-4)i} & & & & \ddots & \ddots & \ddots & & \\
 & & & & & & \ddots & a_{(i-3)i} & & & & & D_{(i-3)(i-4)} & D_{(i-3)(i-3)} & D_{(i-3)(i-2)} & \\
0 & & & & & & & a_{(i-2)i} & 0 & & & & & D_{(i-2)(i-3)} & D_{(i-2)(i-2)} &
\end{array}\right|$$

где подматрицы B_{iin}, A_{ji} C_{jin} a_{jin} D_{iin} D_{jin} $(j=1,2\ldots i;\ n=0,2,4\ldots n)$ имеют следующую структуру:

$$A_{jin}=\begin{vmatrix} 0 & & & & 0 \\ & \bar{a}_{ji2} & & & \\ & & \bar{a}_{ji4} & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & a_{jin} \end{vmatrix}, \qquad B_{iin}=\begin{vmatrix} 1 & \ell^2 & \ell^4 & \dots & \ell^n \\ & b_{ii2} & & & \\ & & b_{ii4} & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & b_{iin} \end{vmatrix},$$

$$C_{jin}=\begin{vmatrix} 0 & & & & 0 \\ & c_{ji0} & & & \\ & & c_{ji2} & & \\ & & & c_{ji4} & \\ & & & & \ddots \\ 0 & & & & c_{jin} \end{vmatrix}, \qquad a_{jin}=\begin{vmatrix} 0 & & & & 0 \\ & a_{ji0} & & & \\ & & a_{ji2} & & \\ & & & a_{ji4} & \\ & & & & \ddots \\ 0 & & & & a_{jin} \end{vmatrix}, \quad /16/$$

$$D_{iin}=\begin{vmatrix} 1 & \ell^2 & \ell^4 & \dots & \ell^n \\ & d_{ii2} & & & \\ & & d_{ii4} & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & d_{iin} \end{vmatrix}, \qquad D_{jin}=\begin{vmatrix} 0 & & & & 0 \\ & d_{ji2} & & & \\ & & d_{ji4} & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & d_{jin} \end{vmatrix}.$$

$$\left.\begin{aligned} a_{jin} &= n(n-1)\frac{F_j}{6}; \qquad c_{jin}=S_{jin}\,m_{jn}; \\ b_{iin} &= n(n-1)\left(\tfrac{2}{3}F_i+\Delta F_i^{\beta}+\Delta F_{i0}+\Delta F_{i0}^{H}\right); \\ d_{iin} &= 4n(n-1)\frac{d_0}{6\mathcal{J}_j}; \quad d_{jin}=n(n-1)\frac{d_0}{6\mathcal{J}_j}; \\ \mathcal{J} &= \frac{\delta_j^3}{12}. \end{aligned}\right\} \quad /17/$$

Вектор $\bar{p}$ коэффициентов неизвестных усилий имеет вид:

$$\bar{p} = \begin{vmatrix} \delta_{10} \\ \delta_{12} \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta_{1n} \\ M_{30} \\ M_{32} \\ \cdot \\ \cdot \\ M_{3n} \end{vmatrix} \qquad /18/$$

где подматрицами служат:

$$\bar{\delta}_{jn} = \begin{vmatrix} \delta_{j0} \\ \delta_{j2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta_{jn} \end{vmatrix} \qquad /19/$$

Вектор $\bar{R}$ внешней нагрузки имеет вид:

$$\bar{R} = \begin{vmatrix} R^{экв}_{10p} \\ R^{экв}_{12p} \\ R^{экв}_{14p} \\ \vdots \\ R^{экв}_{inp} \\ \theta_{30} \\ \theta_{32} \\ \vdots \\ \theta_{(i-2),n} \end{vmatrix} \qquad /20/$$

где

$$R^{экв}_{jnp} = \begin{vmatrix} 0 \\ R^{экв}_{j0p} \\ R^{экв}_{j2p} \\ \vdots \\ R^{экв}_{jnp} \end{vmatrix} \qquad \theta_{jn} = \begin{vmatrix} 0 \\ \theta_{j0} \\ \theta_{j2} \\ \vdots \\ \theta_{jn} \end{vmatrix} \qquad /21/$$

4.2. В формуле /I4/ порядок / n / матрицы L определяется методом последовательных приближений. В первом приближении число членов разложения в степенные ряды / n / принимается равным степени полинома, описывающего эквивалентную нагрузку $p^{экв}_j(x)$ плюс 2.

Решается система /I4/ и по формулам /22/ вычисляются искомые усилия. Затем число членов разложения n увеличивается на два /второе приближение/ и решение снова повторяется. Полученные величины напряжений и моментов сравниваются с их значениями в первом приближении, и определяется погрешность ε . Процесс продолжается до достижения наперед заданной точности расчета / задан. $\varepsilon \leq \varepsilon$ /.

4.3. Для практических расчетов / см.п.4.2/ достаточная

точность обеспечивается при расчете по первому приближению. Для покрытий из оболочек с постоянными геометрическими параметрами для первого приближения можно принимать $n = 3$.

4.4. Систему /I4/ рекомендуется решать на ЭЦВМ по имеющимся стандартным программам для решения систем линейных алгебраических уравнений.

4.5. Получив из решения системы /I4/ значения - коэффициентов неизвестных усилий / σ_{jn} , M_{jn} /, вычисляют усилия и перемещения/прогибы/ для j -го ребра системы по формулам:

$$\sigma_j(x) = \sum_{n=0}^{n} \sigma_{jn} x^n ; \quad M_j(x) = \sum_{n=0}^{n} M_{jn} x^n . \qquad /22/$$

$$W_j(x) = -\frac{1}{2 d_0 E \sin\alpha_j} \sum_{n=0}^{n} \frac{[\sigma_{(j-1)n} - 2\sigma_{jn} + \sigma_{(j+1)n}] x^{n+2}}{(n+1)(n+2)} + Cx + D . /23/$$

где C и D - постоянные коэффициенты, определяемые из граничных условий:

$$D = \frac{1}{2 d_0 E \sin\alpha_j} \sum_{n=0}^{n} \frac{[\sigma_{(j-1)n} - 2\sigma_{jn} + \sigma_{(j+1)n}] l^{n+2}}{(n+1)(n+2)} . \qquad /24/$$

4.6. По полученным величинам $\sigma_j(x)$, $M_j(x)$ и $W_j(x)$, используя формулы сопротивления материалов, определяют все остальные усилия и перемещения волнистой системы, а по ним ведется расчет граней складчатой системы на прочность и деформативность по требованиям главы СНиП П-В.I-62* "Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования". При этом каждая грань складки рассматривается как элементарная железобетонная балка, в которой полученные от пространственного расчета системы растягивающие усилия передаются на арматуру, а сжимающие на бетон.

5. УЧЕТ ПОДАТЛИВОСТИ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

5.I. При опирании элементов волнистого /складчатого/ покрытия на податливые /упругие/ опоры расчетная схема имеет вид, приведенный на рис.6, а граничные условия, входящие в блоки B_{iin}, D_{iin} /I6/ и в элементы вектора $\bar{R}$ /20/, записывают в виде

$$\sigma_{j,2\ell} = \sum_{n=0}^{n} \sigma_{jn} (2\ell)^n; \quad \sigma_0 = \sigma_{j0}; \quad \sigma_{j1} = \sigma_{j2} = \ldots \sigma_{jn} = 0; \qquad /25/$$

$$M_{j,2\ell} = \sum_{n=0}^{n} M_{jn} (2\ell)^n; \quad M_0 = M_{j0}; \quad M_{j1} = M_{j2} = \ldots M_{jn} = 0.$$

