

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОССТРОЯ СССР**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ВОЛНИСТЫХ ПОКРЫТИЙ**

КИЕВ — 1975

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОССТРОЯ СССР**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ВОЛНИСТЫХ ПОКРЫТИЙ**

К И Е В — 1975

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 предназначены 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"/.

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.УІ 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 ЭЦМ 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 ЭЦМ "Наира", "Промінь", "Мир"/. Такая универсальность и сравнительная простота предложенной методики делает ее пригодной для использования широким кругом специалистов-расчетчиков. Использование ЭЦМ 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 ЭЦМ, а также подтверждена экспериментальными исследованиями на моделях и натурных конструкциях волнистых покрытий.

1. Характеристики геометрии поверхности и исходные положения

1.1. Рекомендации предназначаются для расчета волнистых покрытий из упругих панелей-складок и панелей-оболочек с постоянными или переменными геометрическими параметрами сечения по длине /рис.1.2/.

1.2. Указанные в п.1.1. панели-оболочки могут иметь различные способы соединения между собой /жесткое, шарнирное/ и различные способы опирания по торцам /опирание на стены, упругие арки, балки, рамы/.

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

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

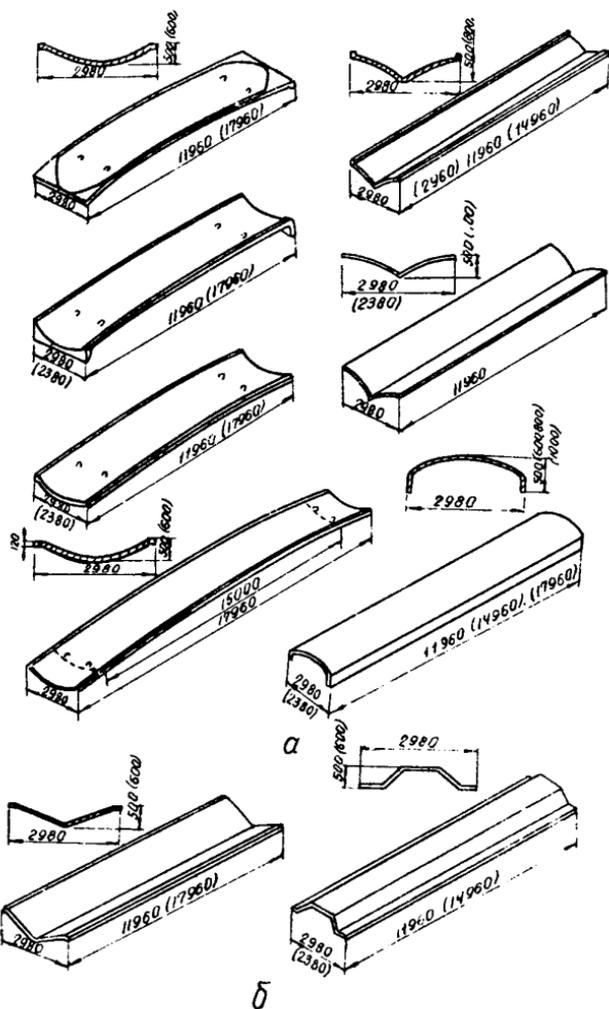


Рис. I. Панели с постоянными геометрическими параметрами:
 а - панели-оболочки; б - панели-складки.

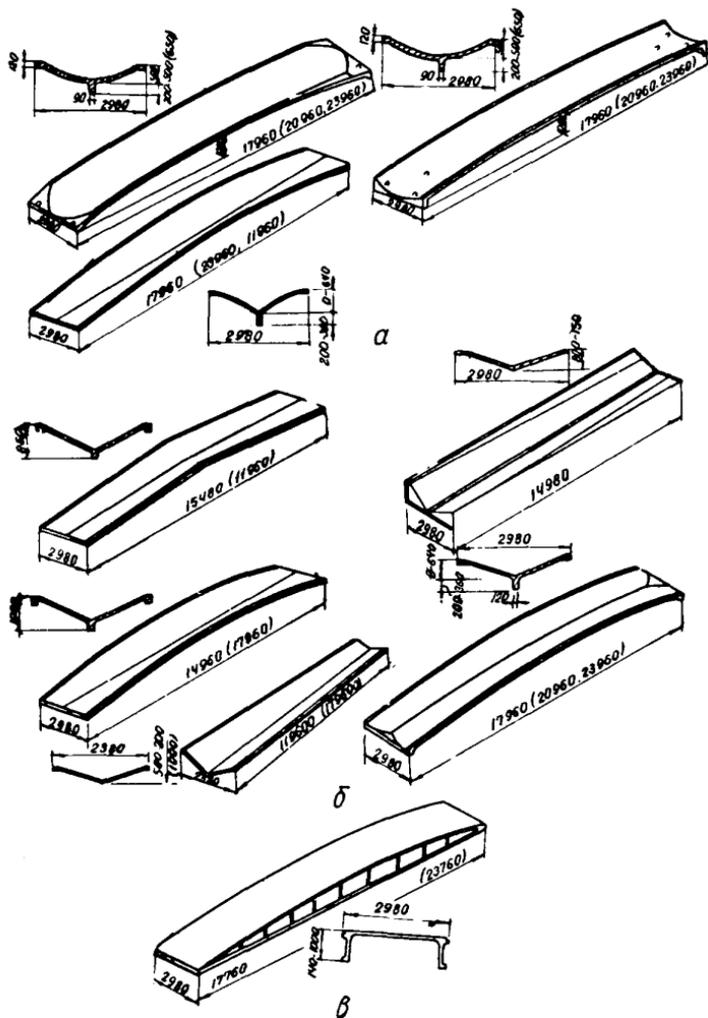


Рис.2. Панели с переменными геометрическими параметрами:
 а - панели-оболочки; б - панели-складки;
 в - панели типа КЭС.

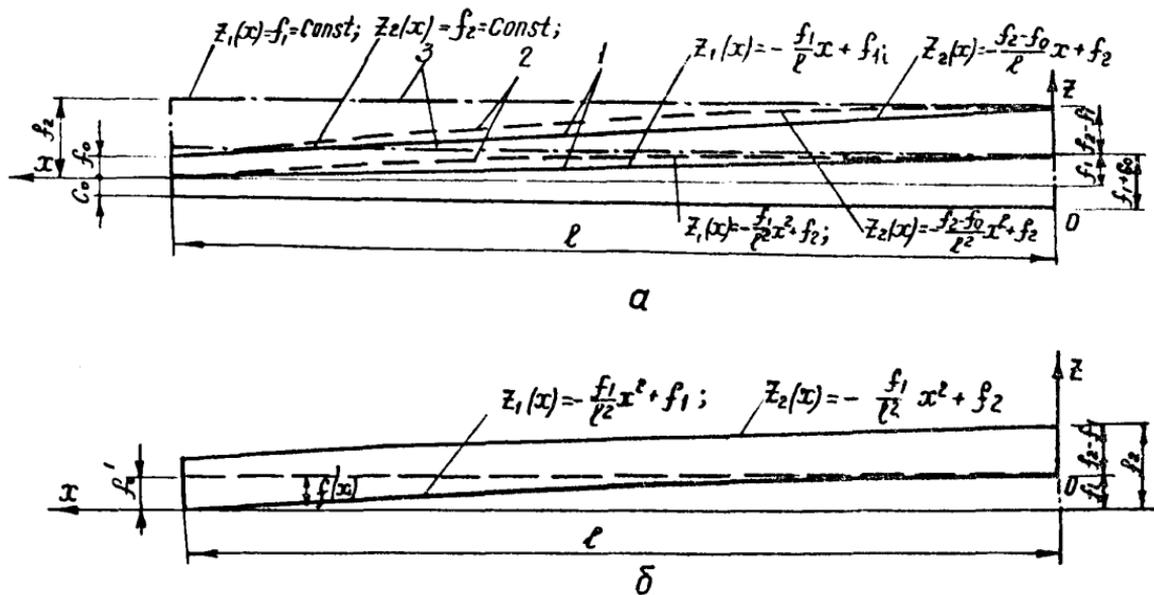


Рис.3. Продольные сечения панели-оболочки /панели-складки/ с переменными параметрами: а - подкрепленной продольным ребром-железом; б - без ребра.

