



Х.Х. Лауль, Ю.А. Тярно

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ОБОЛОЧЕК

II

(Методические указания)

Таллин
1989

ARH

1 ^{x1}
A-19713

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра строительных конструкций

Х.Х. Лауль, Ю.А. Тярно

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ОБОЛОЧЕК

II

(Методические указания)

Таллин
1969

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

250139

ARHIIVKOGU

Сдано в печать 20/II 1989 г.
Бумага 60x84/16. Печ.л.4,25. Усл.печ.л. 3,95
Тираж400. Зак.№ 80 Ротапринт ТПИ, Таллин
Пикк ялг 14
Бесплатно

І. ВВЕДЕНИЕ

В настоящем методическом указании приводится полный ход расчета покрытия из цилиндрических оболочек.

Методическое указание предусмотрено в качестве примера для студентов при составлении курсовых и дипломных проектов, также как подсобным материалом им могут пользоваться инженеры при создании аналогичных оболочек. В указании не дается теоретического обзора метода расчета, но приводится полный расчет покрытия. Расчеты производятся методом аппроксимации сдвигающих сил [2].

ІІ. ПРИМЕНЯЕМЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

(см. рис.І, рис.2)

- L - продольный пролет оболочки - расстояние между осями диафрагм;
- l - поперечный пролет оболочки (длина волны) - расстояние между осями бортовых элементов;
- $2\alpha_0$ - центральный угол оболочки;
- R - радиус срединной поверхности оболочки;
- $2s_0$ - длина криволинейной части оболочки;
- h - строительная высота оболочки (с бортовым элементом);
- f - стрела подъема (без бортового элемента);
- b_0 - высота бортового элемента;

- b_g - высота торцевой диафрагмы;
 δ - толщина оболочки;
 δ_o - толщина бортового элемента
 δ_g - толщина торцевой диафрагмы;
 q - нагрузка на единичную площадь криволинейной части оболочки (т/м^2);
 q_o - нагрузка на погонную длину бортового элемента (т/м);
 $\bar{q} = s_o q + q_o$ - нагрузка поперечной полосы на единичную длину оболочки (т/м);
 $\zeta_{(s)}$ - приращение сдвигающих сил (т/м^2);
 S - сдвигающие силы (т/м);
 m_2 - поперечный изгибающий момент (тм/м);
 T_1 - продольная нормальная сила (т/м);
 r - реакция стены, упирающей оболочку (т/м).

III. ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ

Вначале определим первоначальные геометрические величины конструкции.

При цилиндрических длинных оболочках и оболочках средней длины $L = 12 + 50$ м и $l = 4,5 + 20$ м, строительный подъем

$$h = \frac{1}{10} \div \frac{1}{15} L \text{ и стрела подъема оболочки } f = \frac{1}{6} \div \frac{1}{8} l.$$

Поперечное сечение предлагается взять как часть окружности, т.е. как более простое и рациональное с точки зрения производства работ. Угол α_o принимается $25^\circ - 35^\circ$ (40°) в зависимости от архитектурных соображений. Угол $\alpha_o > 40^\circ$ не целесообразно принимать, так как это затрудняет бетонирование поверхности.

При монолитных железобетонных оболочках выбирается толщина оболочки $\delta = \left(\frac{1}{150} \right) \frac{1}{200} \div \frac{1}{300} l$, но не менее 5 см. (обычно 6 - 9 см), при сборных плитах оболочки - не менее 3 см. При больших скалывающих напряжениях нужно делать местные утолщения в районах бортовых элементов и диафрагм. Утол-

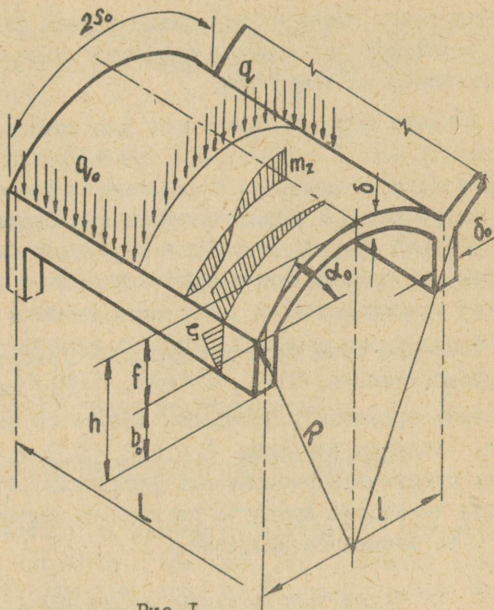


Рис. I.

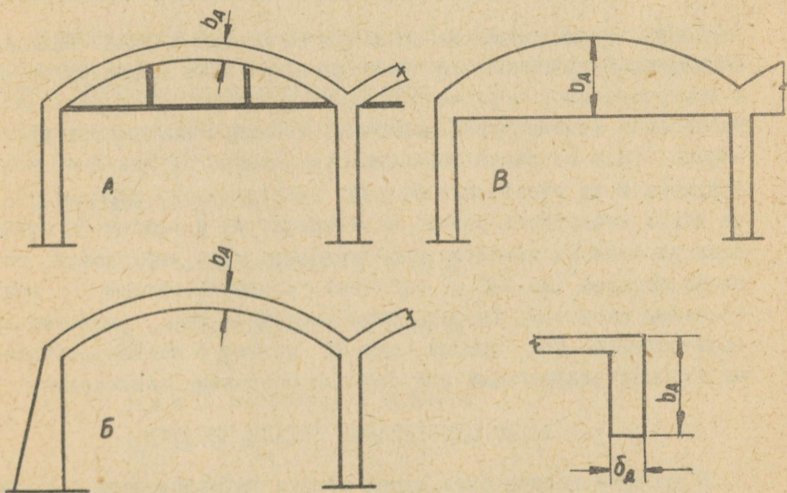


Рис. 2.

чения также нужны во избежание трещин от усадки бетона. Длина утолщений принимается приблизительно $0,1 l$ (или $0,1 L$), с равномерным переходом.

Размеры бортовых элементов для приведенного на рис. 1 типа: $b_0 = 0,2 - 0,5 h$, $\delta_0 = 2 - 4 \delta$. При этом должна быть обеспечена возможность расположения продольной растянутой арматуры и длина анкеровки арматуры главных растягивающих напряжений $30 \div 40$ диаметров стержней. Для упрощения раскладки монолитных конструкций желательно дать бортовому элементу трапецевидное поперечное сечение.

Основные типы торцевых диафрагм представлены на рис. 2. Размеры (типы а, б) $\delta_g = 1/30 - 1/20 l$ (меньшая высота при больших пролетах), диафрагмы сплошного сечения (тип в) $b_g = h$. Толщина диафрагм $\delta_g = 0,2 - 0,3$ м, при этом должна быть обеспечена возможность установки рабочей арматуры и длина анкеровки арматуры главных растягивающих напряжений $30 \div 40$ диаметров стержней.

IV. ОБРАЗОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ

Обычно цилиндрические оболочки соединяют в одно большое покрытие. В таком случае оболочки могут быть многопролетные и многоволновые, а расчеты средних и крайних волн различные. Расстояния температурно-усадочных швов принимают согласно нормам. Если опоры не позволяют свободного перемещения конструкции и их расстояние больше предвиденного нормами [6], то нужно произвести расчет на температуру и усадку. В практике расстояния температурно-усадочных швов выбираются гораздо большее (до 140 м) согласно соответствующим контрольным расчетам. Температурно-усадочные швы желательно осуществлять при помощи парных колонн с соответствующими парными диафрагмами или парными бортовыми элементами.

У. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДЕТАЛИ ПРОЕКТА

В проекте должен быть решен вопрос удаления воды с крыши (придавая оболочке определенный конструктивный подъем или создавая соответствующий уклон бетоном), должен быть решен

вопрос крепления и подвешивания трубопровода, осветительных приспособлений и т.д., а также вопрос световых и вентиляционных отверстий.

VI. НАГРУЗКИ

Нагрузки на оболочки принимают согласно нормам [5]. При этом существенно иметь в виду, что при интенсивности снега, который не превышает 1/3 собственного веса конструкции, можно не учитывать одностороннюю снеговую нагрузку [1]. В иных случаях одностороннюю снеговую нагрузку заменяют постоянной нагрузкой на весь пролет. Из-за пологости оболочек ветровую нагрузку можно не учитывать.

УП. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ СИЛ В ОБОЛОЧКЕ

Ниже рассматривается ряд примеров расчета отдельных элементов большого перекрытия (см.рис. 3), геометрические данные которого приводятся на рис. 4. Рассматриваются однопролетные монолитные железобетонные оболочки.

Многопролетные в продольном направлении железобетонные оболочки можно рассчитывать аналогично нижеизложенному примеру, принимая за расчетный пролет $l = 0,7 L$ [1].

Исходные величины:

$$L = 23,7 \text{ м}, \quad l = 12 \text{ м}, \quad \alpha_0 = 40^\circ$$

Находимые величины:

$$R = \frac{l}{2 \cdot \sin \alpha_0} = 9,3343 \text{ м},$$

$$s_0 = \frac{\alpha_0 \cdot R \cdot \pi}{180^\circ} = 6,5166 \text{ м},$$

$$f = R(1 - \cos \alpha_0) = 2,184 \text{ м},$$

$$b_0 = 0,82 \text{ м},$$

$$\delta = 0,07 \text{ м},$$

$$h = 3,00 \text{ м},$$

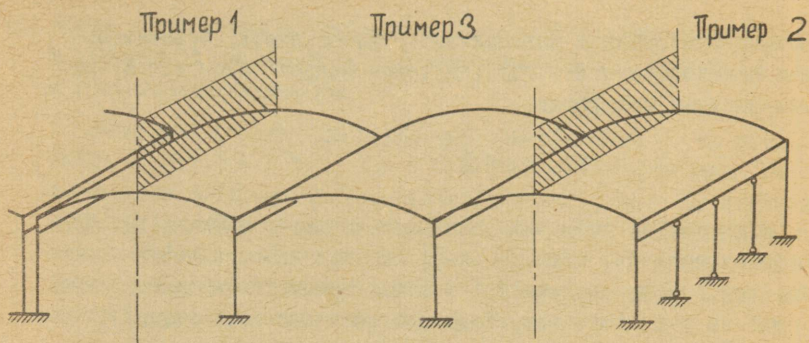


Рис. 3.

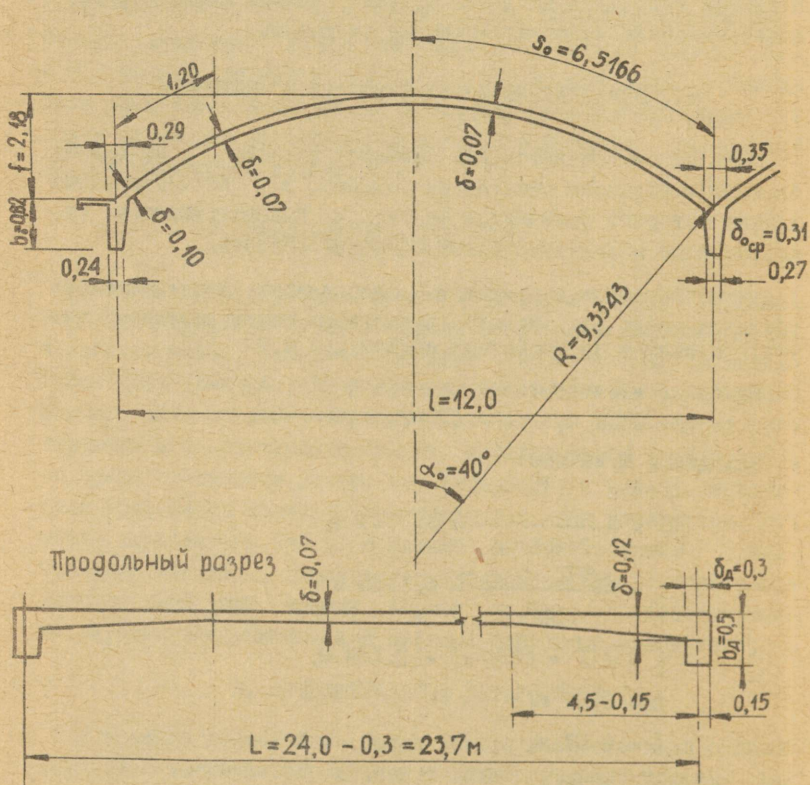


Рис. 4.