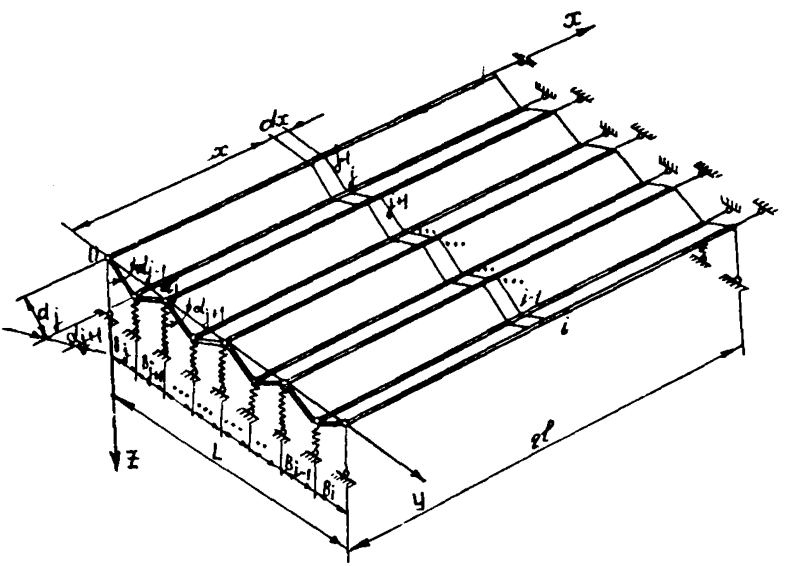


Рис.6. Основная система волнистого покрытия на податливых опорах.

$$R^{экв}_{jnp} = \begin{vmatrix} \sigma_{j,2\ell} \\ R^{экв}_{j0p} \\ R^{экв}_{j2p} \\ R^{экв}_{j4p} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ R^{экв}_{jnp} \end{vmatrix} \qquad /26/ \qquad \theta_{jn} = \begin{vmatrix} M_{j2\ell} \\ \theta_{j0} \\ \theta_{j2} \\ \theta_{j4} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_{jn} \end{vmatrix} \qquad /27/$$

5.2. Начальные значения напряжений и моментов / $\sigma_{2\ell}$, σ_0 $M_{2\ell}$, M_0 / определяют отдельно для среднего и крайнего пролетов:

I/ средний пролет / рис.7,а/:

Взаимные углы поворота граней:

$$\theta_{j,w} = \pm \left[\bar{\theta}_{(j-1),w} - \bar{\theta}_{jw} \right] \qquad /28/$$

где $\bar{\theta}_{(j-1)w}$ и $\bar{\theta}_{jw}$ – углы поворота / $j-1$ / -й и j -й граней, определяемые по величинам прогибов опорной конструкции.

Углы поворота граней:

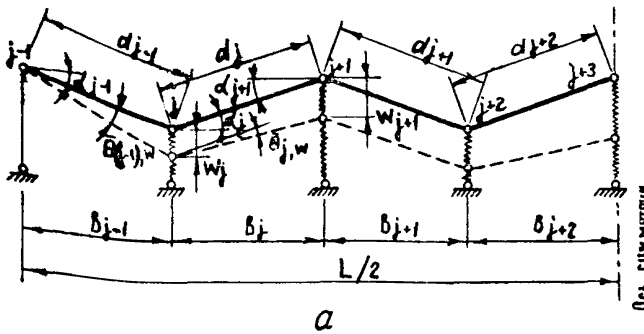
$$\sin \bar{\theta}_{(j-1)w} = \frac{(W_j - W_{(j-1)w}) \cos \alpha_j}{d_0}, \quad \sin \theta_{jw} = \frac{(W_j - W_{(j+1)w}) \cos \alpha_j}{d_0} \qquad /29/$$

где W_{j-1}, W_j, W_{j+1} – прогибы опорной конструкции.

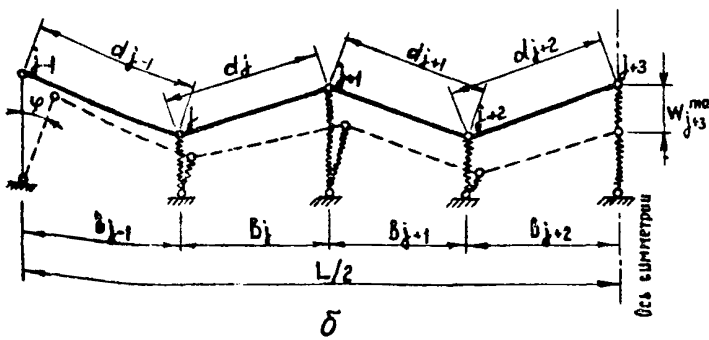
2/ крайний пролет / рис.7,б/:

$$\theta_{jw} = \pm \frac{\varphi}{i-2} \quad . \qquad /30/$$

где φ – угол поворота опорного сечения / j -I = 0/балки, его можно определить по формуле



а



б

Рис.7. Расчетные схемы опорных сечений покрытия:
а – для среднего пролета; б – для крайнего пролета.

$$tg\,\varphi = \frac{W_{j+3}^{max}}{L} \qquad /31/$$

где W_{j+3}^{max} – максимальный прогиб опорной конструкции /балки/ по средине пролета;

L – пролет опорной конструкции.

В формуле /28/ знак плюс ставится при j четном, а знак минус – при j нечетном; в формуле /30/ знаки ставятся наоборот.

5.3. Искомое начальное значение изгибающего момента определяют из решения системы уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
\theta_{jw} &= \frac{d_o}{6EJ}\left[M_{(j-1)o} + 4M_{jo} + M_{(j+1)o}\right] \\
\theta_{(j+1)w} &= \frac{d_o}{6EJ}\left[M_{jo} + 4M_{(j+1)o} + M_{(j+2)o}\right] \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
\theta_{(i-1)w} &= \frac{d_o}{6EJ}\left[M_{(i-2)o} + 4M_{(i-1)o} + M_{io}\right]
\end{aligned}\right\} \quad /32/$$

Значения этих моментов по концам опорных конструкций определяются начальными условиями.

5.4. В случае, если панели-оболочки соединены между собой шарнирно, т.е. $M_{(j-1)o} = M_{(j+1)o} = M_{(j+3)o} = 0$, начальные моменты определяются по формуле

$$M_{jo} = \frac{3EJ}{2d_o}\,\theta_{jw} \,. \qquad /33/$$

Вычисленные значения начальных моментов вводятся в систему /I4/ - первый член матрицы столбца /2I/ и дальше решение осуществляется в той же последовательности / I4-24 /.

5.5. Прогибы опорной конструкции W_j, W_{j+1} находят по нагрузке, равной контактному давлению от элементов волнистого покрытия / табл.I/.

5.6. Учет поперечных изгибающих моментов от податливости опорных конструкций может производиться без повторного решения системы I4 с использованием графика, приведенного на рис.8.

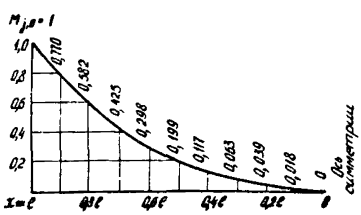
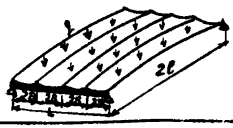
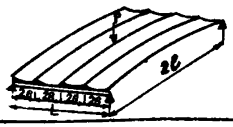
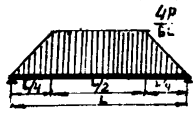
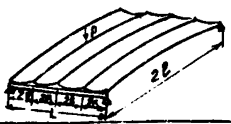
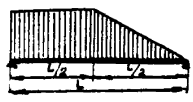
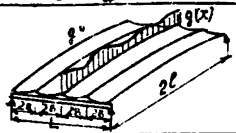
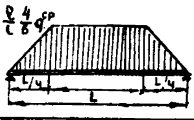
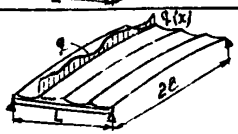
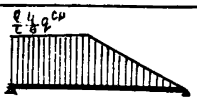


Рис.8. Изменение значений начального опорного момента по длине пролета панели-складки.