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.

1.5. 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.

1.6. 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 килля - сосредоточенным стрингером вдоль нижнего ребра заменяющей складчатой системы.

1.7. Каждая грань складки рассматривается как прямоугольная переменная 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.

1.8. Предлагаемую 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:

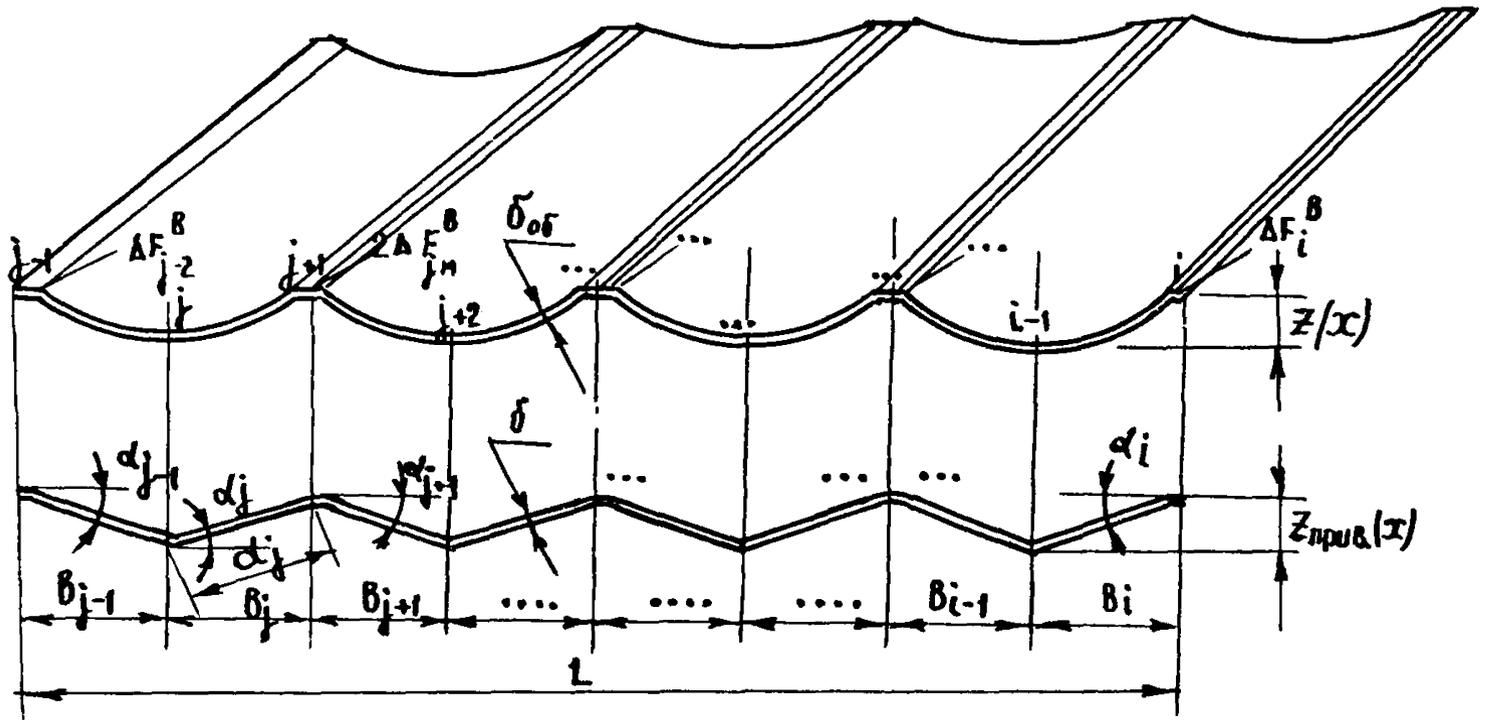


Рис.4. Заданная волнистая система и заменяющая ее складчатая.

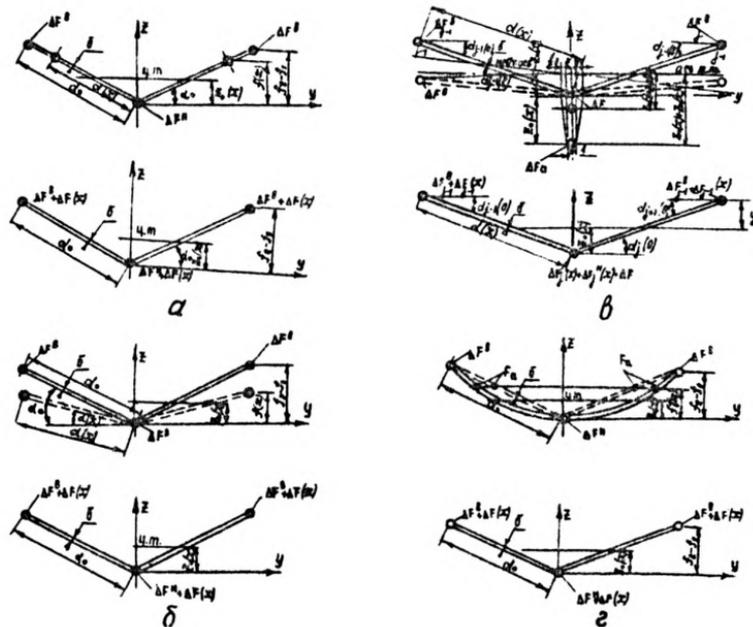


Рис.5. Заданные и приведенные поперечные сечения панелей-оболочек /панелей-складки/:
 а - с переменной глубиной складки; б - с переменным углом наклона граней складки ;
 в - с переменной геометрией продольных подкрепляющих ребер; г - с переменным расположением стрингеров по высоте сечения.

$$\frac{f_1}{l} \leq \frac{1}{15} - \frac{1}{20} \quad \frac{f_2 - f_1}{l} \leq \frac{1}{15} ,$$

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.

1.9. 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_0 - ширина грани в начальном сечении / $x = 0$ /;

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

c_0 - высота продольного вертикального ребра-киля в опорном сечении / $x = l$ /;

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

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

ΔF^b - площадь сосредоточенного стриггера верхнего ребра;

ΔF - то же нижнего ребра;

E - модуль упругости бетона панели-оболочки,

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

$Z_c(x)$ - 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;
 $F_{0s}(x), S_{0s}(x)$ - 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-границы /для оболочек с ребрами/ определяется по формуле

$$Z_p(x) = \frac{f_1 - C_0}{l^n} x^n + f_1 \quad / 1 /$$

где f_1, C_0, 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:

$$\begin{aligned}
 F_{0s}(x) &= 2 \Delta F^b + \frac{2 \delta}{\sin \alpha} \left[\frac{f_1 - f_2 + f_0}{l^n} x^n + f_2 - f_1 \right] + \Delta f \\
 S_{0s}(x) &= 2 \Delta F^b \left(\frac{f_1 - f_2 + f_0}{l^n} x^n + f_2 - f_1 \right) + \frac{\delta}{\sin \alpha} \left(\frac{f_1 - f_2 + f_0}{l^n} x^n + f_2 - f_1 \right)^2 \quad / 2 /
 \end{aligned}$$

где n - то же, что и в формуле 1.