$\delta_{окр} = 0,265$ м - для расчета крайней панели,

$\delta_{ср} = 0,31$ м - для расчета средней панели,

$b_g = 0,50$ м,

$\delta_g = 0,20$ м.

Пр и м е р I. Крайняя волна (отдельностоящая оболочка)

I. Нагрузки

A. Нагрузка на криволинейную часть оболочки.

Т а б л и ц а I

Наименование	$g^H; p^H$	n	g; p
<u>Постоянные нагрузки</u> - g			
Гидроизоляция - 3 слоя рул. мат.	13,2	1,1	14,5
Цементная затирка - 2 см	36,0	1,2	43,2
Теплоизоляционные плиты - 10 см	34,0	1,2	40,7
Пароизоляционный слой - 1 см	18,0	1,2	21,6
Оболочка (прив. толщина - 7,5 см)	188,0	1,1	207,0
Итого	289,2		327,0
<u>Временные нагрузки</u> - p			
Снеговая нагрузка - II зона			
$p_0 = 70 \text{ кг/м}^2; C = 1$			
Приведенная на поверхность оболочки			
$p_c^H = \frac{70 \cdot l}{2 \cdot S_0} = 64,5$	64,5	1,4	90,0
Ветровая нагрузка	не учитывается		
Подвешенная нагрузка			13,0
Итого			103,0

$$q = g + p = 327,0 + 103,0 = 430,0 \text{ кг/м}^2.$$

Б. Нагрузка на бортовой элемент

За расчетную нагрузку на бортовой элемент принимаем $q_0 = 980$ кг/м (собственный вес бортового элемента, карниз, подвешанная нагрузка).

2. Расчетная схема, метод и ход расчета для определения

$$\underline{a_1; a_2; a_1 \text{ и } a_0.}$$

Схема расчета представлена на рис. 5.

Для конструирования покрытия нужно знать:

эпюры продольных сил T_1 ,

эпюры сдвигающих сил S ,

эпюры поперечных изгибающих моментов m_2 .

Расчет произведен методом аппроксимации сдвигающих сил, который изложен в [1] [2]. Для лучшего обзора формул численного примера изложим основные положения этого метода.

Так как величины T_1 , S и m_2 выражены через приращение сдвигающих сил $\zeta = \frac{\partial s}{\partial x}$, то ζ является искомой величиной (см. рис. 5) Назначаем диаграмму $\zeta(s)$ так, чтобы было удовлетворены условие равновесия и условие минимума потенциальной энергии внутренних сил.

Для криволинейной части

$$\zeta = a_1 \cdot \sin \frac{\pi s}{s_0} + a_2 \cdot \sin \frac{2\pi s}{s_0} + a_1 \frac{s}{s_0}, \quad (1)$$

для бортового элемента

$$\zeta = a_1 \left(1 - \frac{b}{b_0}\right) + a_0 \frac{4b(b_0 - b)}{b_0^2}, \quad (2)$$

где $a_1; a_2; a_1$ и a_0 - определяемые параметры.

При назначении ζ в вышеуказанном виде удовлетворяются следующие условия:

1) если $s = 0$, то $S = 0$ (на коньке),

2) если $b = b_0$, то $S = 0$ (в нижней точке бортового элемента);

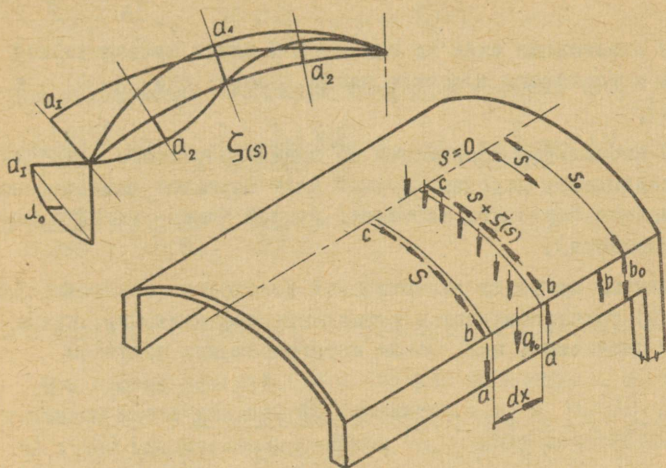


Рис. 5.

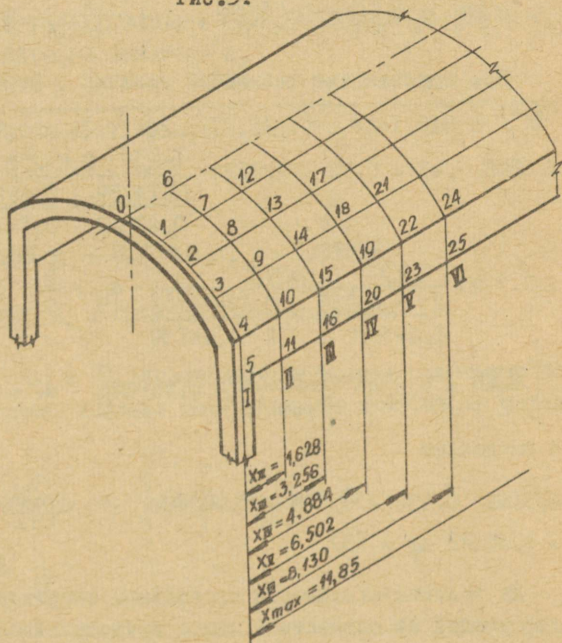


Рис. 6.

3) сдвигающие силы на совместной линии криволинейной части и бортового элемента равны (место, где $s = s_0$ и $b = 0$);

4) продольные напряжения по высоте бортового элемента распределяются линейно (первый член выражает равномерное растяжение бортового элемента, второй член - изгиб в своей плоскости).

Внешнюю нагрузку элементарной плоскости $a-b-c$ (см. рис. 5) уравнивают вертикальные составляющие приращения сдвигающих сил. После интегрирования получаем

$$R \cdot \alpha_0 \cdot q + q_0 + \sum_{1,2} R \cdot \alpha_i \frac{(-1)^{i+1} \cdot \sin \alpha_0}{\frac{i\pi}{\alpha_0} - \frac{\alpha_0}{i\pi}} + \\ + \frac{2}{3} b_0 \cdot \alpha_0 + \left[\frac{b_0}{2} + R \left(\frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} - \cos \alpha_0 \right) \right] a_I = 0. \quad (3)$$

При подстановке численных величин в формулу (3) получаем

$$6,5166 \cdot 0,43 + 0,98 + 9,3343 \frac{(-1)^2 \cdot 0,64278}{\frac{3,14159}{0,69813} - \frac{0,69813}{3,14159}} \cdot a_1 + \\ + 9,3343 \frac{(-1)^3 \cdot 0,64278}{\frac{2 \cdot 3,14159}{0,69813} - \frac{0,69813}{2 \cdot 3,14159}} \cdot a_2 + \frac{2}{3} \cdot 0,82 \cdot a_0 + \\ + \left[\frac{0,82}{2} + 9,3343 \left(\frac{0,64278}{0,69813} - 0,76604 \right) \right] \cdot a_I = 0$$

и вычисляем

$$6,5166 \cdot 0,430 + 0,980 + 1,40260 a_1 - 0,67500 a_2 + 0,55000 a_0 + \\ + 1,85392 a_I = (3).$$

Из условия сходимости продольных напряжений (продольных деформаций на совместной линии криволинейной части и бортового элемента) находим

$$-\frac{\pi}{s_0} a_1 + \frac{2\pi}{s_0} a_2 + \frac{a_1}{s_0} = \frac{\delta}{\delta_0} \left(-\frac{a_1}{b_0} + \frac{4a_0}{b_0} \right). \quad (4)$$

При подстановке численных величин в формулу (4), получаем

$$\begin{aligned} & -\frac{3,14159}{6,5166} \cdot a_1 + \frac{2 \cdot 3,14159}{6,5166} \cdot a_2 + \frac{1}{6,5166} \cdot a_1 = \\ & = \frac{0,070}{0,265} \left(-\frac{a_1}{0,82} + \frac{4a_0}{0,82} \right) \end{aligned}$$

и вычисляем

$$-0,48212 a_1 + 0,96424 a_2 - 1,28856 a_0 + 0,47560 a_1 = 0 \quad (4)$$

При помощи условий (3) и (4) два параметра (a_1 и a_0) выражаем через два других параметра (a_2 и a_0). Разделим (3) и (4) множителем параметра a_0 , получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} 2,55018 a_1 - 1,22727 a_2 + 3,37076 a_1 + a_0 + 11,84830 \cdot 0,43 + 1,81818 \cdot 0,98 &= 0 \\ -0,37415 a_1 - 0,74831 a_2 + 0,36909 a_1 - a_0 &= 0 \end{aligned}$$

$$2,17603 a_1 - 0,47896 a_2 + 3,73985 a_1 + 11,84830 \cdot 0,43 + 1,81818 \cdot 0,98 = 0$$

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{k_{I1}}{0,58185} a_1 + \frac{k_{I2}}{0,12807} a_2 - \frac{K_I}{1,83873} \\ a_0 &= -\frac{k_{II1}}{0,58891} a_1 + \frac{k_{II2}}{0,79558} a_2 - \frac{K_{II}}{0,67868}. \end{aligned} \quad (5)$$

Параметры a_1 и a_2 определяют из условия минимума потенциальной энергии. Условие потенциальной энергии на четверть оболочки

$$\Pi = \frac{L}{2} \int_0^{s_0} \frac{m^2 ds}{2EJ} + \int_0^{L/2} ds \int \frac{T^2(x,s)}{2E\delta} ds,$$

где $J = 1 \cdot \delta^3 \frac{1}{12}$.

Условие минимума потенциальной энергии:

$$\frac{\delta \Pi}{\delta a_k} = \frac{6}{\delta^2} \int_0^{s_0} m \frac{\partial m}{\partial a_k} ds + 0,2(6) \int \max T \frac{\partial(\max T)}{\partial a_k} ds = 0. \quad (6)$$

Придаем членам (6) новую формулу.