Таблица 1

N п. п.	Схема нагрузки на ячейку покрытия	Расчетная схема эквивалентной нагрузки на опорную конструкцию	Примечания
1			Соотношение $\frac{2\ell}{L}$ должно быть в пределах 0,5÷0,25
2			То же
3			Соотношение $\frac{2\ell}{L}$=0,35÷0,25
4			Соотношение $\frac{2\ell}{L}$=0,5÷1,25
5			Соотношение $\frac{2\ell}{L}$=0,35÷0,25

Равномерно распределенную нагрузку на покрытие от собственного веса панелей оболочек, прикладываемую до замоноличивания швов между оболочками, рекомендуется принимать в расчете равномерно распределённой на опорную конструкцию по всей её длине.

5.7. Для этого начальные значения поперечных изгибающих моментов в опорных сечениях определяются по формулам /32/ или /33/, а затем распределяются по пролету складки по закону, приведенному на графике рис.8*.

5.8. Полученные в п.5.7 величины поперечных изгибающих моментов от учета податливости опорных конструкций суммируются с их значениями, вычисленными от заданной нагрузки.

5.9. Опорные конструкции рекомендуется рассчитывать с учетом совместной работы их с элементами покрытия. Эквивалентные распределительные нагрузки на опорные конструкции, работающие по балочной схеме, определяются в зависимости от вида нагрузки, действующей на волнистое покрытие /табл.I/.

Пример расчета

Задано волнистое покрытие в виде системы четырех панелей-складок, подкрепленных продольным вертикальным ребром /килем/ переменной геометрии. Основная система такого покрытия представлена на рис.6.

Геометрические характеристики панели-складки /см.рис.5,в и 4,б/: $l = 1{,}8$ м, $\delta = 0{,}007$ м, $d(x) = const = d_0 = 0{,}209$м, $f_2 = 0{,}184$ м, $f_1 = 0{,}084$ м, $(f_2 - f_1) = 0{,}1$ м, $c_0 = 0{,}027$ м, $\bar{\delta} = 0{,}018$, $\delta' = 0{,}022$ м, $\Delta F_0 = 0{,}000448$ м^2 $\alpha_j = 18^0 50'$, $\sin\alpha_j = \pm 0{,}323$ /знак минус, если j -нечетное и знак плюс - при j четном/: $\Delta F = 0{,}00018$ м^2 $\Delta F^* = 0{,}00046$ м^2, нагрузка полосовая вдоль пятого ребра $p_5 = 200$ кг/м. Панели складки соединены между собой шарнирно по верхним ребрам, крайние ребра свободны. По торцам складки оперты на балки с $l = 2{,}4$ м и $EJ = 65{,}5 \cdot 10^{10}$ кг/м^2.

Изменение высоты киля задано по закону квадратной параболы, в связи с чем по формуле /I/ определяем высоту вертикального ребра /киля/ в сечениях по пролету покрытия:

---

* Для панелей-оболочек с переменной геометрией это идет в небольшой запас прочности.

$$Z_p(x) = -\frac{0,084 - 0,027}{1,8\ м^2}\ x^2 + 0,084$$

Таблица 2

Абсцисса сечения x в м	0	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44	1,62	1,80
Высота ребра /x/ в м	0,08399	0,08343	0,08172	0,07886	0,07487	0,06974	0,06347	0,05606	0,04750	0,03781	0,02697

Площадь и статический момент оболочки определяем по формулам /2/.

$F_{об} = 2 \times 0,00046 + 2 \times 0,0007 \times 0,309 + 0,00018 = 0,00543\ м^2$

$S_{об} = 2 \times 0,00046 + 0,007 \times 0,309\ /x/0,184 - 0,084/ = 0,000308$

Координаты центра тяжести сечения панели-складки в тех же точках, для которых определена и высота ребра вычисляем по формуле /3/:

$$Z_o(x) = \frac{0,000308 - 0,0127\ 0,084 - 0,0176\ x^2 / - 0,000448\ /}{0,084 - 0,0176\ x^2\ /\ \ 0,00543 + 0,039\ \ 0,084 - 0,0176\ x^2 /}$$

Таблица 3

Абсцисса сечения x в м	0	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44	1,62	1,80
Координаты центра тяжести сечения /x/ в м	0,02184	0,02206	0,02272	0,02382	0,02535	0,02730	0,02968	0,03247	0,03565	0,03921	0,04312

Площадь эквивалентного стрингера, заменяющего продольное вертикальное ребро, определяем по формуле /4/ для тех же точек:

$$\Delta F''/x/ = \Big(\big[-0{,}0176x^2 + 0{,}084 \big] \Big\{ 0{,}018 \big[0{,}5/-0{,}0176\,x^2 + 0{,}084/ + Z_o/x/\big]^2 + 0{,}011 \big[0{,}33/ - 0{,}176x^2 + 0{,}084 / + Z_o/x/\big]^2 \Big\} + 0{,}0448 \big[-0{,}0176\,x^2 + 0{,}084 + Z_o/x/\big]^2 + 0{,}0021/ - 0{,}0176\,x^2 + 0{,}084/^3 \Big) // Z_o^2(x).$$

Таблица 4

Абсцисса сечения x в м	0	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44	1,62	1,80
Площадь эквивалентного стрингера /x/ в м	0,03087	0,03000	0,02756	0,02400	0,01990	0,01576	0,01197	0,008721	0,00608	0,00403	0,00248

Момент инерции поперечного сечения панели-складки по середине пролета вычисляем по формуле /8 /:

$$J_o = 0{,}00046/0{,}1 - 0{,}02184/^2 + 0{,}00216/0{,}05 - 0{,}2184/^2 + 0{,}00000181 + 0{,}0052/0{,}5 \times 0{,}08399 + 0{,}02184/^2 + 0{,}00092 / 0{,}02184 + \frac{1}{3} 0{,}0008399/^2 + 0{,}000448/0{,}02184 + 0{,}08399/^2 + 0{,}0021 \times 0{,}08399 = 2{,}3 \times 10^{-5}\ м^4.$$

Эквивалентные изгибающие моменты для каждой j-й грани складки в сечениях x вычисляются по формуле /9 /::

$$M_5^{экв}/x/ = \frac{2{,}3 \times 10^{-5}/1{,}620-0{,}5x^2 / \quad 0{,}1 - Z_o/x/}{/0{,}1-0{,}0155/ \Big\{ \big[0{,}00046+0 \big] \big[0{,}1 - Z_o/x/\big]^2 + 0{,}0216x}$$

$$\times \Big[\frac{1}{2} \times 0{,}1 - Z_o/x/ \Big]^2 + / \; 0{,}00018 + 0{,}05160 \; / Z_o^2(x)$$

где / 1,62 - 0,5 / = M_5^0 / x/.

Таблица 5

Абсциссы сечения x в м	0	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44	1,62	1,80
Эквивалентн. изгибающий момент M в м	1,825	1,817	1,792	1,749	1,683	1,589	1,455	1,268	1,000	0,607	0,000

Так как действующая нагрузка полосовая, $M_4^{экв}/x/ = M_3^{экв}/x/ = M_2^{экв}/x/ = 0$. Функцию $M_5^{экв}/x/$ /по ее значениям в II точках/ определяем методом наименьших квадратов в виде полинома шестой степени /четными членами - в виду симметрии задачи/.

$$M_0 + [x^2] M_2 + [x^4] M_4 + [x^6] M_6 = [M] :$$
$$[x^2] M_0 + [x^4] M_2 [x^6] M_4 + [x^8] M^6 = [Mx^2] ;$$
$$[x^4] M_0 + \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$[x^6] M_0 + [x^8] M_2 + [x^{10}] M_4 + [x^{12}] M_6 = [Mx^6];$$

где $n = II$, $[X^n] = x_I^n + x_2^n + x_3^n + \ldots\ldots\ldots\ldots x_{II}^n$

$$[M] = M_I + M_2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots M_{II}$$

Значения M_I, M_2 ..... M_{II} приведены в табл.4.