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

2.3. Координата центра тяжести сечения оболочки равна:

$$Z_0(x) = \frac{S_{00}(x) - \frac{1}{2} b Z_p^2(x) - \frac{1}{6} b' Z_p^2(x) - \Delta F_a Z_p(x)}{F_{00}(x) + b Z_p(x) + \frac{1}{2} b' Z_p(x) + \Delta F_a} \quad / 3 /$$

- где π — то же, что и в формуле /1/;
- 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 продольное вертикальное ребро /киль/, определяется по формуле

$$\Delta F''(x) = \frac{Z_p(x) \left\{ b \left[\frac{1}{2} Z_p(x) + Z_0(x) \right]^2 + \frac{1}{2} b' \left[\frac{1}{3} Z_p(x) + Z_0(x) \right]^2 \right\} + \Delta F_a \left[Z_p(x) + Z_0(x) \right]^2 + Z_p^3(x) \left(\frac{b}{12} + \frac{b'}{36} \right)}{Z_0^2(x)} \quad / 4 /$$

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

$$\Delta F(x) = \frac{\Delta F_a [f'(x) - Z_0(x)]^2}{[(f_2 - f_1) - Z_0(x)]^2} \quad / 5 /$$

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

В пунктах 2.1 — 2.5 значения $Z_p(x)$, $Z_0(x)$, $\Delta F''(x)$, $\Delta F(x)$ вычисляются при $x = 0 \rightarrow l$ с интервалом $0,1l$.

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:

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

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

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

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

$$J_x = [\Delta F^6 + \Delta F(0)] \times [f_2 - f_1 - Z_0(0)]^2 + 2 \delta d \left[\frac{1}{2} (f_2 - f_1) - Z_0(0) \right]^2 +$$

$$\begin{aligned}
 & + \Delta F(0) Z_0^2(x) + \delta Z_p(0) [z_0(0) + \frac{1}{2} z_p(0)]^2 + \frac{1}{2} \delta' z_p(0) [z_0(0) + \\
 & + \frac{1}{2} z_p(0)]^2 + f_0 [z_p(0) + z_0(0)]^2 + \frac{\delta z_p^3(0)}{12} + \frac{\delta' z_p^3(0)}{36} . \quad / 8 /
 \end{aligned}$$

3. ГРУЗОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

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

$$M_j^{\text{экв}}(x) = \frac{\int_0^l M_j(x) [f(x) - z_0(x)]}{y_0 [2 \Delta F^{\delta} + \Delta F(x)] [f(x) - z_0(x)]^2 +} \quad / 9 /$$

$$+ d_0(x) \delta y_0 \left[\frac{1}{3} f(x) + z_0(x) \right]^2 + y_0 [\Delta F(x) + \Delta F''(x)] z_0^2(x) .$$

где y_0 — координата верхнего ребра грани по середине пролета;

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

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

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

$$M_j^{\text{экв}}(x) = \sum_{n=0}^n M_{j,n}^{\text{экв}} x^n . \quad /10/$$

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 $M_j^{\text{экв}}(x)$, вычисленная по /9/ изменяется более плавно и равномерно, то n принимается равным 6 и наоборот, при более резком и неравно-

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

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

$$P_j^{экр} = - \sum_{n=2}^n n(n-1) M_j^{экр} x^n. \quad / II /$$

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

$$R_{jn}^{экр} = \frac{P_{(j-1)n}^{экр}}{2d \cdot \sin \alpha_{j-1}} - \frac{P_{jn}^{экр}}{d \cdot \sin \alpha_j} - \frac{P_{(j+1)n}^{экр}}{2d \cdot \sin \alpha_{j+1}}. \quad / I2 /$$

где $P_{j+1}^{экр} = n(n-1) M_{(j+1)n}^{экр}$; $P_{jn}^{экр} = n(n-1) M_{jn}^{экр}$; $P_{(j-1)n}^{экр} = n(n-1) M_{(j-1)n}^{экр}$

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

$$\sum_{n=0}^n m_{jn} x^n = \frac{P_j^{экр}(x)}{P_j(x)} \quad / I3 /$$

где $P_j(x)$ - заданная внешняя нагрузка, выраженная в виде полинома^{x/}.

Коэффициенты m_{jn} также определяются методом наименьших квадратов по графику функции $m_j(x) = P_j^{экр}(x) / P_j(x)$. Для систем из панелей-оболочек с постоянными геометрическими параметрами $m_{jn} = 1$

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

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ УСИЛИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

4.1. Коэффициенты полиномов, выражающие искомые усилия, определяются путем решения системы

$$L \bar{P} = \bar{R} \quad / 14 /$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\bar{p} = \begin{vmatrix} \delta_{10} \\ \delta_{12} \\ \vdots \\ \delta_{1n} \\ M_{30} \\ M_{32} \\ \vdots \\ M_{3n} \end{vmatrix}$$

/18/

где подматрицами служат:

$$\bar{\delta}_{jn} = \begin{vmatrix} \delta_{j0} \\ \delta_{j2} \\ \vdots \\ \delta_{jn} \end{vmatrix}$$

/19/

Вектор \bar{R} внешней нагрузки имеет вид:

$$\bar{R} = \begin{pmatrix} R_{10P}^{\text{экв}} \\ R_{12P}^{\text{экв}} \\ R_{14P}^{\text{экв}} \\ \vdots \\ R_{inP}^{\text{экв}} \\ \theta_{30} \\ \theta_{32} \\ \vdots \\ \theta_{(i-2),n} \end{pmatrix} \quad /20/$$

где

$$R_{jnP}^{\text{экв}} = \begin{pmatrix} 0 \\ R_{j0P}^{\text{экв}} \\ R_{j2P}^{\text{экв}} \\ \vdots \\ R_{jnP}^{\text{экв}} \end{pmatrix} \quad \theta_{jn} = \begin{pmatrix} 0 \\ \theta_{j0} \\ \theta_{j2} \\ \vdots \\ \theta_{jn} \end{pmatrix} \quad /21/$$

4.2. В формуле /14/ 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 $p_j^{\text{экв}}(x)$ плюс 2.

Решается система /14/ 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. $\epsilon \leq \epsilon$ /.

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 /14/ рекомендуется решать на ЭЦВМ по имеющимся стандартным программам для решения систем линейных алгебраических уравнений.

4.5. Получив из решения системы /14/ значения - коэффициентов неизвестных усилий / δ_{jn} , M_{jn} /, вычисляют усилия и перемещения/прогибы/ для j -го ребра системы по формулам:

$$\delta_j(x) = \sum_{n=0}^n \delta'_{jn} x^n; \quad M_j(x) = \sum_{n=0}^n M_{jn} x^n. \quad /22/$$

$$W_j(x) = \frac{1}{2d_e \text{Sin} \alpha_j} \sum_{n=0}^n \frac{[\delta'_{(j-1)n} - 2\delta'_{jn} + \delta'_{(j+1)n}]}{(n+1)(n+2)} x^{n+2} + Cx + D. /23/$$

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

$$D = \frac{1}{2d_e \text{Sin} \alpha_j} \sum_{n=0}^n \frac{[\delta'_{(j-1)n} - 2\delta'_{jn} + \delta'_{(j+1)n}]}{(n+1)(n+2)} l^{n+2}. \quad /24/$$

4.6. По полученным величинам $\delta_j(x)$, $M_j(x)$ 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 II-В1-62 * "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