Член моментов:

$$\frac{6}{\delta^2} \int_0^{s_0} m \frac{\partial m}{\partial a_k} ds = \frac{6}{\delta^2} (B_k + \sum_1^n A_{ki} \cdot a_i) \quad (7)$$

и член продольных сил

$$0,2(6) \int \max T \frac{\partial(\max T)}{\partial a_k} ds = \frac{0,2(6)}{64} L^4 (C_k + \sum_1^n D_{ki} \cdot a_i). \quad (8)$$

Таким образом, условие минимума потенциальной энергии

$$\frac{\delta \Pi}{\delta a_k} = \frac{6}{\delta^2} (B_k + \sum_1^n A_{ki} a_i) + \frac{0,2(6)}{64} L^4 (C_k + \sum_1^n D_{ki} \cdot a_i) \quad (9)$$

Вычисляем для определения A_{ki} и B_k в (9) нужные интегралы (см. приложение, таблица 25)

$$\int m_1^2 ds = \frac{R^5}{10^4} \psi_{11} = 0,88200 \frac{R^5}{10^4} \quad (10)$$

$$\int m_1 m_2 ds = \frac{R^5}{10^4} \psi_{12} = -0,86360 \frac{R^5}{10^4} \quad (11)$$

$$\int m_2^2 ds = \frac{R^5}{10^4} \psi_{22} = 0,86262 \frac{R^5}{10^4} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \int \bar{m}_1 m_1 ds &= \frac{R^5}{10^4} \left[\psi_{11} + \frac{b_0}{2R} \psi_{1a} \right] = \\ &= \frac{R^5}{10^4} \left[1,27976 + \frac{0,82}{2 \cdot 9,3343} \cdot 25,3788 \right] = 2,39448 \frac{R^5}{10^4} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int \bar{m}_1 m_2 ds &= \frac{R^5}{10^4} \left[\psi_{21} + \frac{b_0}{2R} \psi_{2a} \right] = \\ &= \frac{R^5}{10^4} \left[-1,27400 - \frac{0,82}{2 \cdot 9,3343} \cdot 26,3008 \right] = -2,42822 \cdot \frac{R^5}{10^4} \quad (14) \end{aligned}$$

$$\int \bar{m}_x m_1 ds = \frac{R^5}{10^4} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{b_o}{R} \cdot \psi_{1a} =$$

$$= \frac{R^5}{10^4} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{0,82}{9,3343} \cdot 25,3788 = 1,49536 \frac{R^5}{10^4} \quad (15)$$

$$\int \bar{m}_x m_2 ds = \frac{R^5}{10^4} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{b_o}{R} \cdot \psi_{2a} =$$

$$= - \frac{R^5}{10^4} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{0,82}{9,3343} \cdot 26,3008 = - 1,54968 \frac{R^5}{10^4} \quad (16)$$

$$\int \bar{m}_x^2 ds = \frac{R^5}{10^4} \left[\psi_{11} + \frac{b_o}{R} \psi_{1a} + \frac{b_o^2}{4R^2} \cdot \psi_{aa} \right] =$$

$$= \frac{R^5}{10^4} \left[1,88160 + \frac{0,82}{9,3343} \cdot 38,7804 + \frac{0,82^2}{4 \cdot 9,3343^2} \cdot 905,476 \right] =$$

$$= 7,03570 \frac{R^5}{10^4} \quad (17)$$

$$\int \bar{m}_x^2 ds = \frac{R^5}{10^4} \cdot \frac{4}{9} \cdot \frac{b_o^2}{R^2} \psi_{aa} =$$

$$= \frac{R^5}{10^4} \cdot \frac{4}{9} \cdot \frac{0,82^2}{9,3343^2} \cdot 905,476 = 3,10644 \frac{R^5}{10^4} \quad (18)$$

$$\int \bar{m}_x \bar{m}_x ds = \frac{R^5}{10^4} \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{b_o}{R} \psi_{1a} + \frac{2}{3} \cdot \frac{b_o^2}{2R^2} \psi_{aa} \right] =$$

$$= \frac{R^5}{10^4} \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{0,82}{9,3343} \cdot 38,7804 + \frac{2}{3} \cdot \frac{0,82^2}{2 \cdot 9,3343^2} \cdot 905,476 \right] =$$

$$= 4,61483 \frac{R^5}{10^4} \quad (19)$$

$$\int \bar{M}_o m_1 ds = \frac{R^5}{10^4} \left[q \psi_{o1} + \frac{q_o}{R} \psi_{1a} \right] =$$

$$= \frac{R^5}{10^4} \cdot \left[0,43 \cdot 7,85271 + \frac{0,980}{9,3343} \cdot 25,3788 \right] = 6,04112 \frac{R^5}{10^4} \quad (20)$$

$$\int \bar{M}_o m_2 ds = \frac{R^5}{10^4} \left[q \cdot \psi_{o2} + \frac{q_o}{R} \psi_{2a} \right] =$$

$$= \frac{R^5}{10^4} \left[-0,43 \cdot 7,91867 - \frac{0,980}{9,3343} \cdot 26,3008 \right] = -6,16628 \frac{R^5}{10^4} \quad (21)$$

$$\int \bar{M}_o \bar{m}_x ds = \frac{R^5}{10^4} \left[q \cdot \psi_{o1} + \frac{b_o}{2} \frac{q}{R} \psi_{oa} + q_o \frac{1}{R} \psi_{1a} + q_o \frac{b_o}{2} \frac{1}{R^2} \psi_{aa} \right] =$$

$$= \frac{R^5}{10^4} \left[0,43 \cdot 11,6885 + \frac{0,82}{2} \cdot \frac{0,43}{9,3343} \cdot 250,240 + \frac{0,980}{9,3343} \cdot 38,7804 + 0,980 \cdot \frac{0,82}{2} \cdot \frac{1}{9,3343^2} \cdot 905,476 \right] = 18,00038 \frac{R^5}{10^4} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \int \bar{m}_0 \bar{m}_1 ds &= \frac{R^5}{10^4} \left[\frac{2}{3} b_0 \cdot \frac{q}{R} \bar{\psi}_{0a} + \frac{2}{3} b_0 \cdot q_0 \cdot \frac{1}{R^2} \psi_{aa} \right] = \\ &= \frac{R^5}{10^4} \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{0,82 \cdot 0,43}{9,3343} \cdot 250,2405 + \frac{2}{3} \cdot 0,82 \cdot \frac{0,980}{9,3343^2} \cdot 905,4763 \right] = \\ &= 11,94293 \frac{R^5}{10^4} \quad (23) \end{aligned}$$

Далее находим нужные интегралы для определения D_{ki} и C_k .

$$\int_0^{s_0} \left[\frac{\partial}{\partial s} (\zeta_1) \right]^2 ds = \frac{l^2 \pi^2}{2s_0} \quad (24)$$

откуда $\int_0^{s_0} \left[\frac{\partial}{\partial s} (\zeta_1) \right]^2 ds = \frac{1 \cdot 3,14159^2}{2 \cdot 6,5166} = 0,75731 \quad (25)$

$$\int_0^{s_0} \left[\frac{\partial}{\partial s} (\zeta_2) \right]^2 ds = \frac{4 \cdot 3,14159^2}{2 \cdot 6,5166} = 3,02924 \quad (26)$$

$$\int_0^{b_0} \left[\frac{\partial}{\partial s} (\bar{\zeta}_1) \right]^2 ds = \frac{1}{s_0} + \frac{\delta}{\delta_0} \frac{1}{b_0} = \frac{1}{6,5166} + \frac{0,07}{0,265} \cdot \frac{1}{0,82} = 0,47560 \quad (27)$$

$$\int_0^{s_0} \left[\frac{\partial}{\partial s} (\bar{\zeta}_2) \right]^2 ds = \frac{\delta}{\delta_0} \frac{5,3}{b_0} = \frac{0,07}{0,265} \cdot \frac{5,3}{0,82} = 1,70731 \quad (28)$$

Определение A_{ki} , B_k , D_{ki} и C_k происходит при помощи следующих таблиц (см. табл. 2 и 3). Таблица 2

k	I		2
i	I	2	2
k_{xi}	-0,58185	0,12807	0,12807
k_{xi}	-0,58891	0,79558	0,79558
$\int m_i m_k ds$	0,88200	-0,86360	0,86360
$k_{xi} \int \bar{m}_x \cdot m_k ds$	-1,39323	0,30666	-0,31098
$k_{xi} \int \bar{m}_x \cdot m_k ds$	-0,88063	1,18968	-1,23289
$k_{ik} \int \bar{m}_x \cdot m_i ds$	-1,39323	1,41286	-0,31098
$k_{ik} \int \bar{m}_x \cdot m_i ds$	-0,88063	0,91262	-1,23289
$k_{ik} \cdot k_{xi} \int \bar{m}_x^2 ds$	2,38193	-0,52428	0,11540
$(k_{ik} \cdot k_{xi} + k_{ik} k_{xi}) \int \bar{m}_x \bar{m}_x ds$	3,16259	-2,48430	0,94041
$k_{ik} \cdot k_{xi} \int \bar{m}_x^2 ds$	1,07736	-1,45544	1,96621
$\Sigma = A_{ki}$	2,95616	-1,50588	0,79788
K_I		-1,83876	
K_{II}		-0,67868	
$\int \bar{M}_0 m_k ds$	6,04112		-6,16628
$K_I \int \bar{m}_x \cdot m_k ds$	-4,40280		4,46484
$K_{II} \int \bar{m}_x \cdot m_k ds$	-1,01487		1,05174
$k_{ik} (K_I \int \bar{m}_x^2 ds + \int \bar{M}_0 \bar{m}_x ds)$	-2,94627		0,64850
$k_{ik} (K_{II} \int \bar{m}_x^2 ds + \int \bar{M}_0 \bar{m}_x ds)$	-5,79172		7,82425
$(K_I \cdot k_{ik} + K_{II} k_{ik}) \int \bar{m}_x \bar{m}_x ds$	6,81952		-7,14860
$\Sigma = B_k$	-1,29502		0,67445

Таблица 3

K	I		2
	I	2	3
k_{xi}	-0,58185	0,12807	0,12807
k_{xi}	-0,58891	0,79558	0,79558
$\int \left[\frac{\partial}{\partial s} (\zeta_k) \right]^2 ds$	0,75731	-	3,02927
$k_{ix} k_{xi} \int \left[\frac{\partial}{\partial s} (\bar{\zeta}_I) \right]^2 ds$	0,16101	-0,03544	0,00780
$k_{ix} k_{xi} \int \left[\frac{\partial}{\partial s} (\bar{\zeta}_{II}) \right]^2 ds$	0,59212	-0,79992	1,08064
$\Sigma = D_{ki}$	1,51044	-0,83536	4,11771
K_x		-1,83873	
K_{II}		-0,67868	
$k_{ix} \cdot K_x \int \left[\frac{\partial}{\partial s} (\bar{\zeta}_I) \right]^2 ds$	0,50883		-0,11200
$k_{ix} \cdot K_{II} \int \left[\frac{\partial}{\partial s} (\bar{\zeta}_{II}) \right]^2 ds$	0,68238		-0,92184
$\Sigma = C_k$	1,19121		-1,03384

При подстановке A_{ki} , B_k , D_{ki} и C_k в условие минимума потенциальной энергии (9), получим следующую систему уравнений:

$$\frac{6 \cdot 9,3343^5}{10^4 \cdot 0,07^2} (-1,29502 + 2,95616 a_1 - 1,50580 a_2) + 0,2(6) \cdot \frac{23,7^4}{64} (1,19121 + 1,51044 a_1 - 0,83536 a_2) = 0,$$

после вычислений

$$\begin{cases} -11236,89 + 25656,34 a_1 - 13068,75 a_2 + \\ + 1605,75 + 2036,08 a_1 - 1126,07 a_2 = 0 \\ -9631,14 + 27692,42 a_1 - 14194,82 a_2 = 0 \end{cases}$$

$$a_1 - 0,51259 a_2 - 0,34779 = 0 \quad (29)$$

$$\frac{6 \cdot 9,3343^5}{10^4 \cdot 0,07^2} (0,67445 - 1,50580 a_1 + 0,79788 a_2) + 0,2(6) \cdot \frac{23,7^4}{64} (-1,03384 - 0,83536 a_1 + 4,11771 a_2) = 0,$$

после вычислений

$$\begin{cases} 5852,20 - 13068,75 a_1 + 6924,75 a_2 - \\ -1393,62 - 1126,07 a_1 + 5550,67 a_2 = 0 \end{cases}$$

$$4458,58 - 14194,82 a_1 + 12475,43 a_2 = 0$$

$$- a_1 + 0,87889 a_2 + 0,31410 = 0 \quad (30)$$

Суммируя (29) и (30), получим

$$0,36630 a_2 - 0,03369 = 0$$

$$a_2 = 0,09197.$$

При помощи (29)

$$a_1 = 0,51259 \cdot 0,09197 + 0,34779 = 0,04714 + 0,34779 = 0,39493.$$

При помощи (5) находим a_1 и a_0 .

$$a_1 = -0,58185 \cdot 0,39493 + 0,12807 \cdot 0,09197 - 1,83873 = -2,05674$$

$$a_0 = -0,58891 \cdot 0,39493 + 0,79558 \cdot 0,09197 - 0,67868 = -0,83809$$

3. Определение внутренних сил

Из внутренних сил находим m_2 , T_1 и S . Для этого обозначаем сечения оболочки в продольном и поперечном направлении согласно рис. 6.