В численном виде система имеет вид:

II	I2,474	26,394	67,290	I4,7860
I2,474	26,594	67,290	I84,839	I0,3377
26,594	67,290	I84,839	523,520	I5,33I6
67,290	I84839	523,520	I58I,884	28,3967

Решения полученной системы - искомые коэффициенты полинома $M_5^{экв}/x/$ / формула I0 /:

$$M_5^{экв}/x/ = I,828 - 0,275Ix^2 - 0,0068x^4 - 0,0253x^6$$

Ошибка от представления $M_5^{экв}/x/$ полиномом не превышает I% / рис.3 /.

$$P_5^{экв}/x/ = 0,5502 + 0,08I7x^2 + 0,7609x^4$$
$$P_4^{экв}/x/ = P_3^{экв}/x/ = P_2^{экв}/x/ = P_I^{экв}/x/ = 0$$

Коэффициенты правой части алгебраических уравнений /грузовые коэффициенты/ для каждого ребра по формуле / I2/.

$j = 5$

$$R_{5,0}^{экв} = - \frac{0,5502}{0,309 \quad -0,323} = 5,5I2 \qquad / n = 0 /$$

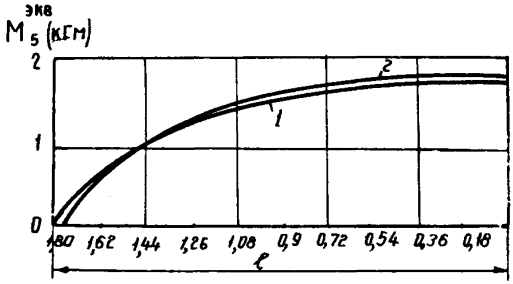


Рис.9. Эквивалентный изгибающий момент:
I – вычисленный по формуле /9/;
2 – вычисленный по формуле /I0/

$$R^{экв}_{5,2} = -\frac{0,0818}{0,309 \quad -0,323} = 0,818, \qquad / \; n = 2 \; /.$$

$$R^{экв}_{5,4} = -\frac{0,7609}{0,309 \quad -323} = 7,624, \qquad / \; n = 4 \; /.$$

$j = 4$

$$R^{экв}_{4,0} = \frac{0,5502}{2x0,309 \quad -0,323} = -2,756, \quad / \; n = 0 \; /;$$

$$R^{экв}_{4,2} = \frac{0,0817}{2x0,309 \quad -0,323} = -0,409, \quad / \; n = 2 \; /;$$

$$R^{экв}_{4,4} = \frac{0,7609}{2x0,0309 \quad -0,323} = -3,812, \quad / \; n = 4 \; /.$$

Для $j = 3,2,1$ и $R^{экв}_{jn} = 0$.

Геометрические коэффициенты контурной линии для двухгранной складки по формуле /7/ составляют:

$$S_{44} = \frac{2}{0,309 \times Sin/2x18^{0}50'/} = 34,6.$$

$$S_{42} = S_{24} = \frac{1}{0,309 \times [-Sin/2x18^{0}50/]} = -17,3$$

Дополнительные множители, учитывающие переменные геометрические параметры складок, по формуле /I3/ составляют:

$$\sum_{n=0}^{n} m_{4n} x^n = \frac{0{,}5502 + 0{,}0817\,x^2 + 0{,}7609x^4}{I} = 0{,}5502 + 0{,}0817x^2 + 0{,}7609x^4$$

где $I = P_5\,/x/$ – заданная единичная равномерная нагрузка вдоль пятого ребра.

Множители m_{4n} моментных членов S алгебраических уравнений приведены в табл.6, которая представляет собой систему алгебраических уравнений /I4/ по определению коэффициентов полиномов, выражающих искомые усилия.

Система уравнений, в которой коэффициенты при неизвестных определены по формулам /I9/, имеет вид, приведенный в табл.7.

После решения системы уравнений / табл.7/ определяем по формулам /22/ искомые напряжения и моменты в ребрах складчатого покрытия:

$$\sigma_5\,/x/ = /\,-77{,}9898 + 11{,}7526x^2 + 0{,}2908x^4 + 1{,}0337x^6\,/\,X\ 10^4\ кг/м^2;$$
$$\sigma_4\,/x/ = /\,3{,}6722 - 0{,}55\,11x^2 - 0{,}0138x^4 - 0{,}0512x^6/\ x\ 10^4\ кг/м^2;$$
$$\sigma_3\,/x/ = /\,-0{,}5626 + 0{,}0846x^2 + 0{,}0021x^4 + 0{,}0078x^6\ /\ 10^4\ кг/м^2;$$
$$\sigma_2\,/x/ = /0{,}0133 - 0{,}0032x^2 - 0{,}0000x^4 - 0{,}0001x^6/x\ 10^4\ кгм/м^2;$$
$$\sigma_1\,/x/ = 0;$$
$$M_4\ /\ x/ = /\,-0{,}1528 + 0{,}0479x^2 - 0{,}0002x^4 - 0x^6\ /\ 10^4.$$

Прогибы для j -го ребра определяются по формулам /23 и 24 /. В качестве примера рассмотрим определение прогибов для среднего / $j = 5$ / ребра фрагмента:

$$W_5\,/x/ = \frac{I\ 10^4}{2x0{,}309x3{,}5x10^9\ x0{,}323}\ x$$

$$x\left[\frac{/3{,}6722 + 2x77{,}9898 + 3{,}6722/\ /1{,}8^2 - x^2}{I\ x\ 2} + \right.$$

$$\left. + \frac{/\,-0{,}55\,11 - 2x11{,}7526 - 0{,}55\,11/\ /1{,}8^4 - x^4}{/\ 2 + I\ /\ /\ 2 + 2\ /} + \right.$$

$i=5$
$n=6$

Таблица 6

	σ_m / i_0	$\sigma_{10}\ \sigma_{12}\ \sigma_{14}\ \sigma_{16}$	$\sigma_{20}\ \sigma_{22}\ \sigma_{24}\ \sigma_{26}$	$\sigma_{30}\ \sigma_{32}\ \sigma_{34}\ \sigma_{36}$	$\sigma_{40}\ \sigma_{42}\ \sigma_{44}\ \sigma_{46}$	$\sigma_{50}\ \sigma_{52}\ \sigma_{54}\ \sigma_{56}$	$m_{40}\ m_{42}\ m_{44}\ m_{46}$	Своб. члены
$j=1$	0	$\ell^0\ \ell^2\ \ell^4,\ \ell^6$						0
	2	$B_{1,1,2}$	$a_{1,2,2}$	0	0	0	0	экв. $R_{1,0,P}$
	4	$B_{1,1,4}$	$a_{1,2,4}$					экв. $R_{1,2,P}$
	6	$B_{1,1,6}$	$a_{1,2,6}$					экв. $R_{1,4,P}$
$j=2$	0		$\ell^0\ \ell^2\ \ell^4\ \ell^6$					$\delta_2(2\varepsilon)$
	2	$a_{2,1,2}$	$B_{2,2,2}$	$a_{2,3,2}$	0	0	$m_{40}\cdot S_{2,4}$	экв. $R_{2,6,P}$
	4	$a_{2,1,4}$	$b_{2,2,4}$	$a_{2,3,4}$			$m_{42}\cdot S_{2,4}$	экв. $R_{2,2,P}$
	6	$a_{2,1,6}$	$B_{2,2,6}$	$a_{2,3,6}$			$m_{44}\cdot S_{2,4}$	экв. $R_{2,4,P}$
$j=3$	0			$\ell^0\ \ell^2\ \ell^4\ \ell^6$				0
	2	0	$a_{3,2,2}$	$B_{3,3,2}$	$a_{3,4,2}$	0	0	$R_{3,0,P}$
	4		$a_{3,2,4}$	$B_{3,3,4}$	$a_{3,4,4}$			$R_{3,2,P}$
	6		$a_{3,2,6}$	$B_{3,3,6}$	$a_{3,4,6}$			$R_{3,4,P}$
$j=4$	0				$\ell^0\ \ell^2\ \ell^4\ \ell^6$			0
	2	0	0	$a_{4,3,2}$	$B_{4,4,2}$	$a_{4,5,2}$	$m_{40}\cdot S_{44}$	$R_{4,0,P}$
	4			$a_{4,3,4}$	$B_{4,4,4}$	$a_{4,5,4}$	$m_{42}\cdot S_{44}$	$R_{4,2,P}$
	6			$a_{4,3,6}$	$B_{4,4,6}$	$a_{4,5,6}$	$m_{44}\cdot S_{44}$	$R_{4,4,P}$
$j=5$	0					$\ell^0\ \ell^2\ \ell^4\ \ell^6$		0
	2	0	0	0	$a_{5,4,2}$	$B_{5,5,2}$		$R_{5,0,P}$
	4				$a_{5,4,4}$	$B_{5,5,4}$		$R_{5,2,P}$
	6				$a_{5,4,6}$	$B_{5,5,6}$		$R_{5,4,P}$
$j=4$	0						$\ell^0\ \ell^2,\ \ell^4\ \ell^6$	0
	2	0	$-m_{40}\cdot S_{4,2}$	0	$-m_{4,0}\cdot S_{4,4}$	0	$d_{2,2,2}$	$\theta_{4,0}$
	4		$-m_{42}\cdot S_{4,2}$		$-m_{42}\cdot S_{4,4}$		$d_{4,4,4}$	$\theta_{4,2}$
	6		$-m_{44}\cdot S_{4,2}$		$-m_{44}\cdot S_{4,4}$		$d_{6,6,6}$	$\theta_{4,4}$