5.1. 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} /16/ и в элементы вектора \bar{R} /20/, записывают в виде

$$\begin{aligned} \delta_{j,2l} &= \sum_{n=0}^{\infty} \delta_{jn} (2l)^n; \quad \delta_0 = \delta_{j0}; \quad \delta_{j1} = \delta_{j2} = \dots \delta_{jn} = 0; \\ M_{j,2l} &= \sum_{n=0}^{\infty} M_{jn} (2l)^n; \quad M_0 = M_{j0}; \quad M_{j1} = M_{j2} = \dots M_{jn} = 0. \end{aligned} \quad /25/$$

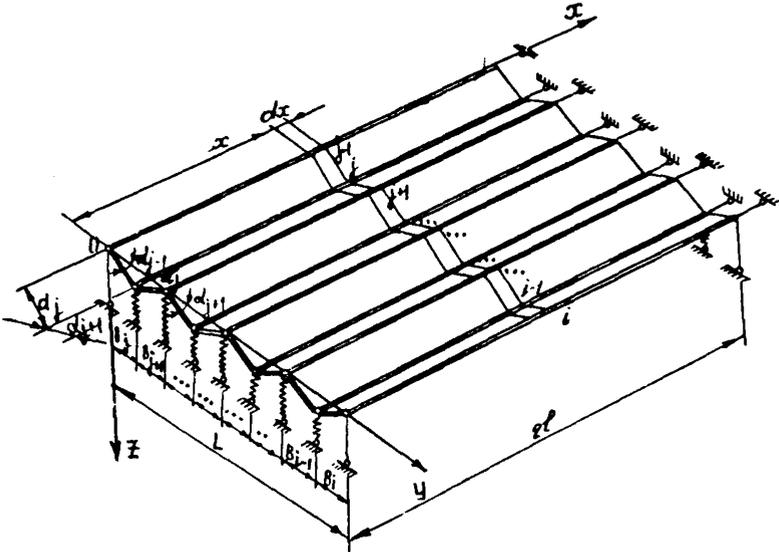


Рис.6. Основная система волнистого покрытия на податливых опорах.

$$R_{jnp}^{эвб} = \begin{vmatrix} \sigma_{j2t} \\ R_{jop}^{эвб} \\ R_{j2p}^{эвб} \\ R_{j4p}^{эвб} \\ \vdots \\ R_{jnp}^{эвб} \end{vmatrix} \quad /26/ \quad \theta_{jn} = \begin{vmatrix} M_{j2t} \\ \theta_{j0} \\ \theta_{j2} \\ \theta_{j4} \\ \vdots \\ \theta_{jn} \end{vmatrix} \quad /27/$$

5.2. Начальные значения напряжений и моментов / σ_{2t} , σ_0 , M_{2t} , M_0 / определяют отдельно для среднего и крайнего пролетов:

1/ средний пролет / рис.7,а/:

Взаимные углы поворота граней:

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

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:

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

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

2/ крайний пролет / рис.7,б/:

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

где φ - угол поворота опорного сечения / $j-1 = 0$ / балки, его можно определить по формуле

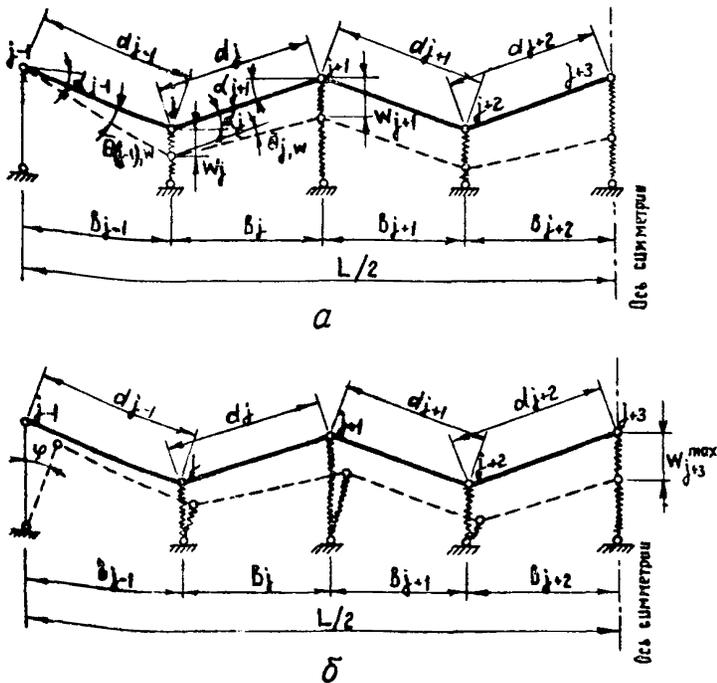


Рис.7. Расчетные схемы опорных сечений покрытия:
 а - для среднего пролета; б - для крайнего пролета.

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

где W_{j+3}^{\max} - максимальный прогиб опорной конструкции /балки/ по середине 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:

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

Значения этих моментов по концам опорных конструкций определяются начальными условиями.

5.4. В случае, если панели-оболочки соединены между собой шарнирно, т.е. $M_{(j-1)o} = M_{(j+1)o} = M_{(j+2)o} = 0$, начальные моменты определяются по формуле

$$M_{jo} = \frac{3EJ}{2d_a} \theta_{jw} \quad /33/$$

Вычисленные значения начальных моментов вводятся в систему /14/ - первый член матрицы столбца /2I/ и далее решение осуществляется в той же последовательности /14-24/.

5.5. Прогобы 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 14 с использованием графика, приведенного на рис.8.

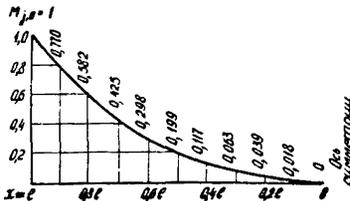
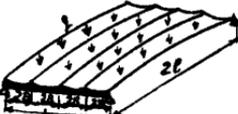
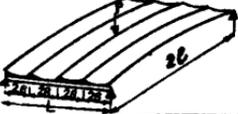
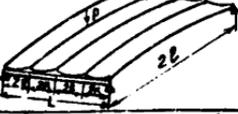
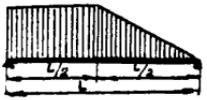
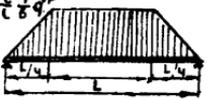


Рис.8. Изменение значений начального опорного момента по длине пролета панели-складки.

Таблица 1

№ п.п.	Схема нагрузки на ячейку покрытия	Расчетная схема эквивалентной нагрузки на опорную конструкцию	Примечания
1			<p>Соотношение $\frac{2q}{L}$ должно быть в пределах $0,5 \div 0,25$</p>
2			<p>То же</p>
3			<p>Соотношение $\frac{4q}{L} = 0,35 \div 0,25$</p>
4			<p>Соотношение $\frac{q}{L} = 0,5 \div 0,25$</p>
5			<p>Соотношение $\frac{2q}{L} = 0,35 \div 0,25$</p>

Равномерно распределенную нагрузку на покрытие от собственного веса панелей обшивки, прикладываемую до замощивания швов между обшивками, рекомендуется принимать в расчете равномерно распределенной на опорную конструкцию по всей ее 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^в.

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/: $l = 1,8 \text{ м}$, $\delta = 0,007 \text{ м}$, $d(x) = \text{const} = d_0 = 0,009 \text{ м}$, $f_2 = 0,184 \text{ м}$, $f_1 = 0,084 \text{ м}$, $(f_2 - f_1) = 0,1 \text{ м}$, $c_0 = 0,027 \text{ м}$, $b = 0,018$, $b' = 0,022 \text{ м}$, $\Delta F_a = 0,000448 \text{ м}^2$, $\alpha_j = 18^\circ 50'$, $\text{Sin} \alpha_j = \pm 0,323$ /знак минус, если j - нечетное и знак плюс - при j четном/: $\Delta F^4 = 0,00018 \text{ м}^2$, $\Delta F^6 = 0,00046 \text{ м}^2$, нагрузка полосовая вдоль пятого ребра $P_5 = 200 \text{ кг/м}$. Панели складки соединены между собой шарнирно по верхним ребрам, крайние ребра свободны. На торцом складки оперты на балки с $l = 2,4 \text{ м}$ и $EJ = 65,5 \cdot 10^{10} \text{ кг/м}^2$.