а) Поперечные изгибающие моменты m_2 (тм/м)

Т а б л и ц а 4

Сечение	0	1	2	3	4
$M_0 = -q \cdot R^2 \frac{\bar{\psi}_0}{100}$	$\bar{\psi}_0 =$ 23,3956 -8,760	12,7842 -4,790	5,4261 -2,033	1,2715 -0,477	0 0
$a_1 m_1 = -R^2 \frac{\psi_1}{100} a_1$	$\psi_1 =$ 3,1603 -1,088	1,1612 -0,400	0,2554 -0,088	0,0170 -0,006	0 0
$a_2 m_2 = R^2 \frac{\psi_2}{100} a_2$	$\psi_2 =$ 2,6320 0,211	1,3683 0,109	0,4007 0,032	0,0320 0,003	0 0
$a_1 m_x = -R^2 \frac{\psi_x}{100} a_x$	$\psi_x =$ 4,1395 7,420	1,9155 3,440	0,6163 1,102	0,0829 0,148	0 0
$(q_0 + \frac{2}{3} b_0 a_0 + \frac{b_0}{2} a_1) m_a =$ $= 0,319 R \frac{\psi_a}{100}$	$\psi_a =$ 64,2788 1,918	46,9140 1,400	30,0768 0,897	14,2788 0,426	0 0
$\Sigma = m_2$	-0,299	-0,241	-0,090	0,094	0

Эпюры поперечных изгибающих моментов см. рис. 7.

б) Продольные нормальные силы T_1 ..

Продольные силы находят по формуле

$$T_1 = \frac{xL}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \frac{\partial \zeta}{\partial s} = K_T \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial s} \quad (31),$$

в середине пролета макс. $T_1 = \frac{L^2}{8} \frac{\partial \zeta}{\partial s}$. (32)

Находим коэффициенты K_T для полосок I + УI (см. рис. 6)

$$K_{T_{IX}} = 0;$$

$$K_{T_{IX}} = \frac{1,628 \cdot 23,7}{2} \cdot \left(1 - \frac{1,628}{23,7}\right) = 18,0;$$

$$K_{T_{III}} = \frac{3,256 \cdot 23,7}{2} \cdot \left(1 - \frac{3,256}{23,7}\right) = 33,4;$$

$$K_{T_{IV}} = \frac{4,884 \cdot 23,7}{2} \cdot \left(1 - \frac{4,884}{23,7}\right) = 45,9;$$

$$K_{T_{VX}} = \frac{6,502 \cdot 23,7}{2} \cdot \left(1 - \frac{6,502}{23,7}\right) = 56,1;$$

$$K_{T_{VI}} = \frac{8,130 \cdot 23,7}{2} \cdot \left(1 - \frac{8,130}{23,7}\right) = 62,5;$$

$$\text{макс } K_T = \frac{23,7^2}{8} = 70,2$$

Находим составляющие $\frac{\partial \zeta}{\partial s}$

$$\frac{\partial \zeta_1}{\partial s} = \frac{\pi}{s_0} \cos \frac{\pi s}{s_0} = 0,483 \cdot \cos \frac{180^\circ s}{s_0}; \quad \frac{\partial \zeta_{\pi}}{\partial s} = \pm \frac{4}{b_0} = \pm 4,88$$

$$\frac{\partial \zeta_2}{\partial s} = \frac{2\pi}{s_0} \cos \frac{2\pi s}{s_0} = 0,966 \cdot \cos \frac{360^\circ s}{s_0};$$

$$\frac{\partial \zeta_{\pi}}{\partial s} = \frac{1}{s_0} = 0,1538 - \text{ для криволинейной части};$$

$$\frac{\partial \zeta_{\pi}}{\partial s} = \frac{-1}{b_0} = -1,22 - \text{ для бортового элемента};$$

Эпюры максимальных продольных сил $\max T_1$ см. рис. 7.

Таблица 5

Сечение	0	I	2	3	4	4	5
$a_1 \cdot \frac{\partial \Sigma_1}{\partial s}$	$0,483 a_1 =$ $=0,191$	$0,342 a_1 =$ $=0,135$	0	$-0,342 a_1 =$ $=-0,135$	$-0,483 a_1 =$ $=-0,191$	-	-
$a_2 \cdot \frac{\partial \Sigma_2}{\partial s}$	$0,966 a_2 =$ $=0,089$	0	$-0,966 a_2 =$ $=-0,089$	0	$0,966 a_2 =$ $=0,089$	-	-
$a_x \cdot \frac{\partial \Sigma_x}{\partial s}$	$0,1538 a_x =$ $=-0,316$	-0,316	-0,316	-0,316	-0,316	$-1,22 a_x =$ $=2,500$	2,500
$a_o \cdot \frac{\partial \Sigma_o}{\partial s}$	-	-	-	-	-	$-4,88 a_o =$ $=-4,080$	$4,88 a_o =$ $=4,080$
$\Sigma = \Delta T$	-0,036	-0,181	-0,405	-0,451	-0,418	-1,580	6,580
$T_{1x} = 0 \cdot \Sigma$	0	0	0	0	0	0	0
$T_{1x} = 18 \cdot \Sigma$	-0,650	-3,260	-7,300	-8,100	-7,530	-28,45	118,40
$T_{1x} = 33,4 \cdot \Sigma$	-1,202	-6,050	-13,530	-15,070	-13,980	-52,80	220,00
$T_{1x} = 45,9 \cdot \Sigma$	-1,650	-8,300	-18,570	-20,680	-19,200	-72,40	320,00
$T_{1x} = 56,1 \cdot \Sigma$	-2,020	-10,200	-22,800	-25,400	-23,500	-88,90	370,00
$T_{1x} = 62,5 \cdot \Sigma$	-2,250	-11,300	-25,300	-28,230	-26,100	-98,90	411,00
$\max T_{1x} = 70,2 \cdot \Sigma$	-2,525	-12,700	-28,400	-31,650	-29,350	-110,80	462,00

в) Сдвигающие силы.

Сдвигающие силы находят по формуле

$$S = -\zeta \left(\frac{L}{2} - x \right) = -K_s \cdot \zeta \quad (33)$$

$$\text{макс} S = -\zeta \cdot \frac{L}{2} \quad (34)$$

Находим коэффициенты K_s для полосок I + УI (см. рис. 6)

$$K_{sI} = 11,850$$

$$K_{sII} = 11,850 - 1,628 = 10,222,$$

$$K_{sIII} = 11,850 - 3,256 = 8,594,$$

$$K_{sIV} = 11,850 - 4,884 = 6,966,$$

$$K_{sV} = 11,850 - 6,502 = 5,348$$

$$K_{sVI} = 11,850 - 8,130 = 3,720$$

Расчет сдвигающих сил см. в таблице 6.

Эпюра максимальных сдвигающих сил см. рис. 7

4. Проверка результатов расчета

а) Проверяем равновесие моментов, как у "большой" балки.

Применяя метод Симпсона численного интегрирования (обозначения см. рис. 7)

$$\frac{\Delta S}{3} (T_{10} \cdot y_0 + 4T_{11} \cdot y_1 + 2T_{12} \cdot y_2 + 4T_{13} \cdot y_3 + T_{14} \cdot y_4) +$$

+ момент продольных сил T_1 бортового элемента относительно нижней точки бортового элемента = внешний М. (35)

Таким образом момент криволинейной части

$$0,543(-2,53 \cdot 3,00 - 12,70 \cdot 11,36 - 28,40 \cdot 4,84 - 6,93 \cdot 31,65 - 0,82 \cdot 29,39) = -288,7 \text{ тм}$$

бортового элемента

$$\frac{572,8 \cdot 0,82^2}{2 \cdot 3} = 110,8 \cdot 0,82 \cdot 0,41 = 25,5 \text{ тм}$$

2 · 3

Таблица 6

Сечение	0	1	2	3	4	4	5
$a_1 \sin \frac{\pi s}{s_0}$	0	$0,707 a_1 =$ $=0,279$	$1,00 a_1 =$ $=0,395$	$0,707 a_1 =$ $=0,279$	0	0	0
$a_2 \sin \frac{2\pi s}{s_0}$	0	$1,00 a_2 =$ $=0,092$	0	$-1,00 a_2 =$ $=-0,092$	0	0	0
$a_x \frac{s}{s_0}$	0	$0,25 a_x =$ $=-0,514$	$0,50 a_x =$ $=-1,028$	$0,75 a_x =$ $=-1,540$	$1,00 a_x =$ $=-2,057$	$1,00 a_x =$ $=-2,057$	0
$\Sigma = \xi$	0	-0,143	-0,633	-1,355	-2,057	-2,057	0
$S_x = -11,85 \Sigma$	0	1,697	7,500	16,07	24,39	24,39	0
$S_x = -10,222 \Sigma$	0	1,463	6,480	13,85	21,01	21,01	0
$S_{II} = -8,594 \Sigma$	0	1,228	5,435	11,64	17,65	17,65	0
$S_{II} = -6,966 \Sigma$	0	0,996	4,410	9,42	14,30	14,30	0
$S_x = -5,348 \Sigma$	0	0,764	3,380	7,23	10,96	10,96	0
$S_{II} = -3,720 \Sigma$	0	0,532	2,350	5,03	7,63	7,63	0

Внешний $M = (6,5166 \cdot 0,430 + 0,980) \cdot 70,2 = 263,7$ тм.

$\Delta M = -288,7 + 25,5 + 263,7 = 0,5$ тм - разница менее 1%.

б) Проверка равновесия продольных сил

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta S}{3} (T_{10} + 4T_{11} + 2T_{12} + 4T_{13} + T_{14}) + \Sigma T_6 = 0 \quad (36)$$

$$\Delta T_1 = 0,543 \cdot (-2,53 - 4 \cdot 12,70 - 2 \cdot 28,40 - 4 \cdot 31,65 - 29,39) - 0,82 \cdot 110,80 + 0,82 \cdot \frac{572,8}{2} = -235,5 + 234,5 = -1,0 \text{ т.}$$

Пример 2. Крайняя волна (отдельно стоящая обочка с опертым краем)

1. Нагрузки (см. пример I, таблица I).

2. Расчетная схема, метод и ход расчета для определения a_1, a_2, a_x и реакции стены r .

Схема расчета представлена на рис. 8.

Для конструирования покрытия нужно знать: эпюры продольных сил T_1 ; эпюры сдвигающих сил S ; эпюры поперечных изгибающих моментов m_2 ; реакцию r подпирющей стены.