$$+\ \frac{/-0.0138-2\times 0.2908-0.0132/\ /1.8^6-x^6/}{/4+1/\ /4+2/}\ +$$

$$+\ \frac{/-0.0512-2\times 1.0839-0.0512/\ /1.8^8-x^8/}{/6+1/\ /6+2/}\Bigg].$$

Таблица 7

$\sigma_{\text{м}}$ / n		$\sigma_{10}\sigma_{12}\sigma_{14}\sigma_{16}$	$\sigma_{20}\sigma_{22}\sigma_{24}\sigma_{26}$	$\sigma_{30}\sigma_{32}\sigma_{34}\sigma_{36}$	$\sigma_{40}\sigma_{42}\sigma_{44}\sigma_{46}$	$\sigma_{50}\sigma_{52}\sigma_{54}\sigma_{56}$	$M_{43}M_{42}M_{44}M_{46}$	свободн. члены
1	0	1 3,24 10,60 34,00						0
	2	0,00380	0,00072	0	0	0	0	0
	4	0,0228	0,00432					0
	6	0,0570	0,0108					0
2	0		1 3,24 10,50 34,00					0
	2	0,00072	0,065	0,00072	0	0	-9,42	0
	4	0,00432	0,390	0,00432			-1,40	0
	6	0,0108	0,970	0,0108			-13,00	0
3	0			1 3,24 10,60 34,00				0
	2	0	0,00072	0,00472	0,00072	0	0	0
	4		0,00432	0,0283	0,00432			0
	6		0,0108	0,0708	0,0108			0
4	0				1 3,24 10,50 34,00			0
	2	0	0	0,00072	0,065	0,00072	18,84	-275,6
	4			0,00432	0,390	0,00432	2,80	-40,9
	6			0,0108	0,970	0,0108	26,00	-381,2
5	0					1 3,24 10,50 34,00		0
	2	0	0	0	0,00072	0,00472	0	551,2
	4				0,00432	0,0283		81,8
	6				0,0108	0,0708		762,4
4	0						1 3,24 10,50 34,00	0
	2	0	9,42	0	-18,84	0	$144,2\cdot10^5$	0
	4		1,40		-2,80		$860\cdot10^5$	0
	6		13,00		-26,00		$216\cdot10$	0

W_5 / 0 / = 0,003405 м; W_5 /0,36/ = 0,003254 м;
W_5 /0,54/ = 0,003067 м; W_5 /0,72/ = 0,002807 м;
W_5 /0,90/ = 0,002478 м; W_5 /I,08/ = 0,002083 м;
W_5 /I,26/ = 0,00I628 м; W_5 /I,44/ = 0,00II2I м;
W_5 /I,62/ = 0,000573 м; W_5 /I,8 / = 0.

Определяем дополнительные усилия, возникающие в складчатой системе при учете податливости опор. Нагрузку на опорные балки при действии полосовой нагрузки вдоль среднего ребра принимаем по схеме 4 табл.I.

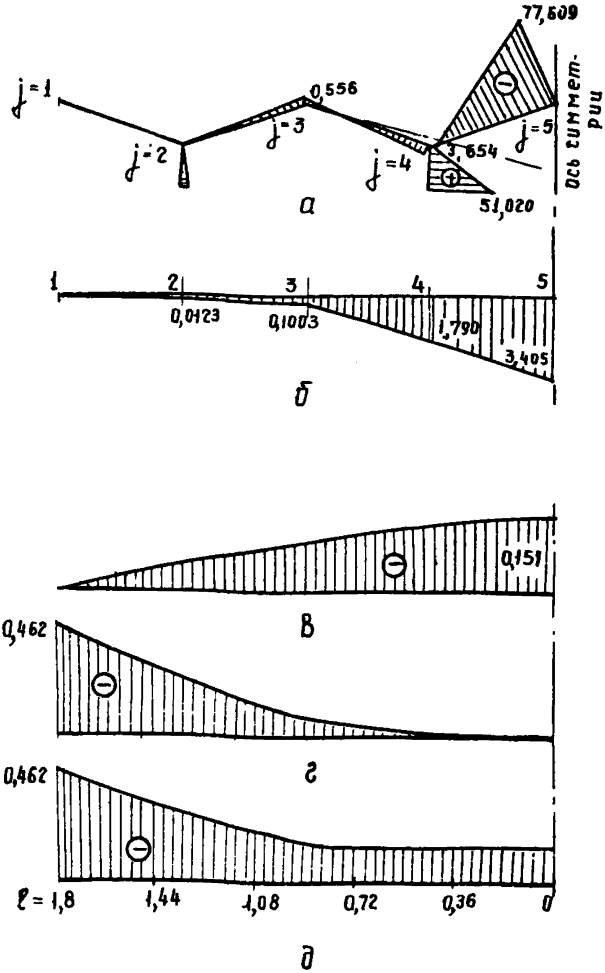


Рис.10. Результаты расчета складчатого покрытия:
а – продольные напряжения в среднем поперечном сечении фрагмента; б – прогибы в том же сечении; в – поперечные моменты M_4 при опирании фрагмента на жесткие опорные конструкции; г – изменения начального опорного момента M, вызванного податливостью опорных конструкций; д – моменты M_4 при опирании на податливые конструкции /суммарная эпюра/

Прогибы опорной балки от заданной нагрузки в точках опирания ребер 3,4 и 5, вычисленные как для однопролетной упругой балки, имеют величины:

$W_5 = 0{,}00195$ м; $W_4 = 0{,}00181$ м; $W_3 = 0{,}00136$ м.

Углы поворота 3 и 4 граней в опорном сечении определяем по формуле /29 /:

$$\sin\bar{\theta}_{4w} = \frac{/\,0.195 - 0.181\,/\ 10^{-2}}{0{,}309} \times 0{,}948 = -0{,}000428$$

$$\sin\bar{\theta}_{3w} = \frac{/\,0.136 - 0.181\,/\ 10^{-2}}{0{,}309} \times 0{,}948 = -0{,}00138.$$

Взаимные углы поворота граней/формула 28/

$$\theta_{jw} = -0{,}00138 + 0{,}000428 = -0{,}000952$$

Начальный /опорный/ поперечный изгибающий момент, возникающий от взаимного поворота граней, по формуле /33/ составляет

$$M_{4,0} = \frac{3\times0.007^3\times3.5\times10^9}{12\times2\times0{,}309} \times /-0{,}000952/ = -0{,}462 \text{ кгм}$$

Полученные значения $M_{4,0}$ вводятся в правую часть системы уравнений /14/ /вектор $R_{\text{упр}}^{\text{экв}}$ - в блок /26/ и система снова решается при действии только $M_{4,0}$ / внешняя нагрузка отсутствует/. Полученные усилия суммируются с усилиями, полученными выше - при жестких опорных конструкциях.