Изменение высоты кила 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.

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

Т а б л и ц а 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/.

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

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

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

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

Т а б л и ц а 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	0,02362	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:

$$\Delta F^m/x/ = ([-0,0176x^2 + 0,084] \{ 0,018 [0,5/-0,0176 x^2 + 0,084/ + Z_0/x/]^2 + 0,011 [0,33/ - 0,176x^2 + 0,084 / + Z_0/x/]^2 \} + 0,0448 [-0,0176 x^2 + 0,084 + Z_0/x/]^2 + 0,0021/ - 0,0176 x^2 + 0,084/3) / Z_0^2(x).$$

Т а б л и ц а 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 сечения 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 инерция поперечного сечения панели-складки по середине пролета вычисляем по формуле /8 /:

$$J_x = 0,00046/0,1 - 0,02184/2^2 + 0,00216/0,05 - 0,2184/2^2 + 0,00000181 + 0,0052/0,5 \times 0,08399 + 0,02184/2^2 + 0,00092 / 0,02184 + \frac{1}{9} 0,0008399/2^2 + 0,000448/0,02184 + 0,08399/2^2 + 0,0021 \times 0,08399 = 2,3 \times 10^{-5} \text{ м}^4.$$

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

$$M_5^{\text{эв}} /x/ = \frac{2,3 \times 10^{-5} / 1,620 - 0,5x^2 / 0,1 - Z_0/x/}{/0,1 - 0,0155/ \{ [0,00046 + 0] [0,1 - Z_0/x/]^2 + 0,0216x \times [\frac{1}{2} \times 0,1 - Z_0/x/]^2 + / 0,00018 + 0,05160 / Z_0^2(x)}}$$

где / 1,62 - 0,5 / = $M_5^0 / x/$.

Т а б л и ц а 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
Эквивалентный 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 полусовая, $M_4^{ЭКВ} / x / = M_3^{ЭКВ} / x / = M_2^{ЭКВ} / x / = 0$. 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/.

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

где $n = II$, $[x^n] = x_1^n + x_2^n + x_3^n + \dots + x_{II}^n$

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

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

В численном виде система имеет вид:

II	12,474	26,394	67,290	14,7860
12,474	26,594	67,290	184,839	10,3377
26,594	67,290	184,839	523,520	15,3316
67,290	184,839	523,520	1581,884	28,3967

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

$$M_5^{ЭКВ} / x / = 1,828 - 0,2751x^2 - 0,0068x^4 - 0,0253x^6$$

Ошибка от представления $M_5^{ЭКВ} / x /$ полиномом не превышает 1% / рис.9 /.

$$P_5^{ЭКВ} / x / = 0,5502 + 0,0817x^2 + 0,7609x^4$$

$$P_4^{ЭКВ} / x / = P_3^{ЭКВ} / x / = P_2^{ЭКВ} / x / = P_1^{ЭКВ} / x / = 0$$

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

$$j = 5$$

$$R_{5,0}^{ЭКВ} = - \frac{0,5502}{0,309 - 0,323} = 5,512 \quad / n = 0 /$$

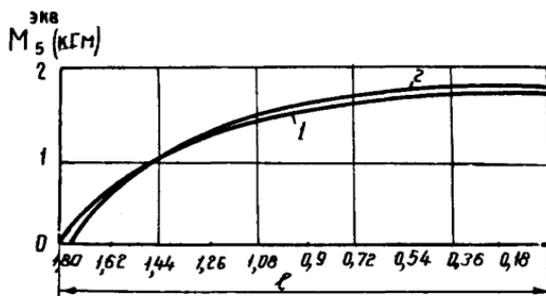


Рис.9. Эквивалентный изгибающий момент:

1 - вычисленный по формуле /9/;

2 - вычисленный по формуле /10/

$$R_{5,2}^{\text{ЭКВ}} = - \frac{0,0818}{0,309 - 0,323} = 0,818, \quad / \quad n = 2 /.$$

$$R_{5,4}^{\text{ЭКВ}} = - \frac{0,7609}{0,309 - 0,323} = 7,624, \quad / \quad n = 4 /.$$

$$j = 4$$

$$R_{4,0}^{\text{ЭКВ}} = \frac{0,5502}{2 \times 0,309 - 0,323} = - 2,756, \quad / \quad n = 0 /;$$

$$R_{4,2}^{\text{ЭКВ}} = \frac{0,0817}{2 \times 0,309 - 0,323} = - 0,409, \quad / \quad n = 2 /;$$

$$R_{4,4}^{\text{ЭКВ}} = \frac{0,7609}{2 \times 0,309 - 0,323} = - 3,812, \quad / \quad n = 4 /.$$

Для $j = 3, 2, 1$ и $R_{jn}^{\text{ЭКВ}} = 0$.

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

$$S_{44} = \frac{2}{0,309 \times \sin/2 \times 18^{\circ} 50' /} = 34,6.$$

$$S_{42} = S_{24} = \frac{1}{0,309 \times [-\sin/2 \times 18^{\circ} 50' /]} = - 17,3$$

Дополнительные множители, учитывающие переменные геометрические параметры складок, по формуле /13/ составляют:

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

где $I = P_5 / x$ - заданная единичная равномерная нагрузка вдоль пятого ребра.

Множители $m_{j,n}$ моментных членов S алгебраических уравнений приведены в табл.6, которая представляет собой систему алгебраических уравнений /14/ по определению коэффициентов полиномов, выражающих искомые усилия.

Система уравнений, в которой коэффициенты при неизвестных определены по формулам /19/, имеет вид, приведенный в табл.7.

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

$$\begin{aligned} \sigma_5 / x / &= / -77,9898 + 11,7526 x^2 + 0,2908 x^4 + 1,0337 x^6 / x \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2; \\ \sigma_4 / x / &= / 3,6722 - 0,5511 x^2 - 0,0138 x^4 - 0,0512 x^6 / x \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2; \\ \sigma_3 / x / &= / -0,5626 + 0,0846 x^2 + 0,0021 x^4 + 0,0078 x^6 / 10^4 \text{ кг/м}^2; \\ \sigma_2 / x / &= / 0,0133 - 0,0032 x^2 - 0,0000 x^4 - 0,0001 x^6 / x \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2; \\ \sigma_1 / x / &= 0; \\ M_4 / x / &= / -0,1528 + 0,0479 x^2 - 0,0002 x^4 - 0 x^6 / 10^4. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} W_5 / x / &= \frac{I \cdot 10^4}{2x0,309x3,5x10^9 x0,323} x \\ &\times \left[\frac{/ 3,6722 + 2x77,9898 + 3,6722 / \cdot 1,8^2 - x^2}{I \cdot x \cdot 2} + \right. \\ &\left. + \frac{/ -0,5511 - 2x11,7526 - 0,5511 / \cdot 1,8^4 - x^4}{/ 2 + I // 2 + 2 /} \right] \end{aligned}$$