Расчет произведем методом аппроксимации сдвигающих сил, который изложен в [1], [2].

Назначаем $\zeta(s)$ - диаграмму так, чтобы было удовлетворено условие равновесия и условие минимума потенциальной энергии внутренних сил (см. рис. 8).

Для криволинейной части

$$\zeta = a_1 \cdot \sin \frac{\pi s}{s_0} + a_2 \cdot \sin \frac{2\pi s}{s_0} + a_x \frac{s}{s_0} \quad (1)$$

для бортового элемента

$$\zeta = a_x \left(1 - \frac{b}{b_0}\right) \quad (2)$$

При назначении ζ в вышеуказанном виде удовлетворяются следующие условия:

- 1) если $s = 0$, то $S = 0$ (на коньке);
- 2) если $b = b_0$, то $S = 0$ (в нижней точке бортового элемента);
- 3) сдвигающие силы на совместной линии криволинейной части и бортового элемента равны (место, где $s = s_0$ и $b = 0$);
- 4) продольные напряжения по высоте бортового элемента постоянные (в бортовом элементе только равномерное растяжение).

Внешнюю нагрузку элементарной полоски уравнивают вертикальные составляющие приращения сдвигающих сил. После интегрирования получим

$$R\alpha_0 q + q_0 + \sum_{1,2} R\alpha_i \frac{(-1)^{i+1} \cdot \sin \alpha_0}{\frac{i\pi}{\alpha_0} - \frac{\alpha_0}{i\pi}} +$$

$$+ r + \left[\frac{b_0}{2} + R \left(\frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} - \cos \alpha_0 \right) \right] a_x = 0 \quad (3')$$

При подстановке численных величин в формулу (3'), получим

$$6,5166 \cdot 0,43 + 0,98 + 9,3343 \cdot \frac{(-1)^2 \cdot 0,64278}{\frac{1 \cdot 3,14159}{0,69813} - \frac{0,69813}{1 \cdot 3,14159}} \cdot a_1 +$$

$$+ 9,3343 \frac{(-1)^3 \cdot 0,64278}{\frac{2 \cdot 3,14159}{0,69813} - \frac{0,69813}{2 \cdot 3,14159}} \cdot a_2 + r +$$

$$+ \left[\frac{0,82}{2} + 0,93343 \left(\frac{0,64278}{0,69813} - 0,76604 \right) \right] \cdot a_x = 0$$

и вычисляя

$$6,5166 \cdot 0,430 + 0,980 + 1,40260 a_1 - 0,67500 a_2 + r +$$

$$+ 1,85392 a_x = 0 \quad (3')$$

Из условия сходимости продольных напряжений (продольных деформаций на совместной линии криволинейной части и бортового элемента) находим

$$-\frac{\pi}{s_0} a_1 + \frac{2\pi}{s_0} a_2 + \frac{1}{s_0} a_r = \frac{\delta}{\delta_0} \left(-\frac{a_r}{b_0} \right). \quad (4')$$

При подстановке численных величин в формулу (4') получим

$$-\frac{3,14159}{6,5166} \cdot a_1 + \frac{2 \cdot 3,14159}{6,5166} \cdot a_2 + \frac{1}{6,5166} \cdot a_r = \frac{0,070}{0,256} \cdot \left(-\frac{a_r}{0,82} \right)$$

и вычисляя

$$-0,48212 \cdot a_1 + 0,96424 \cdot a_2 + 0,47560 \cdot a_r = 0. \quad (4'')$$

При помощи условия (3') и (4'') два параметра (a_r и r) выражаем через два других параметра (a_1 и a_2):

$$a_r = k_{r1} a_1 + k_{r2} a_2$$

$$r = k_{r1} a_1 + k_{r2} a_2 - k_{r0} \quad (5')$$

Параметры a_1 и a_2 определяем из условия минимума потенциальной энергии (см. пример I, формулы (6), (7), (8) и (9)).

Для определения A_{ki} и B_k в (9) нужны интегралы см. пример I. Из всех интегралов имеют другие величины лишь следующие:

$$\int \bar{m}_x m_1 ds = \frac{R^5}{10^4} \frac{\psi_{1a}}{R} = 2,71882 \frac{R^5}{10^4}; \quad (15')$$

$$\int \bar{m}_x m_2 ds = \frac{R^5}{10^4} \frac{\psi_{2a}}{R} = -2,81760 \frac{R^5}{10^4}; \quad (16')$$

$$\int \bar{m}_x^2 ds = \frac{R^5}{10^4} \frac{1}{R^2} \psi_{aa} = 10,39487 \frac{R^5}{10^4}; \quad (18')$$

$$\int \bar{m}_r \bar{m}_r ds = \frac{R^5}{10^4} \left[\frac{1}{R} \psi_{ra} + \frac{b_0}{2R^2} \psi_{aa} \right] = 8,41640 \frac{R^5}{10^4} \quad (19')$$

$$\int M_0 \bar{m}_r ds = \frac{R^5}{10^4} \left[\frac{q_0 \psi_{0a}}{R} + q_0 \frac{\psi_{0a}}{R^2} \right] = 21,71452 \frac{R^5}{10^4} \quad (23')$$

Для определения D_{ki} и C_k в условии (9) нужны интегралы см. пример I. Из всех интегралов имеет другую

величину лишь следующий:
$$\int_0^{\xi_0} \left[\frac{\partial}{\partial s} (\xi_{II}) \right]^2 ds = 0 \quad (28^{\circ})$$

Определение A_{ki} , B_k , D_{ki} и C_k происходит при помощи следующих таблиц (таблицы 7, 8). Т а б л и ц а 7

K	I		2
	I	2	2
k_{xi}	1,01370	-2,02740	-2,02740
k_{xii}	-3,28270	4,43400	4,43400
$\int m_i m_k ds$	0,88200	-0,86360	0,86262
$k_{xi} \int \bar{m}_I m_k ds$	2,42725	-4,85457	4,92296
$k_{xii} \int \bar{m}_I \cdot m_k ds$	-8,92505	12,05525	-12,49323
$k_{IK} \int \bar{m}_I m_i ds$	2,42725	-2,46147	4,92296
$k_{IK} \int \bar{m}_I m_i ds$	-8,92505	9,24933	-12,49323
$k_{IK} k_{xi} \int \bar{m}_I^2 ds$	7,22980	-14,45960	28,91924
$(k_{IK} \cdot k_{xii} + k_{IK} \cdot k_{xi}) \int \bar{m}_I \bar{m}_I ds$	-56,01435	93,84415	-151,31901
$k_{IK} \cdot k_{xii} \int \bar{m}_I^2 ds$	112,01635	-151,30244	204,36681
$\Sigma = A_{ki}$	51,11820	-58,79295	67,68912
K_I			
K_{II}		-3,78213	
$\int \bar{m}_0 m_k ds$	6,04112		-6,16628
$K_I \int \bar{m}_I m_k ds$	-		-
$K_{II} \int \bar{m}_I m_k ds$	-10,38293		10,65653
$k_{IK} (K_I \int \bar{m}_I^2 ds + \int M_0 \bar{m}_I ds)$	18,24699		-36,49397
$k_{IK} (K_{II} \int \bar{m}_I^2 ds + \int M_0 \bar{m}_I ds)$	57,77628		-78,03942
$(K_I \cdot k_{IK} + K_{II} k_{IK}) \int \bar{m}_I \bar{m}_I ds$	-32,26806		64,53603
$\Sigma = B_k$	39,41340		-45,50711

Таблица 8

K	I		
	I	2	2
k_{zi}	1,01370	-2,02740	-2,02740
k_{xi}	-3,28270	4,43400	4,43400
$\int \left[\frac{\partial}{\partial s} (\zeta_k) \right]^2 ds$	0,75731	-	3,02924
$k_{xk} k_{zi} \int \left[\frac{\partial}{\partial s} (\bar{\zeta}_x) \right]^2 ds$	0,48869	-0,97738	1,95441
$\Sigma = D_{ki}$	1,24600	-0,97738	4,98365
$C_k = 0$			

При подстановке A_{ki} , B_k , D_{ki} и C_k в условие минимума потенциальной энергии (9), получим следующую систему уравнений:

$$\frac{6 \cdot 9,3343^5}{10^4 \cdot 0,07^2} \cdot (39,41340 + 51,11820 a_1 - 58,79295 a_2) +$$

$$+ 0,2 (6) \cdot \frac{23,7^4}{64} \cdot (1,24600 a_1 - 0,97738 a_2) = 0.$$

После вычислений получим следующее:

$$341990,07 + 443552,62 a_1 - 510146,43 a_2 +$$

$$+ 1678,61 a_1 - 1317,31 a_2 = 0$$

$$341990,07 + 445231,23 a_1 - 511463,74 a_2 = 0$$

$$a_1 - 1,14875 a_2 + 0,76811 = 0 \quad (29)$$

$$\frac{6 \cdot 9,3343^5}{10^4 \cdot 0,07^2} \cdot (-45,50711 - 58,79295 a_1 + 67,68912 a_2) +$$

$$+ 0,2 (6) \cdot \frac{23,7^4}{64} \cdot (-0,97738 a_1 + 4,98365 a_2) = 0.$$

После вычислений будет

$$\begin{aligned} -394865,19 - 510146,43 a_1 + 587338,49 a_2 - \\ - 1317,31 a_1 + 6717,75 a_2 = 0 \end{aligned}$$

$$-394865,19 - 511463,74 a_1 + 594056,24 a_2 = 0$$

$$- a_1 + 1,16148 a_2 - 0,77203 = 0. \quad (30^{\circ})$$

Суммируя $0,01273 a_2 - 0,00392 = 0$

$$a_2 = 0,30673.$$

При помощи (29^o)

$$a_1 = 1,14870 \cdot 0,30673 - 0,76811 = -0,41577;$$

$$a_2 = 1,01370 \cdot -0,41577 - 2,02740 \cdot 0,30673 = -1,04333;$$

$$\begin{aligned} r &= -3,28270 \cdot -0,41577 + 4,43400 \cdot 0,30673 - 3,78213 = \\ &= -1,05724. \end{aligned}$$

3. Определение внутренних сил

См. пример I и таблицы 9, 10, 11.

Эпюры m_2 , T_1 и S см. рис. 9.