Результаты примера расчета приведены на рис.10.

П р и л о ж е н и е

РАСЧЕТ ВОЛНИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА ЭВМ М - 222

1. Описанный выше алгоритм заложен в основу программы расчета волнистой системы. Программа написана на языке "АЛГОЛ-60" и реализована транслятором ТА-1М для ЭВМ М-222. Блок-схема программы представлена на рисунке.

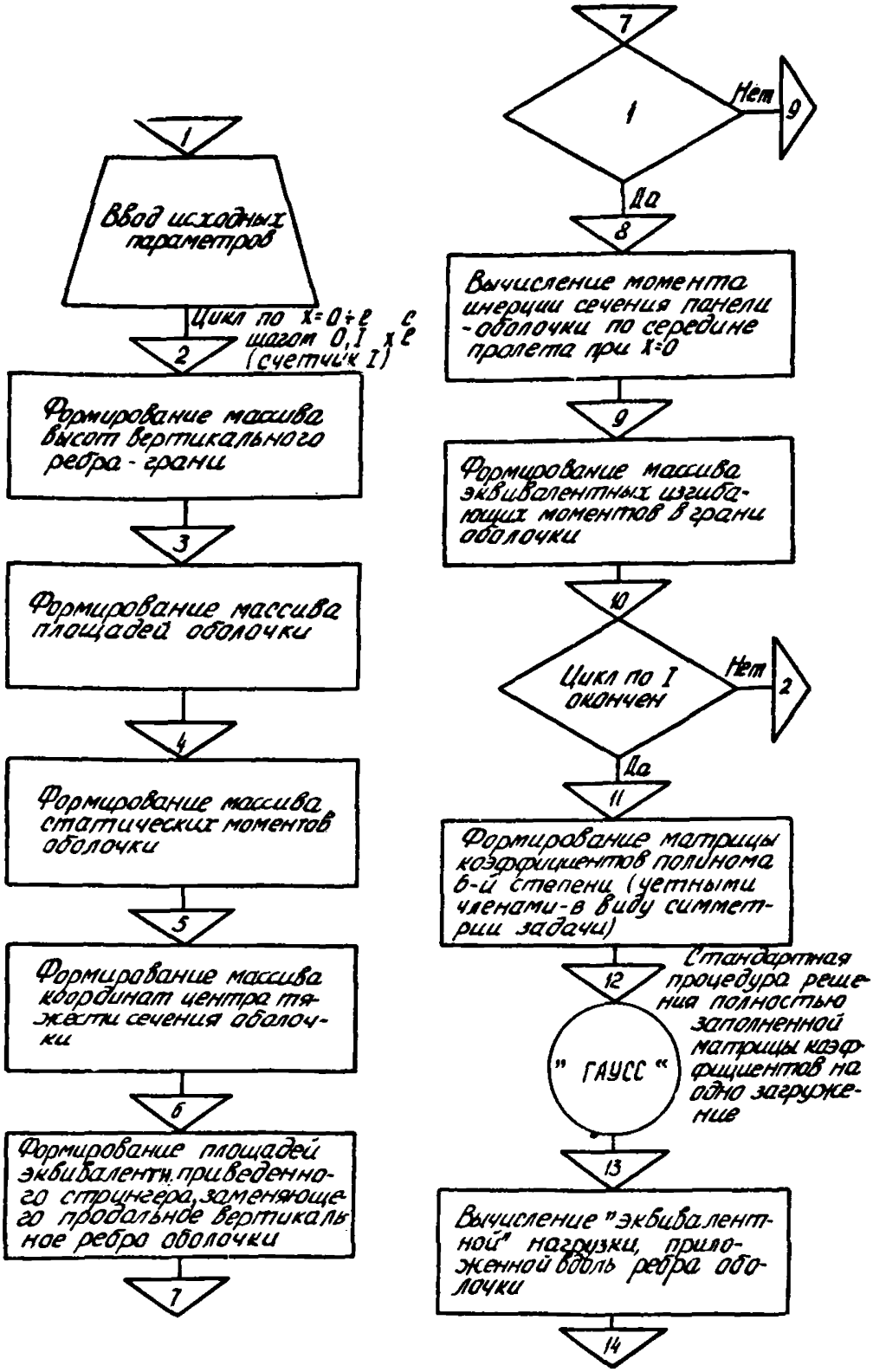
2. Возможные расчетные схемы и нагрузки. Программа позволяет рассчитывать волнистое покрытие, состоящее из четырех панелей-складок /панелей-оболочек/ с переменными или

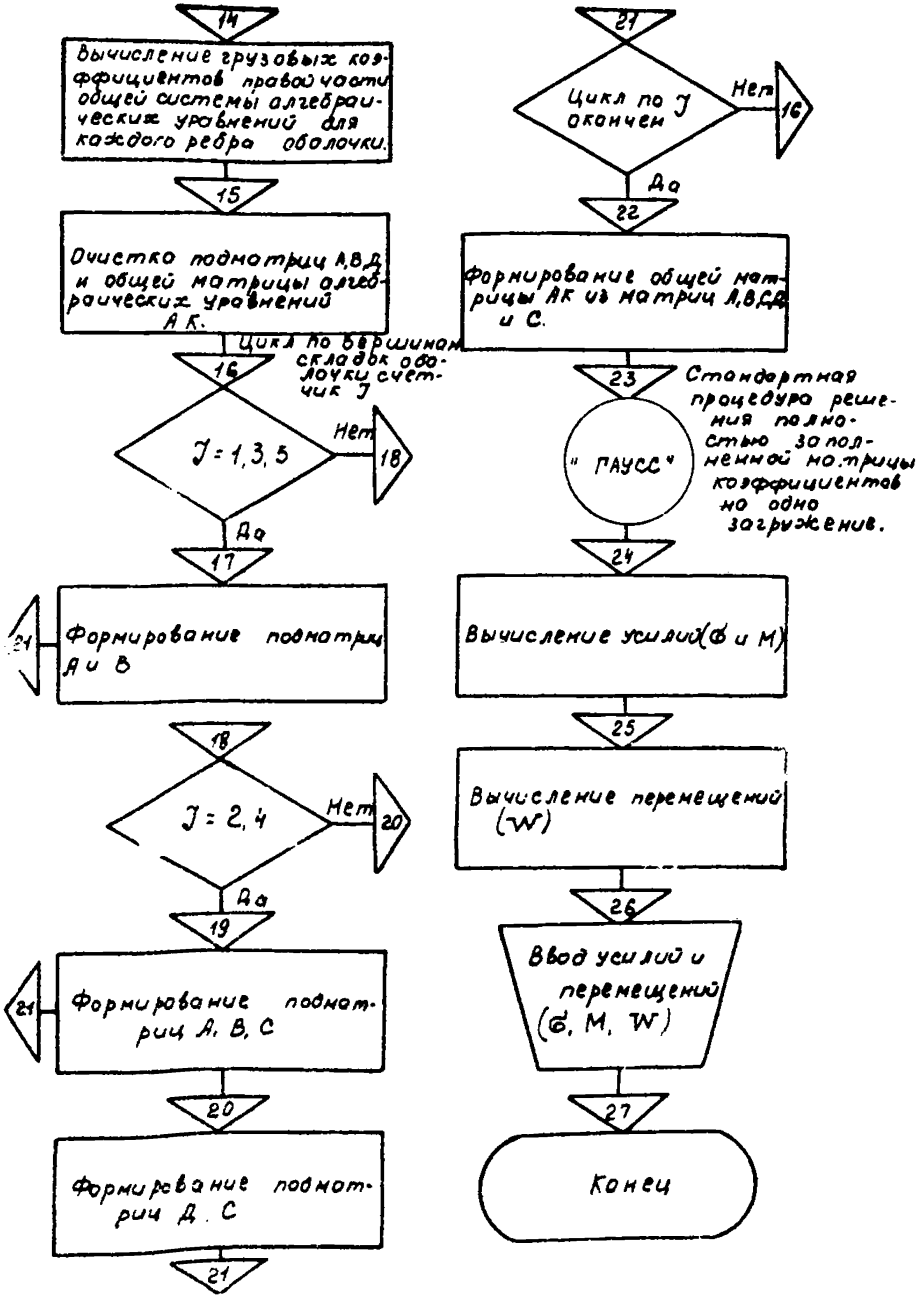
постоянными по длине геометрическими параметрами, подкрепленных продольными ребрами в местах сопряжения граней или без ребер. Толщина и материал различных граней и ребер могут быть неодинаковыми. Панели-складки опираются на жесткие в своей плоскости и идеально гибкие из плоскости диафрагмы. По продольным сторонам оболочки считаются шарнирно-сопряженными между собой. Нагрузка полосовая вдоль j -го ребра, постоянная или же изменяющаяся достаточно произвольно, но "эквивалетный" изгибающий момент в j -й грани от этой нагрузки описывается полиномом шестой степени.