$i=5$
 $n=8$

Таблица 6

δ_{10}	δ_{11}	δ_{12}	δ_{14}	δ_{16}	δ_{20}	δ_{22}	δ_{24}	δ_{26}	δ_{30}	δ_{32}	δ_{34}	δ_{36}	δ_{40}	δ_{42}	δ_{44}	δ_{46}	δ_{50}	δ_{52}	δ_{54}	δ_{56}	M_{40}	M_{42}	M_{44}	M_{46}	Свод. чисел	
0	ϵ^0	ϵ^2	ϵ^4	ϵ^6																					0	
2		$B_{1,1,2}$			$A_{1,2,2}$				0				0													$\delta_{1,0,P}$
4			$B_{1,1,4}$		$A_{1,2,4}$																					$\delta_{1,2,P}$
6				$B_{1,1,6}$	$A_{1,2,6}$																					$\delta_{1,4,P}$
0					ϵ^0	ϵ^2	ϵ^4	ϵ^6																		$\delta_{2,0,P}$
2		$A_{2,1,2}$			$B_{2,2,2}$				$A_{2,3,2}$												0					$\delta_{2,2,P}$
4			$A_{2,1,4}$		$\delta_{2,2,4}$				$A_{2,3,4}$												0					$\delta_{2,4,P}$
6				$A_{2,1,6}$	$B_{2,2,6}$				$A_{2,3,6}$												0					$\delta_{2,6,P}$
0									ϵ^0	ϵ^2	ϵ^4	ϵ^6														0
2					$A_{3,2,2}$				$B_{3,3,2}$				$A_{3,4,2}$													$\delta_{3,0,P}$
4		0			$A_{3,2,4}$				$B_{3,3,4}$				$A_{3,4,4}$								0					$\delta_{3,2,P}$
6					$A_{3,2,6}$				$B_{3,3,6}$				$A_{3,4,6}$								0					$\delta_{3,4,P}$
0													ϵ^0	ϵ^2	ϵ^4	ϵ^6										0
2					0				$A_{4,3,2}$				$B_{4,4,2}$				$A_{4,5,2}$				$M_{4,0,S_{4,4}}$					$\delta_{4,0,P}$
4									$A_{4,3,4}$				$B_{4,4,4}$				$A_{4,5,4}$				$M_{4,2,S_{4,4}}$					$\delta_{4,2,P}$
6									$A_{4,3,6}$				$B_{4,4,6}$				$A_{4,5,6}$				$M_{4,4,S_{4,4}}$					$\delta_{4,4,P}$
0																	ϵ^0	ϵ^2	ϵ^4	ϵ^6						0
2													$A_{5,4,2}$				$B_{5,5,2}$									$\delta_{5,0,P}$
4		0											$A_{5,4,4}$				$B_{5,5,4}$									$\delta_{5,2,P}$
6													$A_{5,4,6}$				$B_{5,5,6}$									$\delta_{5,4,P}$
0																					ϵ^0	ϵ^2	ϵ^4	ϵ^6		0
2					$M_{4,0,S_{4,2}}$								$-M_{4,0,S_{4,4}}$													$\theta_{4,0}$
4		0			$-M_{4,2,S_{4,2}}$								$-M_{4,2,S_{4,4}}$													$\theta_{4,2}$
6					$-M_{4,4,S_{4,2}}$								$-M_{4,4,S_{4,4}}$													$\theta_{4,4}$

$$+ \left[\frac{-0.0138 - 2 \times 0.2908 - 0.0132 / 1.8^6 - x^6}{4 + 1 / 4 + 2} + \frac{-0.0512 - 2 \times 1.0839 - 0.0512 / 1.8^8 - x^8}{6 + 1 / 6 + 2} \right]$$

Таблица 7

№ п/п	Б10Б12Б14Б16				Б20Б22Б24Б26				Б30Б32Б34Б36				Б40Б42Б44Б46				Б50Б52Б54Б56				М3М4М5М6				свод 412146
	0	2	4	6	0	2	4	6	0	2	4	6	0	2	4	6	0	2	4	6	0	2	4	6	
0	1	3,24	10,62	34,00																				0	
2		0,00380		0,00072		0				0					0									0	
4		0,0228		0,00432																				0	
6		0,0070		0,0108																				0	
0			1	3,24	10,50	34,00																		0	
2		0,00072		0,065		0,00072								0										0	
4		0,00432		0,390		0,00432							0											0	
6		0,0108		0,970		0,0108																		0	
0					1	3,24	10,50	34,00																0	
2		0		0,00072		0,00472		0,00072						0										0	
4				0,00432		0,0283		0,00432																0	
6				0,0108		0,0708		0,0108																0	
0								1	3,24	10,50	34,00													0	
2		0				0,00072		0,065		0,00072														0	
4						0,00432		0,390		0,00432														0	
6						0,0108		0,970		0,0108														0	
0									1	3,24	10,50	34,00												0	
2		0						0,00072		0,065		0,00072												0	
4								0,00432		0,390		0,00432												0	
6								0,0108		0,970		0,0108												0	
0												1	3,24	10,50	34,00									0	
2		0							0,00072		0,00472		0,00072											0	
4									0,00432		0,0283		0,00432											0	
6									0,0108		0,0708		0,0108											0	
0																								0	
2		0								0,00072		0,065		0,00072										0	
4										0,00432		0,390		0,00432										0	
6										0,0108		0,970		0,0108										0	
0																								0	
2		0																						0	
4																								0	
6																								0	
0																								0	
2		0																						0	
4																								0	
6																								0	

$$\begin{aligned}
 W_5 / 0 / &= 0,003405 \text{ м}; & W_5 / 0,36 / &= 0,003254 \text{ м}; \\
 W_5 / 0,54 / &= 0,003067 \text{ м}; & W_5 / 0,72 / &= 0,002807 \text{ м}; \\
 W_5 / 0,90 / &= 0,002478 \text{ м}; & W_5 / 1,08 / &= 0,002083 \text{ м}; \\
 W_5 / 1,26 / &= 0,001628 \text{ м}; & W_5 / 1,44 / &= 0,001121 \text{ м}; \\
 W_5 / 1,62 / &= 0,000573 \text{ м}; & W_5 / 1,8 / &= 0.
 \end{aligned}$$

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.

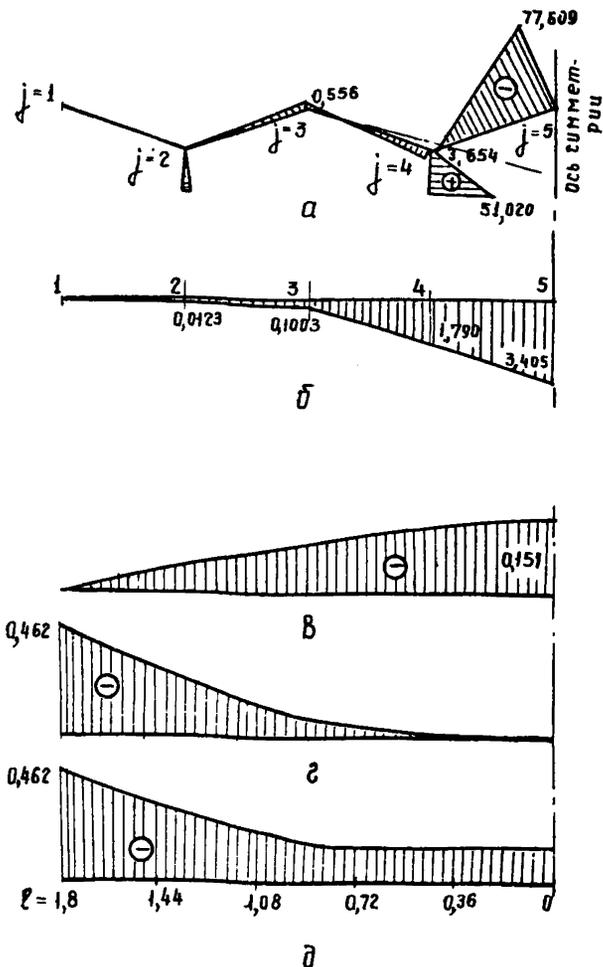


Рис.10. Результаты расчета складчатого покрытия:
 а - продольные напряжения в среднем поперечном сечении фрагмента; б - прогибы в том же сечении; в - поперечные моменты M_4 при опирании фрагмента на жесткие опорные конструкции; г - изменения начального опорного момента M_0 , вызванного податливостью опорных конструкций; д - моменты M_4 при опирании на податливые конструкции /суммарная эпюра/

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

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

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

$$M_{4,0} = \frac{3 \times 0,007^3 \times 3,5 \times 10^9}{12 \times 2 \times 0,309} \times (-0,000952) = -0,462 \text{ кгм}$$

Полученные значения $M_{4,0}$ вводятся в правую часть системы уравнений /14/ /вектор R_{jw} - 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.