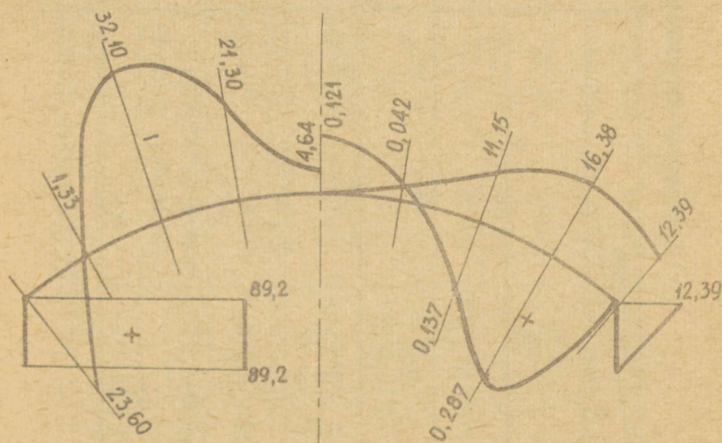


Рис. 9. $\max T_1 (T/M)$

$\max S (T/M); m_2 (T^M/M)$

Таблица 9

а) Поперечные изгибающие моменты m_2 (тм/м)

Сечение		0	I	2	3	4
$M_0 = -qR^2 \frac{\bar{\psi}_0}{100}$	$\bar{\psi}_0 =$	23,3956 -8,760	12,7842 -4,790	5,4261 -2,033	1,2715 -0,477	0
$a_1 m_1 = -R^2 \frac{\psi_1}{100} a_1$	$\psi_1 =$	3,1603 1,145	1,1612 0,421	0,2554 0,093	0,0170 0,006	0
$a_2 m_2 = R^2 \frac{\psi_2}{100} a_2$	$\psi_2 =$	2,6320 0,704	1,3683 0,366	0,4007 0,107	0,0320 0,009	0
$a_1 m_1 = -R^2 \frac{\psi_1}{100} a_1$	$\psi_1 =$	4,1395 3,770	1,9155 1,745	0,6163 0,561	0,0829 0,075	0
$(q_0 + r + \frac{b_0}{2} a_1) m_a =$ $= [0,980 - 1,05724 - 0,41 \cdot 1,04333] \cdot$ $\cdot (-R \frac{\psi_a}{100})$	$\psi_a =$	64,2788	46,9140	30,0768	14,2788	0
$\Sigma = m_2$		-0,121	-0,042	0,137	0,287	0

б) Продольные нормальные силы T_1

Сечение	0	1	2	3	4	4	5
$a_1 \frac{\partial \zeta_1}{\partial s}$	$0,483a_1 =$ $= -0,201$	$0,342a_1 =$ $= -0,142$	0	$-0,342a_1 =$ $= 0,142$	$-0,483a_1 =$ $= 0,201$	-	-
$a_2 \frac{\partial \zeta_2}{\partial s}$	$0,966a_2 =$ $= 0,296$	0	$-0,966a_2 =$ $= -0,296$	0	$0,966a_2 =$ $= 0,296$	-	-
$a_1 \frac{\partial \zeta_1}{\partial s}$	$0,1538a_1 =$ $= -0,161$	$-0,161$	$-0,161$	$-0,161$	$-0,161$	$-1,22a_1 =$ $= 1,270$	1,270
$\Sigma = \Delta T$	$-0,066$	$-0,303$	$-0,457$	$-0,019$	$0,336$	1,270	1,270
$T_{1x} = 0 \cdot \Sigma$	0	0	0	0	0	0	0
$T_{1x} = 18,0 \cdot \Sigma$	$-1,19$	$-5,46$	$-8,24$	$-0,34$	6,06	22,90	22,90
$T_{1x} = 33,4 \cdot \Sigma$	$-2,20$	$-10,10$	$-15,25$	$-0,64$	11,20	42,50	42,50
$T_{1x} = 45,9 \cdot \Sigma$	$-3,03$	$-13,90$	$-21,00$	$-0,87$	15,41	58,30	58,30
$T_{1x} = 56,1 \cdot \Sigma$	$-3,70$	$-17,00$	$-25,70$	$-1,07$	18,85	71,30	71,30
$T_{1x} = 62,5 \cdot \Sigma$	$-4,13$	$-18,94$	$-28,60$	$-1,19$	21,00	79,40	79,40
$\max T_1 = 70,2 \cdot \Sigma$	$-4,64$	$-21,30$	$-32,10$	$-1,33$	23,60	89,20	89,20

в) Сдвигающие силы S.

Сечение	0	I	2	3	4	4	5
$\alpha_1 \cdot \sin \frac{\pi s}{s_0}$	0 0	0,7071 $\alpha_1 =$ =-0,294	1,000 $\alpha_1 =$ =-0,416	0,7071 $\alpha_1 =$ =-0,294	0 0	0 0	0 0
$\alpha_2 \cdot \sin \frac{2\pi s}{s_0}$	0 0	1,000 $\alpha_2 =$ =0,306	0 -	-1,000 $\alpha_2 =$ =-0,306	0 0	0 0	0 0
$\alpha_x \frac{s}{s_0}$	0 0	0,25 $\alpha_x =$ =-0,261	0,50 $\alpha_x =$ =-0,522	0,75 $\alpha_x =$ =-0,782	1,00 $\alpha_x =$ =-1,043	1,00 $\alpha_x =$ =-1,043	0 0
$\Sigma = \Sigma$	0	-0,249	-0,938	-1,382	-1,043	-1,043	0
$\max S = S_I = -11,85 \cdot \Sigma$	0	2,950	11,150	16,380	12,390	12,390	0
$S_{II} = -10,22 \cdot \Sigma$	0	2,545	9,600	14,120	10,680	10,680	0
$S_{III} = -8,594 \cdot \Sigma$	0	2,135	8,050	11,85	8,970	8,970	0
$S_{IV} = -6,966 \cdot \Sigma$	0	1,731	6,530	9,610	7,280	7,280	0
$S_V = -5,348 \cdot \Sigma$	0	1,329	5,010	7,370	5,580	5,580	0
$S_{VI} = -3,720 \cdot \Sigma$	0	0,926	3,490	5,130	3,890	3,890	0

4. Проверка результатов расчета

а) Проверяем равновесие моментов, как у "большой" балки.
Момент оболочки (применяя формулу Симпсона)

$$0,543 \cdot (-4,64 \cdot 3,00 - 21,30 \cdot 11,36 - 32,10 \cdot 4,84 - 1,33 \cdot 6,93 + 23,60 \cdot 0,82) = -218,0 \text{ тм.}$$

$$\text{Момент бортового элемента } \frac{89,20 \cdot 0,82^2}{2} = 30,0 \text{ тм.}$$

Внешний момент

$$M = (6,5166 \cdot 0,430 + 0,980) \cdot 70,2 - r \cdot 70,2 = 189,5 \text{ тм}$$

$$\Delta M = -218,0 + 30,0 + 189,5 = 1,5 \text{ тм.}$$

б) Проверка равновесия продольных сил

$$\Delta T_1 = 0,543 \cdot (-4,64 - 4 \cdot 21,30 - 2 \cdot 32,10 - 4 \cdot 1,33 + 23,60) + 0,82 \cdot 89,20 = -73,7 + 73,1 = -0,6 \text{ т.}$$

Пример 3. Средняя волна.

1. Нагрузки

а) нагрузки на криволинейную часть см. пример I, таблица I.

$$q = g + p = 327,0 + 103,0 = 430,0 \text{ кг/м}^2.$$

б) нагрузки на бортовой элемент.

За расчетную нагрузку на бортовой элемент принимаем $q_0 = 910 \text{ кг/м}$ (собственный вес, подвешенная нагрузка и т.д.).

2. Расчетная схема, метод и ход расчета.

Расчетная схема представлена на рис. 10. Расчет произведен методом, изложенным в [2], где предполагается наличие поперечных трещин в растянутой зоне оболочки. Представим, что вся арматура сосредоточена в виде растянутого стрингера на дно бортового элемента и позволяем в остальном сечении развития трещины до сжатой зоны. Так как в трещине продольные силы равняются нулю, то ζ - диаграмма на протяжении всей трещины постоянная. Расчет производится как у оболочки со стрингерами (см. рис. 10).

Условие равновесия половины полоски

$$(s_0 \cdot q + \frac{q_0}{2}) + [b_0 + R(1 - \cos \alpha_0)] a_{II} = 0 \quad (37)$$

откуда

$$a_{II} = - \frac{s_0 q + \frac{q_0}{2}}{b_0 + R(1 - \cos \alpha_0)} = - \frac{6,5166 \cdot 0,430 + 0,455}{0,820 + 9,3343(1 - 0,7660)} = -1,085$$

Таким образом растягивающая сила в бортовом элементе

$$\max N_1 = -2 \cdot \frac{l^2}{8} \cdot a_{II} = -2 \cdot \frac{23,7^2}{8} (-1,085) = 152,5 \text{ т.} \quad (38)$$

Ориентировочная ширина сжатой зоны при бетоне марки "200"

$$\chi = \frac{\max N_1}{\delta \cdot R_n} = \frac{152500}{7 \cdot 100} = 218 \text{ см} \approx \frac{1}{6} s_0. \quad (39)$$

Далее произведем расчет поперечных изгибающих моментов предполагая, что продольный край оболочки рядом стоящих панелей имеет геометрические связи, которые препятствуют повороту криволинейной грани и горизонтальному перемещению. Появляются статически неопределенные величины χ_1 и χ_2 (см. рис. 11). Изгибающий момент статически определенной схемы находят в табличной форме.

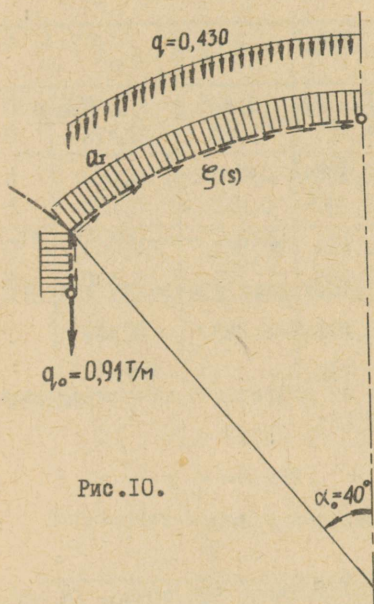
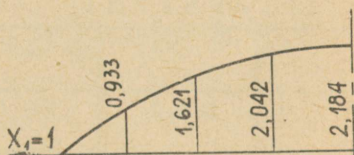
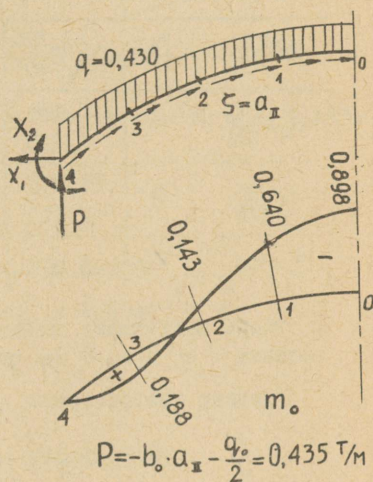


Рис. I0.



$$m_1 = m_b = \frac{R}{100} \psi_b$$

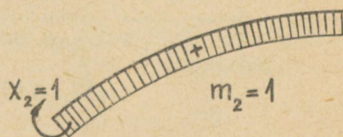


Рис. I1.

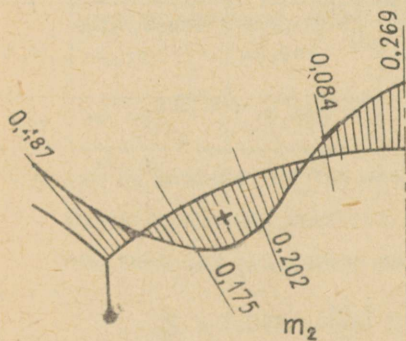


Рис. I2.

Т а б л и ц а 12

Сечение	0	I	2	3	4
$-q R^2 \frac{\psi_0}{100}$ $\psi_0 =$	23,396 -8,740	12,784 -4,777	5,426 -2,028	1,272 -0,476	0 0
$-a_{II} R^2 \frac{\psi_{II}}{100}$ $\psi_{II} =$	5,534 5,230	2,360 2,232	0,705 0,666	0,089 0,084	0 0
$PR \frac{\psi_a}{100}$ $\psi_a =$	64,279 2,612	46,914 1,905	30,077 1,219	14,279 0,580	0 0
$\Sigma = m_0$	-0,898	-0,640	-0,143	0,188	0

Эпюры изгибающих моментов от статически неопределенных величин (m_1 и m_2) см. рис. II.