3. В программе начало координаты x принято в середине пролета. Подкрепляющие ребра с переменной геометрией приняты под нечетными значениями j .

4. Программой предусмотрена выдача значений напряжений σ , моментов M и прогибов W для каждого ребра в 20 промежуточных точках по его длине.

Ограничения об"ема задачи, принятые в программе, вызваны соображениями упрощения программы, а не методом расчета, который пригоден для широкого круга задач по расчету волнистых покрытий.


1
Ввод исходных параметров
Цикл по X=0÷ℓ с шагом 0,1 ℓ (счетчик I)
2
Формирование массива высот вертикального ребра - грани
3
Формирование массива площадей оболочки
4
Формирование массива статических моментов оболочки
5
Формирование массива координат центра тяжести сечения оболочки
6
Формирование площадей эквивалентн. приведенного стрингера, заменяющего продольное вертикальное ребра оболочки
7
7
1
Нет
9
Да
8
Вычисление момента инерции сечения панели - оболочки по середине пролета при X=0
9
Формирование массива эквивалентных изгибающих моментов в грани оболочки
10
Цикл по I окончен
Нет
2
Да
11
Формирование матрицы коэффициентов полинома 6-й степени (четными членами - в виду симметрии задачи)
12
" ГАУСС "
Стандартная процедура решения полностью заполненной матрицы коэффициентов на одно загружение
13
Вычисление "эквивалентной" нагрузки, приложенной вдоль ребра оболочки
14



Блок-схема программы расчета волнистого покрытия

ПРОГРАММА

```
BEGIN INTEGER M,T1,I,J,K,K1,K2,K3,K4,K5,K6,I2 ;
      REAL M,T,A,F,F1,F2,FA,FB,FO,A,A1,B,B1,C,SA,X,PI,R,
      R1,R2,R3,A2,A3,A4,E ;
      ARRAY ZP,ZX,FX,FMX,SX,PM1[1:11],PB,PA[1:4,1:4],
      PA[1:4],PM[1:3],AK[1:24,1:24],AKQ[1:24,1:25],
      Q[1:24],PBA[1:4,1:5] ;
    PO042(M) ;
    PO042(M,T,A,F1,F2,C,B,B1,F,FA,FB,SA,FO,E) ;
    PO165(1,      '10 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ') ;
    P1041(M,M,T,A,F1,F2,C,B,B1,F,FA,FB,SA,FO,E);
    BEGIN X:=0 ;
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 11 DO
        BEGIN ZP[I]:=F1-((F1-C)*X↑N)/M↑N ; R2:=F2-F1 ;
          P1:=(FO-R2)*X↑N/M↑N ; R3:=T*(R1+R2)/SA ;
          FX[I]:=2*FB+2*R3+F ;
          SX[I]:=2*FB*(R1+R2)+R3*(R1+R2) ; R1:=B*ZP[I] ;
          P3:=B1*ZP[I] ;
          ZX[I]:=(B*[I]-ZP[I]*(R1/2+R3/6+FA))/(FX[I]+R1+
            R3/2+FA) ;
          FMX[I]:=(ZP[1]*(B*(ZP[I]/2+ZX[I])↑2+B1/2*
            (ZP[I]/3+ZX[I])↑2)+FA*(ZP[I]+ZX[I])↑2+
            ZP[I]↑3*(B/12+B1/36))/ZX[I]↑2 ;
          IF I=1 THEN GO TO M15 ;
          PI:=(FB+F)*(P2-ZX[I])↑2+T*A*(R2/2-ZP[I])↑2+T*
            R2↑2*A/12+F*ZX[I]↑2+B*ZP[I]*
            (ZX[I]+ZP[I]/2)↑2+B1/2*ZP[I]*
```

```
        (ZX[I]+ZP[I]/3)↑2*FA*(ZP[I]+ZX[I])↑2+ZP[I]↑3*
        B/12+ZP[I]↑3*B1/36;
M15:  R1 :=R2-ZX[I];
      PM1[I]:=(P1*R1*(H↑2-X↑2)/2)/((R2-ZX[I])*
        ((FB+F)*R1↑2+Д*T*(R2/2-ZX[I])↑2+(F+FNX[I])*
        ZX[I]↑2)) ;
      X:=X+H/10;
    END
  A:=0;
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
    BEGIN FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
        BEGIN R1:=X:=0 ;
          FOR 12:=1 STEP 1 UNTIL 11 DO
            BEGIN IF A=0 THEN
                BEGIN R1:=11 ;
                  GO TO M16
                END ;
              R1:=R1+X↑A ; X:=X+H/10
            END ;
M16       PB[I,I1]:=R1;  A:=A+2 ;
      - END ;
      A:=A-6 ;
    END ;
  A:=0,
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
    BEGIN X:=R3:=0 ;
```

```
        FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 11 DO
          BEGIN IF A=0 THEN X:=1 ;
            R3:=R3+PM1[I1]*X↑A ; X:=X+H/10 ;
          END ;
        A:=A+2 ; PA[I]:=R3 ;
      END ;
    FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
      BEGIN FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 5 DO
          BEGIN IF I1=5 THEN A:=PA[I] ELSE A:=PB[I,I1] ;
            PBA[I,I1]:=A ;
          END
      END ;
    P1052(5,4,PBA) ;
    FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO PA[I];=PBA[I,5] ;
    PM[1]:=-2*PA[2] ; PM[2]:=-12*PA[3] ;
    PM[3]:=-30*PA[4] ;
    FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO G[I];=0 ;
    A:=1/2 ; K;=13 ; K1:=0 ;
M17:  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 3 DO
      BEGIN G[K+I]:=-100*A*PM[I]/(Д*SA) ;
      END ;
    IF K1=1 THEN GO TO M18 ;
    K1:=1 ; A:=-1 ; K:=17 ;
    GO TO M17 ;
M18:  R:=1/(SA*SQRT(1-SA↑2)*Д↑2) ; R1:=-R/2 ;
    FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO
```

```
  BEGIN FOR II:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO
      BEGIN AK[I,II];=0
      END
  END
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
  BEGIN FOR II:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
      BEGIN PB[I,II]:=0 ; PA[I,II]:=0;
      END
  END ;
FOR J:=1 STEP 1 UNTIL 6 DO
  BEGIN PA[J]:=0 ; A1:=0 ; A2:=2*A*T/3 ;
    IF J=1 THEN
      BEGIN A3:=FB ;
        GO TO M10
      END
    IF J=2 THEN
      BEGIN A3:=F+FNX[1] ; A4;=R1 ;
        GO TO M10
      END ;
    IF J=3 THEN
      BEGIN A3:=2*FB ;
        GO TO M10
      END ;
    IF J=4 THEN
      BEGIN A3:=F+FNX[1] ; A4:=R ;
        GO TO M10
```

```
                END ;
              IF J=5 THEN A3;=2×FB ;
M10:          FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
                BEGIN IF I=4 THEN GO TO M9 ;
M9:               A:=0 :
                  IF I≠1 THEN
                    BEGIN AI:=A1+2 ,
                      GO TO M1
                    END ;
                  FOR I1:=I STEP 1 UNTIL 4 DO
                    BEGIN IF J=6 THEN
                        BEGIN РД[I,I1]:=H+A ;
                          GO TO M2
                        END ;
                      PB[I,I1]:=H+A ;
                      GO TO M2 :
M1 :                  IF J≠6 THEN GO TO M4 ;
                      РД[I,I1:=8×Д×A1×(A1-1)/T+3 ;
                      GO TO M3 ;
M4:                   PB[I,I]:=A1×(A1-1)×(A2+A3) ;
                      IF J=5 THEN GO TO M3 ;
                      PA[I]:=A1×(A1-1)×Д×T/6 ;
                      GO TO M3 ;
M2:                   A:=A+2 ;
                    END ;
M3:
```

```
            END ;
          K:=4*(J-1)+1 ; K4:=4*J+1 ;
          FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
            BEGIN K1:=K+I-1 ;
              IF J>4 THEN GO TO M7 ;
              K3:=K+I+3 ; K5:=K4+I-1 ; K6:=4*(J-1)+I ;
              AK[K1,K3]:=PA[I] ; AK[K5,K6]:=PA[I] ;
              IF J=2 OR J=4 THEN
                BEGIN IF I=4 THEN GO TO M7 ;
                  AK[K+I,20+I]:=A4*PM[I] ;
                END ;
M7:           FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
                BEGIN K2:=K+I1-1 ;
                  IF J=6 THEN GO TO M5 ;
                  AK[K1,K2]:=PA[I,I1] ;
                  GO TO M6 ;
M5:               AK[K1,K2]:=PB[I,I1] ;
M6:
                END ;
              IF J=6 THEN GO TO M8 ;
              IF I=4 THEN GO TO M8 ;
              AK[K+I,4+J]:=-PM[I]*R1 ;
              AK[K+I,12+I]:=-PM[I]*R ;
M8:
            END ;
        END ;
```

```
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO
        BEGIN AKQ[I,25]:=Q[I];
          FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO
            AKQ[I,I1]:=AK[I,I1] ;
        END;
      P1052(25,24,AKQ);
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO Q[I]:=AKQ[1,25];
      P0165(1,'     =10 УСЛОВИЯ     ');
      FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 6 DO
        BEGIN X:=0 ;
          FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
            PA[I1]:=Q[(I-1)*4+I1] ;
          FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 11 DO
            BEGIN R1:=0;
              FOR I2:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
                BEGIN IF X=0 THEN
                    BEGIN R2:=1 ;
                      GO TO M19
                    END;
                  R2:=X1((I2-1)*2);
M19:              R1:=R1+PA[I2]*R2
                END;
              X:=X+H/10 ; ZP[I1]:=R1
            END
          P1041(ZP) ;
        END;
```

```
        A4:=1/(2*A*E*SA) ;
        FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 5 DO
          BEGIN X:=0 ;
            FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
              BEGIN IF I=1 THEN PA[I1]:=0 ELSE
                  PA[I1]:=Q[((I-2)*4+I1)] ;
                IF I=5 THEN Z*[I1]:=PA[I1] ELSE
                  Z*[I1]:=Q[(I*4+I1)] ;
                PM[I1]:=Q[((I-1)*4+I1)] ;
              END ;
            P0165(1,      =10ПЕРЕМЕЩЕНИЯ      ) ;
            FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 11 DO
              BEGIN R1:=0 ; A1:=0 ;
                FOR I2:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
                  BEGIN R2:=(I2-1)*2 ;
                    R3:=(PA[I2]-2*PM[I2]+Z*[I2])/((R2+1)*
                      (R2+2)) ;
                    A2:=R3*X1(R2+2) ; A3:=P3*H*(R2+2) ;
                    R1:=R1+A2 ; A1:=A1+A3 ;
                  END ;
                X:=X+H/10 ; ZP[I1]:=A4*(A1-R1) ;
              END ;
            P1041(ZP)
          END ;
      END
END
```