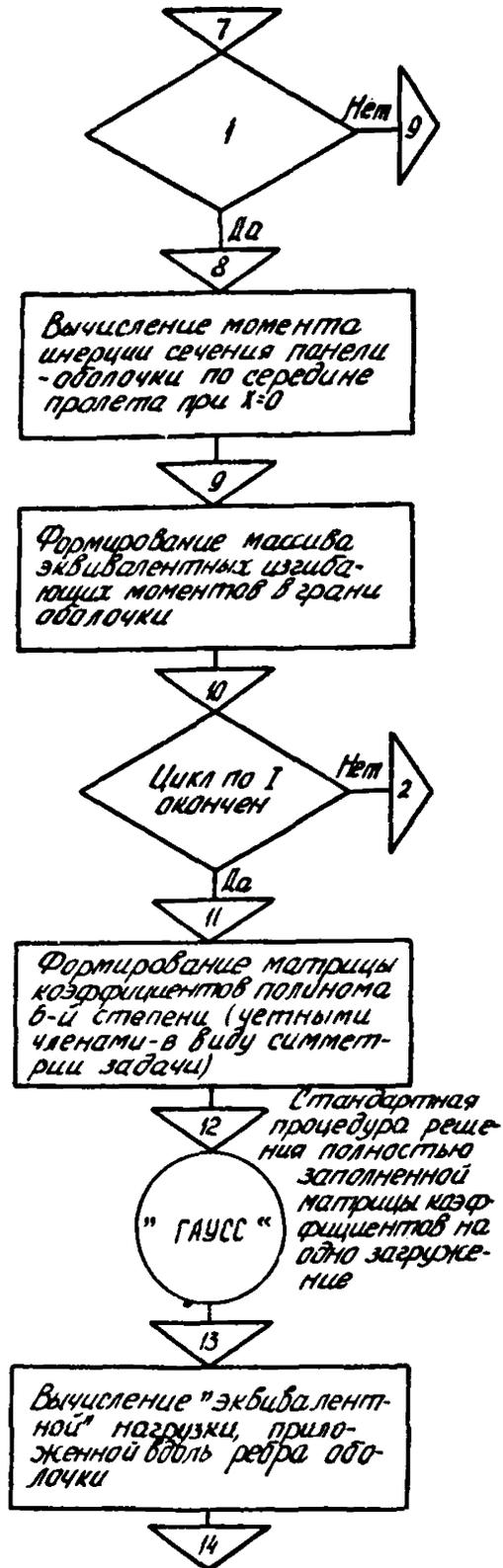
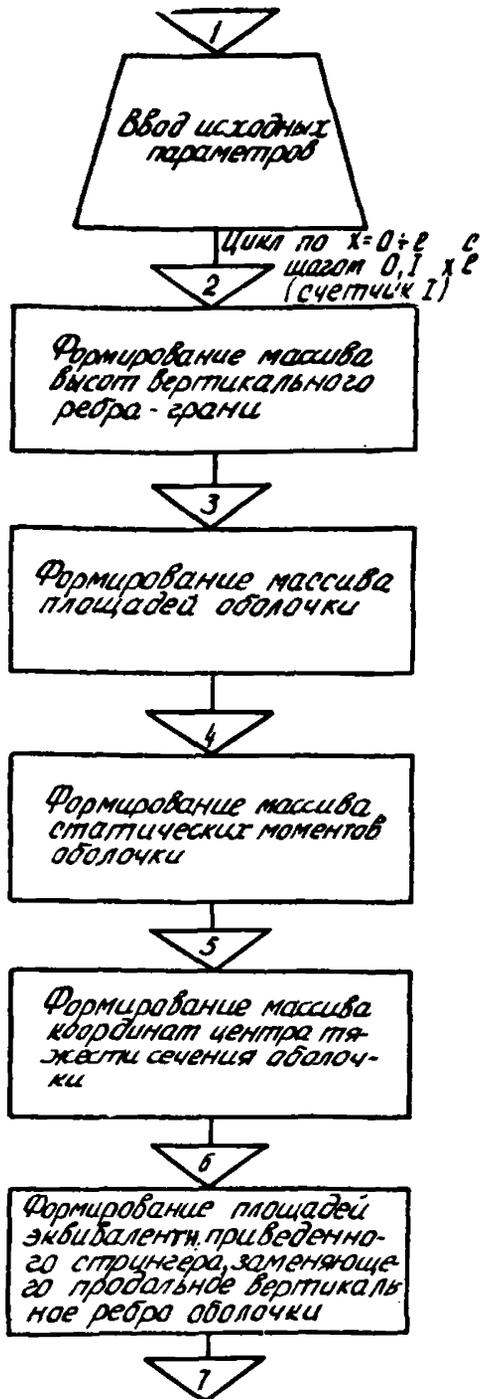
2. Возможные расчетные схемы и нагрузки. Программа позволяет рассчитывать волнистое покрытие, состоящее из четырех панелей-складок /панелей-зболочек/ с переменными или