Упругие коэффициенты.

$$\delta_{11} = \int m_1^2 ds = \int m_b^2 ds = \frac{R^3}{10^4} \psi_{bb} = \frac{813,2882}{10000} \cdot 201,4054 = 16,380;$$

$$\delta_{12} = \int m_1 m_2 ds = \frac{R^2}{100} \psi_{Ab} = \frac{87,1292}{100} \cdot 10,7988 = 9,409;$$

$$\delta_{22} = \int m_2^2 ds = s_0 = 6,517.$$

δ_{10} и δ_{20} находят численным интегрированием по методу Симпсона.

$$\delta_{10} = \int m_0 m_1 ds = \frac{1,628}{3} \cdot [-2,184 \cdot 0,898 - 4 \cdot 2,042 \cdot 0,640 - 2 \cdot 1,621 \cdot 0,143 + 4 \cdot 0,933 \cdot 0,188] = -3,770$$

$$\delta_{20} = \int m_0 m_2 ds = \frac{1,628}{3} \cdot [-0,898 - 4 \cdot 0,640 - 2 \cdot 0,143 + 4 \cdot 0,188] = -1,626.$$

Система уравнений следующая:

$$\begin{cases} 16,380 \cdot x_1 + 9,409 \cdot x_2 = 3,770 \\ 9,409 \cdot x_1 + 6,517 \cdot x_2 = 1,626 \end{cases}$$

откуда

$$x_1 = 0,511 ;$$

$$x_2 = -0,487 .$$

Изгибающие моменты находим из таблицы 13.

		Т а б л и ц а 13				
сеч.	0	1	2	3	4	
m_0	-0,898	-0,640	-0,143	0,188	0	
$X_1 m_1$	$0,511 \cdot 2,184 =$ -1,116	$0,511 \cdot 2,042 =$ -1,043	$0,511 \cdot 1,621 =$ -0,832	$0,511 \cdot 0,933 =$ =0,474	0	
$X_2 m_2$	-0,487	-0,487	-0,487	-0,487	-0,487	
$\Sigma = m$	-0,269	-0,084	0,202	0,175	-0,487	

Эпюры изгибающих моментов см. рис. 12.

Максимальная сдвигающая сила

$$S = 1,085 \cdot \frac{23,7}{2} = 12,84 \text{ т/м}$$

УШ. РАСЧЕТ ТОРЦЕВЫХ ДИАФРАГМ

Расчет торцевых диафрагм оболочек существенно отличается от расчета обычных рамных или арочных конструкций, так как нагрузка оболочки передается им сдвигающими силами. Не делая большой ошибки в результатах вычисления, можно предположить, что сдвигающие силы на совместной линии оболочки и диафрагмы постоянные. Для определения внутренних сил диафрагмы надо суммировать внутренние силы, полученные от внешней нагрузки, собственного веса диафрагмы и при необходимости и от температуры.

Исходные данные для расчета диафрагмы в виде двухшарнирной арки, очерченной по окружности с постоянным поперечным сечением представлены на рис. 13, бесшарнирной арки на рис. 14, диафрагмы в виде рамы с затяжкой на рис. 15. Для определения величин ψ_{aa} и т.д. применяется таблица 32.

При расчете диафрагмы сплошного сечения (см. рис. 2, тип в) предполагаем, что сдвигающая сила $S = \frac{l}{2} \cdot \zeta$ на совместной линии оболочки и диафрагмы постоянная. Не учитывая влияния сдвигающих сил на бортовой элемент, находим вертикальный результат половины криволинейной части (см. рис. 16).

$$V = (1 - \cos \alpha_0) S \cdot R \quad (40)$$

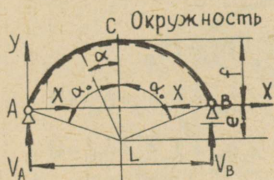
и горизонтальный результат

$$H = S \cdot R \sin \alpha_0 \quad (41)$$

Координаты места приложения общего результата

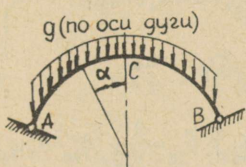
$$C = \frac{R}{2(1 - \cos \alpha_0)} (2 \cdot \sin \alpha_0 - \sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 - \alpha_0); \quad (42)$$

$$d = \frac{R}{2 \sin \alpha_0} (\alpha_0 - \sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0). \quad (43)$$

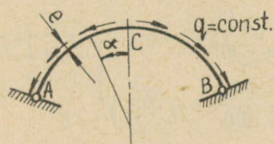


$$R = \frac{f}{2} \left[1 + \left(\frac{L}{2f} \right)^2 \right] ; X = \frac{\delta_{40}}{\delta_{41}}$$

$$\delta_{41} = \frac{R^3 (\alpha_0 - 3 \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 + 2 \alpha_0 \cos^2 \alpha_0) + 2 \frac{R^3}{10^4} \psi_{bb}}{R \frac{J}{F} (\alpha_0 + \sin \alpha_0 \cos \alpha_0) + L \frac{EJ}{E_z F_z}}$$



$$\delta_{40} = -2gR^4 [\alpha_0 (1,25 - \sin^2 \alpha_0 + \cos \alpha_0) - 2,25 \sin \alpha_0 \cos \alpha_0] + 2gR^4 \alpha_0 (1 + \alpha_0 \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 - \cos \alpha_0 - 1,5 \sin^2 \alpha_0) = -\frac{2gR^4}{10^4} (\psi_{ob} - \alpha_0 \psi_{ab})$$



$$M = -gR^2 \frac{\bar{\psi}_0}{100} + gR^2 \alpha_0 \frac{\psi_a}{100} - XR \frac{\psi_b}{100}$$

$$\delta_{40} = -2qR^3 \left[\frac{R}{10^4} \psi_{bb} - \frac{f}{10^4} \psi_{ab} + e_0 \left(\frac{\alpha_0^2}{2} \cos \alpha_0 - 1 + \cos \alpha_0 \right) \right]$$

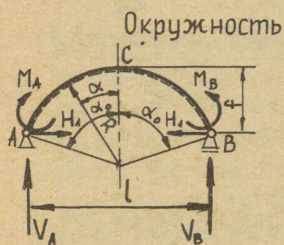
$$M = qf \frac{R \psi_a}{100} - qR^2 \frac{\psi_b}{100} - e_0 qR (\alpha_0 - \alpha) - XR \frac{\psi_b}{100}$$

От температуры

$$\delta_{4t} = -EJ \alpha_t \Delta t L$$

Рис. 13.

Симметричные схемы нагрузки



$$X_1 = H_1; \quad X_2 = M_A = M_B$$

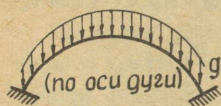
Находят из системы уравнений

$$\begin{cases} X_1 \delta_{11} + X_2 \delta_{12} + \delta_{10} = 0 \\ X_1 \delta_{12} + X_2 \delta_{22} + \delta_{20} = 0 \end{cases}$$

$$\delta_{11} = \frac{R^3}{10^4} \psi_{bb} + \frac{J}{2F} R (\alpha_0 + \sin \alpha_0 \cos \alpha_0)$$

$$\delta_{12} = -\frac{R^2 \psi_{Ab}}{100}; \quad \delta_{22} = R \alpha_0$$

$$\delta_{10} = -\frac{gR^4}{10^4} (\psi_{ob} - \alpha \psi_{ab}); \quad \delta_{20} = \frac{gR^3}{100} (\psi_{A0} - \alpha_0 \psi_A)$$



$$M = \frac{gR^2}{100} (\alpha_0 \psi_0 - \psi_0) + X_2 - X_1 R \frac{\psi_b}{100}$$

$$\delta_{10} = -qR^3 \left[\frac{R}{10^4} \psi_{Ib} - \frac{f}{10^4} \psi_{ab} + e_0 \left(\frac{\alpha_0^2}{2} \cos \alpha_0 - 1 + \cos \alpha_0 \right) \right]$$

$$\delta_{20} = -qR^2 \left(\frac{f \psi_{A0}}{100} - \frac{R \psi_{A0}}{100} + e_0 \frac{\alpha_0^2}{2} \right)$$



$$M = qf \frac{R \psi_0}{100} - qR^2 \frac{\psi_{II}}{100} - e_0 qR (\alpha_0 - \alpha) + X_2 - X_1 R \frac{\psi_b}{100}$$

Рис. 14.

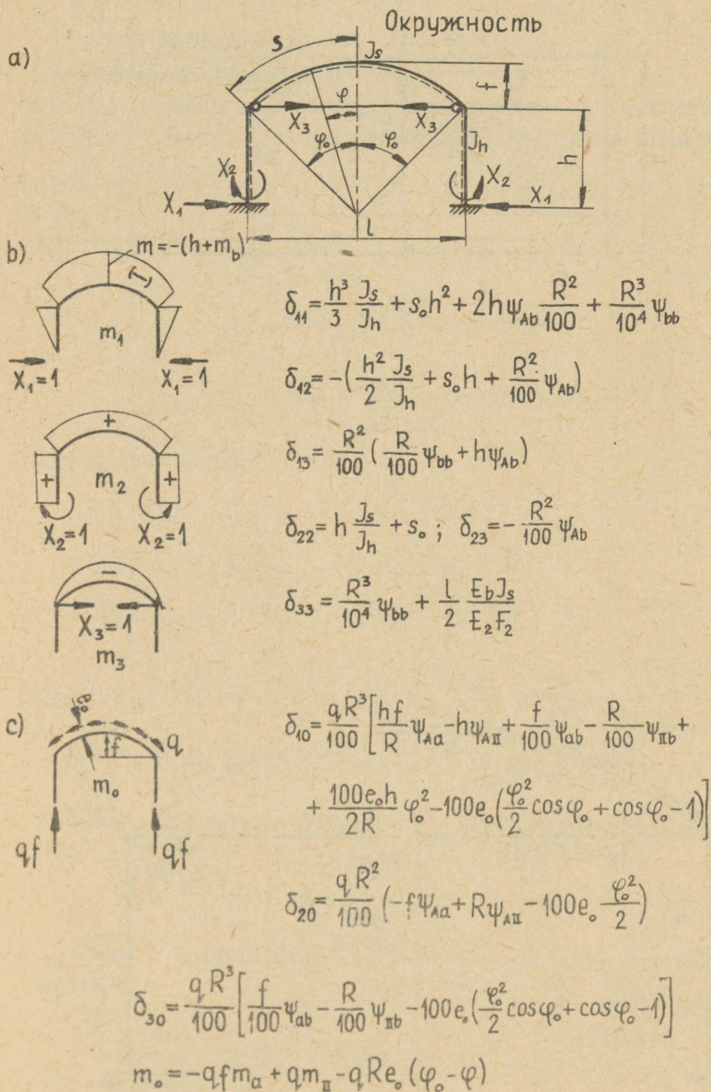


Рис. 15.

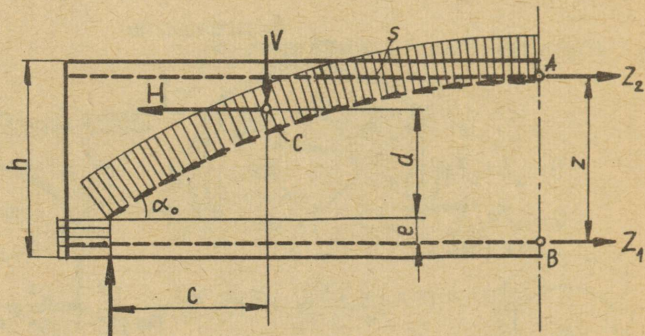


Рис. 16.