Л И Т Е Р А Т У Р А

I. В а с и л ь к о в Б.С., М и л е й к о в с к и й И.Е. Экспериментально-теоретическое исследование сборной железобетонной оболочки.- В сб.: "Экспериментальные и теоретические исследования по железобетонным оболочкам". ГСИ, М., 1959.

2. В л а с о в В.З. Избранные труды, т.Ш. Тонкостенные пространственные системы. М., "Наука", 1964.

3. В л а с о в В.З. Тонкостенные упругие стержни, М., Физматгиз, 1959.

4. Госстрой СССР. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. СНиП П-В.1-62*. М., Госстройиздат, 1970.

5. Госстрой УССР. Временные указания по проектированию, изготовлению и возведению сборных железобетонных сводов двойной кривизны / РСН II-59/, К., 1960.

6. Л и п н и ц к и й М.Е., Г о р е н ш т е й н Б.В., В и н о г р а д о в Г.Г. Железобетонные пространственные покрытия зданий. Л.-М., Стройиздат, 1965.

7. НИИЖБ, ЦНИИСК. Инструкция по проектированию железобетонных тонкостенных пространственных покрытий и перекрытий. М., Стройиздат, 1961.

8. П а с т е р н а к П.Л. Железобетонные конструкции. Специальный курс для факультетов промышленного и гражданского строительства. М., Госстройиздат, 1961.

9. Практические методы расчета оболочек и складок покрытий, под редакцией Милейковского И.Е. М., ГСИ, 1970.

10. Ц е й т л и н А.А., К о л ч у н о в В.И. Расчет тонкостенных многоволновых покрытий переменного профиля.- В сб. "Оболочки в строительстве". К., "Будівельник", 1973.

11. Ц е й т л и н А.А., К о л ч у н о в В.И., К о к о т о в М.И. Напряженно-деформируемое состояние складчатой пространственной системы с переменными параметрами. -В сб. "Сопротивление материалов и строительная механика", вып.26, К., "Будівельник", 1975.

12. Цейтлин А.А. Сборные железобетонные пространственные покрытия, К., Госстройиздат УССР, 1964.

13. Цейтлин А.А., Колчунов В.И. Экспериментальное исследование модели фрагмента волнистого покрытия. – В сб."Строительные конструкции", вып.25, "Будівельник", К., 1975.

14. ЦНИИСК, НИИСК Госстроя СССР. Рекомендации по методам расчета оболочек складчатого типа, М., 1973.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Введение	3
I. Характеристики геометрии поверхности и исходные данные	4
2. Определение переменных и постоянных геометрических параметров панелей-оболочек	I2
3. Грузовые коэффициенты разрешающей системы уравнений	I5
4. Определение внутренних усилий и деформаций . . .	I7
5. Учет податливости опорных конструкций	22
Приложение	36
Пример расчета	36
Литература	48

Научно-исследовательский институт
строительных конструкций
Госстроя СССР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ВОЛНИСТЫХ ПОКРЫТИЙ

Редактор А.М. П а л а м а р е н к о
Технический редактор А.Н. Я с е в а
Корректор Е.М. Б р о д о в с к а я

БФ 23446. Подпис. к печ. 8/УП 1975 г. Формат бум. 60x84 1/16.
Изд. № 51. Печ. л. 3,25. Заказ 569. Тираж 500. Цена 17 коп.

Научно-исследовательский институт строительного производства
Госстроя УССР
Фотопечатная лаборатория НИИСП Госстроя УССР, Киев, Преображенская, 5/2

gost.e-ecolog.ru