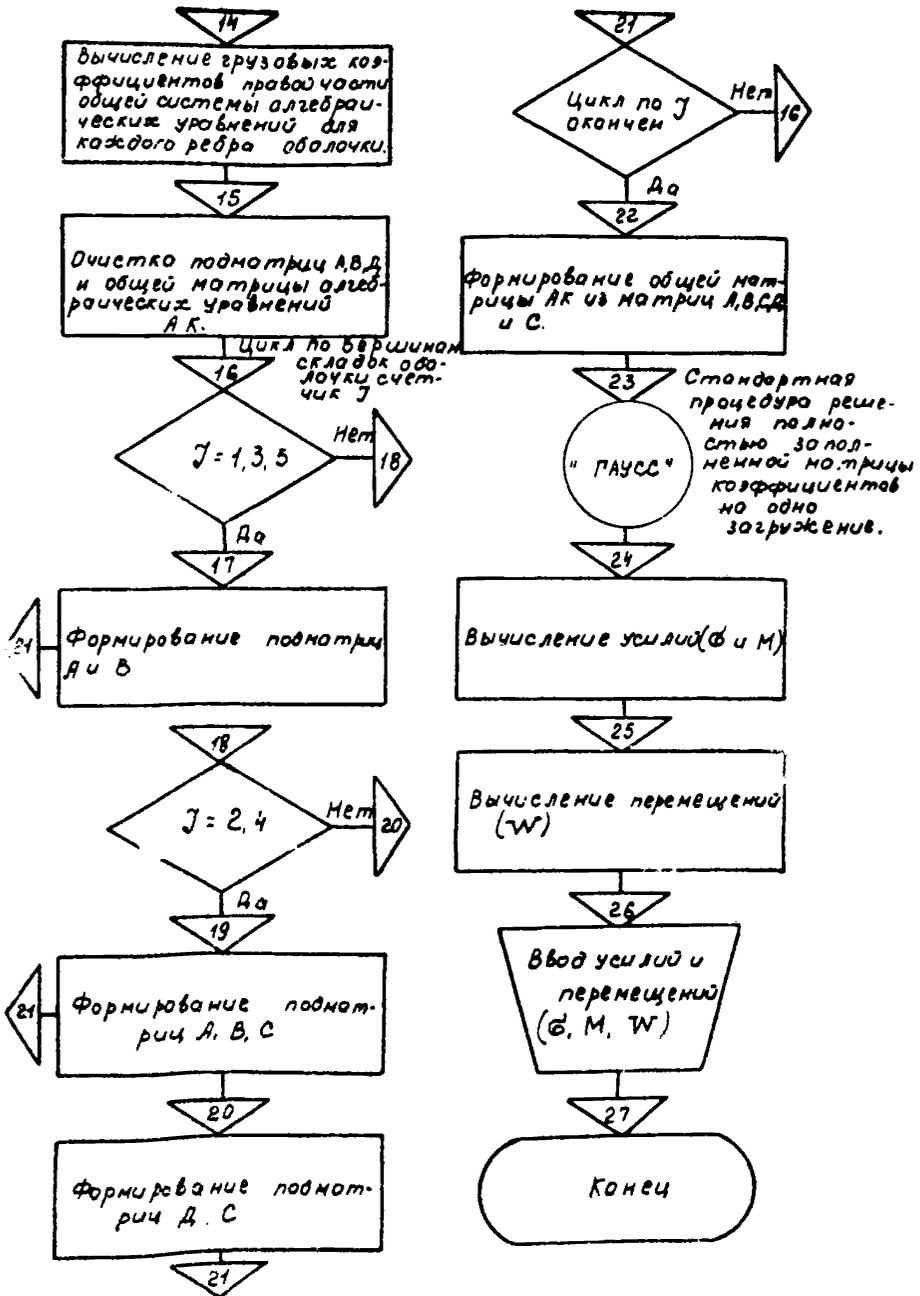
постоянными по длине геометрическими параметрами, подкрепленными продольными ребрами в местах сопряжения граней или без ребер. Толщина и материал различных граней и ребер могут быть неодинаковыми. Панели-складки опираются на жесткие в своей плоскости и идеально гибкие из плоскости диафрагмы. По продольным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

3. В программе начало координат 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 объема задачи, принятые в программе, вызваны соображениями упрощения программы, а не методом расчета, который пригоден для широкого круга задач по расчету волнистых покрытий.





Блок-схема программы расчета влияния

ПРОГРАММА

```

BEGIN INTERP 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 ;
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, FNX, SX, PM1[1:11], PB, PRC1:4, 1:42,
PAC1:42, PML1:32, AKL1:24, 1:24], AKQL1:24, 1:25],
QL1:24], PBAL1:4, 1:5] ;
POO42(M) ;
POO42(M, T, A, F1, F2, C, B, B1, F, FA, FB, SA, FO, E) ;
PO165(I,          = 10 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ' ) ;
PI041(M, H, T, A, F1, F2, C, B, B1, F, FA, FB, SA, FO, E) ;
BEGIN X:=0 ;
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL {1 DO
BEGIN ZPCIJ:=F1-((F1-C)*X)/M1N ; R2:=F2-F1 ;
P1:=(FO-R2)*X/M1N ; R3:=Tx(R1+R2)/SA ;
FXCIJ:=2*FB+2*R3+F ;
SXCIJ:=2*FB*(R1+R2)+R3*(R1+R2) ; R1:=B*ZPCIJ ;
P3:=B1*ZPCIJ ;
ZXCIJ:=(5*CIJ-ZPCIJ*(R1/2+R3/6+FA))/(FXCIJ+R1+
R3/2+FA) ;
FNXCIJ:=(ZPCIJ*(B*(ZPCIJ/2+ZXCIJ)+2*B1/2+
(ZPCIJ/3+ZXCIJ)+2)+FA*(ZPCIJ+ZXCIJ)+2*
ZPCIJ+3*(B/(2+B1/36)))/ZXCIJ+2 ;
IF I:1 THEN GO TO M15 ;
PI:=(FB+F)*(P2-ZXCIJ)+2+T*A*(R2/2-ZPCIJ)+2+Tx
R2+2*R/12+F*ZXCIJ+2+B*ZPCIJ*
(ZXCIJ+ZPCIJ/2)+2+B1/2*ZPCIJ*

```

```

(ZXC[I]+ZPC[I]/3)+2*FA*(ZP[I]+ZX[I])+2*ZPC[I]+3*
B/12+ZPC[I]+3*B1/36;
M15: R1 =R2-ZX[I];
PM1[I]:=(PI-R1*(H+2-X+2)/2)/((R2-ZXC[I])*
((FB+F)*R1+2*A+T*(R2/2-ZXC[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 I2:=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  PBC[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 ; PACI1:=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:=PACI1 ELSE A:=PBACI,I11 ;
      PBACI,I11:=A ;
    END
  END ;
  P1052(5,4,PBA) ;
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO PACI1:=PBACI,51 ;
  PM11:=-2*PA[2] ; PM12:=-12*PA[3] ;
  PM13:=-30*PA[4] ;
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO G[I1]:=0 ;
  A:=1/2 ; K:=13 ; K1:=0 ;
M17: FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 3 DO
  BEGIN Q[K+I1]:=-100*A*PM11/(Δ*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)*Δ+2) ; R1:=-R/2 ;
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO

```

```

BEGIN FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO
    BEGIN AK(I, I1):=0
        END
    END
FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
    BEGIN FOR I1:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
        BEGIN PB(I, I1):=0 ; PA(I, I1):=0 ;
            END
        END ;
    FOR J:=1 STEP 1 UNTIL 6 DO
        BEGIN PA(IJ):=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(I) ; 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(I) ; A4:=R ;
                    GO TO M10
                END
        END
    END

```

```

        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 PDI,I1]:=H+A ;
                    GO TO M2 ;
                END ;
                PB[I,I1]:=H+A ;
                GO TO M2 ;
M1:      IF J#6 THEN GO TO M4 ;
                PDI,I1]:=8*D*A1*(A1-1)/T+3 ;
                GO TO M3 ;
M4:      PBI,I]:=A1*(A1-1)*(A2+A3) ;
                IF J=5 THEN GO TO M3 ;
                PDI,I]:=A1*(A1-1)*D*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 00
  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=2ORJ=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 00
      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[1,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 ;
END ;

```

```

FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO
  BEGIN AKQ[I,25]:=QC[I];
    FOR II:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO
      AKQ[II,11]:=AKCI,II];
    END;
  P1052(25,24,AKQ);
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 24 DO QC[I]:=AKQ[II,25];
  P0165(1,1:=10УСНАМЯ 1);
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 6 DO
    BEGIN X:=0;
      FOR II:=1 STEP 1 UNTIL 4 DO
        PAE[II]:=QC[(I-1)*4+II];
        FOR II:=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);
                R1:=R1+PAE[I2]=R2
              END;
              X:=X+H/10; ZP[II]:=R1
            END
          P1041(ZP);
        END;

```

```

A4:=1/(2+A*E*SA) ;
FOR J:=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
          ZX[I1]:=Q[(I+I1)] ;
          PM[I1]:=Q[(I-1)*4+I1] ;
        END ;
      P0165(1,      =10 ПЕРЕНЕЩЕННН      ) ;
    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]+ZX[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

```

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильков Б.С., Милейковский 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 П-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., Гостройиздат УССР, 1964.

13. Цейтлин А.А., Колчунъ 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 геометри- ческих параметров панелей-оболочек	12
3. Грузовые коэффициенты разрешающей системы урав- нений	15
4. Определение внутренних усилий и деформаций	17
5. Учет податливости опорных конструкций	22
Предложение	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. 60x84¹/16.
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, Преоб-
раженская, 5/2