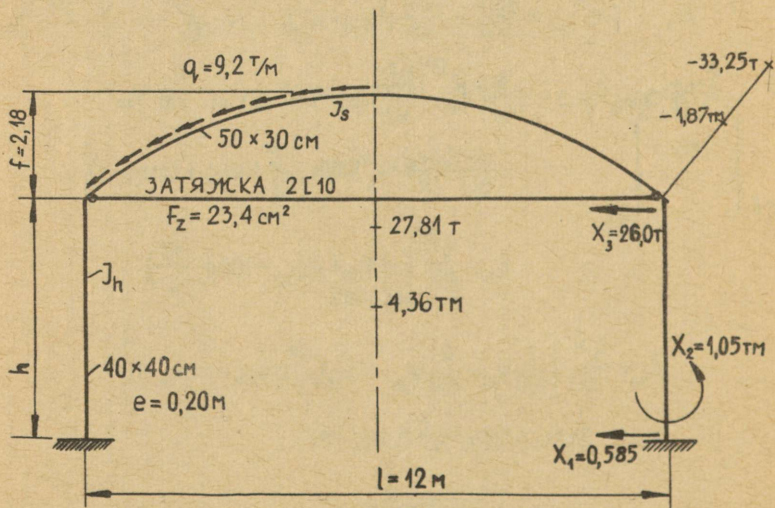


Рис. 17.

Пример I (продолжение)

Расчет рамной диафрагмы с затяжкой.

Исходные данные см. рис. I7.

Равномерно распределенные сдвигающие силы ζ торцевой диафрагмы находим путем суммирования по формуле Симпсона:

$$\frac{6,5166}{4 \cdot 3} (0 + 4 \cdot 1,697 + 2 \cdot 7,50 + 4 \cdot 16,07 + 24,39) = 60,0$$

$$q = \frac{60,0}{6,5166} = 9,2 \text{ т/м};$$

$$J_s = \frac{0,3 \cdot 0,5^3}{12} = 0,00312 \text{ м}^4;$$

$$J_h = \frac{0,4 \cdot 0,4^3}{12} = 0,00213 \text{ м}^4.$$

Система уравнений:

$$X_1 \cdot b_{11} + X_2 \cdot b_{12} + X_3 \cdot b_{13} + b_{10} = 0$$

$$X_1 \cdot b_{22} + X_2 \cdot b_{22} + X_3 \cdot b_{23} + b_{20} = 0$$

$$X_1 \cdot b_{33} + X_2 \cdot b_{23} + X_3 \cdot b_{33} + b_{30} = 0,$$

$$\begin{aligned} \text{где } b_{11} &= \frac{h^3}{3} \cdot \frac{J_s}{J_h} + s_0 h^2 + 2h \cdot \psi_{Ab} \frac{R^2}{100} + \frac{R^3}{10^4} \cdot \psi_{bb} = \\ &= \frac{5,0^3}{3} \cdot 1,465 + 6,5166 \cdot 5,0^2 + 2 \cdot 5,0 \cdot 10,799 \cdot \frac{9,334^2}{100} + \\ &+ \frac{9,334^3}{10^4} \cdot 201,4054 = 334,12; \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} b_{12} &= -\left(\frac{h^2}{2} \frac{J_s}{J_h} + s_0 h + \frac{R^2}{100} \psi_{Ab} \right) = \\ &= -\left(\frac{5,0^2}{2} \cdot 1,465 + 6,5166 \cdot 5,0 + \frac{9,334^2}{100} \cdot 10,799 \right) = -60,22; \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} b_{13} &= \frac{R^2}{100} \left(\frac{R}{100} \psi_{bb} + h \psi_{Ab} \right) = \\ &= \frac{9,334^2}{100} \cdot \left(\frac{9,334}{100} \cdot 201,41 + 5,0 \cdot 10,799 \right) = 63,40; \end{aligned} \quad (46)$$

$$\delta_{22} = h \frac{J_s}{J_h} + S_o = 5,00 \cdot I,465 + 6,5166 = 13,84; \quad (47)$$

$$\delta_{23} = -\frac{R^2}{100} \Psi_{Ab} = -\frac{9,334^2}{100} \cdot 10,799 = -9,41; \quad (48)$$

$$\delta_{33} = \frac{R^3}{10^4} \Psi_{bb} + \frac{l}{2} \cdot \frac{E_b J_s}{E_z \cdot F_z} = \frac{813,29}{10^4} \cdot 201,4054 +$$

$$+ \frac{12,0}{2} \cdot \frac{I}{10} \cdot \frac{0,00312}{0,00234} = 17,18; \quad (49)$$

$$\delta_{40} = \frac{q R^3}{100} \left[\frac{h \cdot f}{R} \Psi_{Aa} - h \cdot \Psi_{A\pi} + \frac{f}{100} \Psi_{Ab} - \frac{R}{100} \Psi_{\pi b} + \right.$$

$$\left. + \frac{100 e_o h}{2R} \alpha_o^2 - 100 e_o \cdot \left(\frac{\alpha_o^2}{2} \cos \alpha_o + \cos \alpha_o - 1 \right) \right] =$$

$$= \frac{9,20 \cdot 9,334^3}{100} \cdot \left[\frac{(2,184 \cdot 5,0)}{9,334} \cdot (-21,479) - (5,0 \cdot (-0,9738)) + \right.$$

$$+ \frac{(2,184 \cdot (-420,46))}{100} - \frac{(9,334 \cdot (-21,203))}{100} +$$

$$+ \frac{100 \cdot 0,20 \cdot 5,0}{2 \cdot 9,334} \cdot 0,69813^2 - 100 \cdot 0,2 \cdot \left(\frac{0,69813^2}{2} \cdot 0,76604 + \right.$$

$$\left. + 0,76604 - 1 \right) \left. \right] = -1770,32; \quad (50)$$

$$\delta_{20} = \frac{q R^2}{100} (-f \Psi_{Aa} + R \Psi_{A\pi} - 100 \cdot e_o \cdot \frac{\alpha_o^2}{2}) =$$

$$= 9,2 \cdot 0,8713 \cdot \left[-2,184 \cdot (-21,479) + 9,334 \cdot (-0,97384) - 100 \cdot \right.$$

$$\left. \cdot 0,2 \cdot \frac{0,69813^2}{2} \right] = 264,5; \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \delta_{30} &= \frac{q R^3}{100} \left[\frac{f}{100} \psi_{ab} - \frac{R}{100} \psi_{\pi b} - \right. \\ &\quad \left. - 100 e_0 \left(\frac{\alpha_0^2}{2} \cdot \cos \alpha_0 + \cos \alpha_0 - 1 \right) \right] = \\ &= 9,2 \cdot 8,1329 \cdot [-9,18 + 1,98 + 0,95] = -468,28. \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{cases} 334,12 X_1 - 60,22 X_2 + 63,40 X_3 = 1770,3 \\ -60,22 X_1 + 13,84 X_2 - 9,41 X_3 = -264,5 \\ 63,40 X_1 - 9,41 X_2 + 17,18 X_3 = 468,3 \end{cases}$$

Решая систему уравнения, получим

$$X_1 = 0,585 \text{ т}$$

$$X_2 = 1,05 \text{ тм}$$

$$X_3 = 26,0 \text{ т}$$

Изгибающие моменты находим путем суммирования в таблице 14.

Т а б л и ц а 14

Сечение	0	1	2	3	4
$M_4 = X_2 \cdot h X_1 = 1,05 \cdot 5,0 \cdot 0,585$	-1,87	-1,87	-1,87	-1,87	-1,87
$q f \cdot \frac{R}{100} \cdot \psi_a = 1,871 \psi_a$	120,20	87,60	56,15	26,70	0
$-(X_1 + X_3) \cdot \frac{R}{100} \cdot \psi_b = -2,48 \psi_b$	-57,75	-54,15	-42,80	-24,75	0
$-q \cdot \frac{R^2}{100} \cdot \psi_{\pi} = -8,02 \psi_{\pi}$	-44,30	-18,85	-5,59	-0,71	0
$-e q R (\alpha_0 - \alpha) = -17,12 \cdot (\alpha_0 - \alpha)$	-11,92	-8,93	-5,95	-2,99	0
$\Sigma = M$	4,36	3,80	-0,06	-3,52	-1,87

Нормальные силы в сечении 4:

$$N_4 = -(X_1 + X_3) \cdot \cos \alpha_0 - q f \sin \alpha_0 \approx -33,25 \text{ т} \quad (53)$$

В сечении O_3

$$N_0 = -(X_4 + X_3) + q \cdot \frac{l}{2} \approx 27,81 \text{ т. (54)}$$

Эпюры внутренних сил см. рис. 17.

Пример 3 (продолжение).

Расчет диафрагмы сплошного сечения.

Константная сдвигающая сила в местах примыкания оболочки к диафрагме

$$S = 12,8 \text{ т/м.}$$

Координаты места приложения общего результата:

$$c = \frac{9,334}{2 \cdot 0,234} \cdot (2 \cdot 0,6428 - 0,6428 \cdot 0,7660 - 0,6981) = 1,89 \text{ м;}$$

$$d = \frac{9,334}{2 \cdot 0,6428} \cdot (0,6981 - 0,6428 \cdot 0,7660) = 1,49 \text{ м.}$$

Вертикальные и горизонтальные результаты:

$$V = \frac{23,7}{2} \cdot 9,334 \cdot 1,085 \cdot 0,234 = 28,1 \text{ т;}$$

$$H = \frac{23,7}{2} \cdot 9,334 \cdot 1,085 \cdot 0,643 = 77,0 \text{ т;}$$

$$e + d = 0,72 + 1,49 = 2,21 < z = 2,8 \text{ м}$$

- таким образом в среднем сечении диафрагмы нет сжатой зоны.

Из $\sum M_A = 0$ находим

$$Z_1 \cdot z - V \cdot c - H(z - d - e) = 0$$

$$Z_1 \cdot 2,8 - 28,1 \cdot 1,89 - 77,0 \cdot (3,0 - 1,49 - 0,72) = 0;$$

$$Z_1 = \frac{113,9}{2,8} = 40,7 \text{ т;}$$

$$Z_2 = 77,0 - 40,7 = 36,3 \text{ т.}$$

IX. РУКОВОДСТВО ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ

I. Армирование бортового элемента

1) Продольные нормальные силы в бортовом элементе и в оболочке должны быть восприняты арматурой, которую выбирают соответственно результату $\Sigma T(N)$ максимальных продольных сил $\max T_1$.

Таким образом растянутая арматура в бортовом элементе

$$F_a = \frac{\Sigma T}{R_a} \geq 0,2\% \text{ всего поперечного сечения.} \quad (55)$$

2) Расположение растянутой арматуры:

а) В бортовом элементе крайней волны.

Инструкции [4] позволяют расположить $80\% F_a$ в бортовой элемент, из чего 60% на дно бортового элемента. Если расчеты сделаны по упругой стадии (пример I), можно сечение арматуры уменьшить на $5 + 10\%$, учитывая увеличение плеча пары внутренних сил.

При армировании нужно следить, чтобы было обеспечено заполнение бетоном пространства между арматурой.

б) В бортовом элементе средней волны вся арматура F_a располагается на дно бортового элемента. Так как N найдено из предельного условия, то уменьшение площади арматуры недопустимо.

3) 30% от основной арматуры F_a нужно довести до торцевой диафрагмы. Уменьшение поперечного сечения арматуры в пределах пролета оболочки осуществляют приваркой более меньшего диаметра арматурой или при помощи загиба арматуры.

Место уменьшения поперечного сечения арматуры выбирают соответственно изменению T_1 — эпюры вдоль пролета, причем арматуру большего диаметра надо удлинить теоретически на 20ϕ .

Примечание. При многопролетных в продольном направлении оболочках над диафрагмами должна быть арматура, площадь се-

чения которой не менее площади арматуры всей растянутой зоны в середине пролета. Продольная арматура над диафрагмой должна располагаться 50% F_a на расстоянии не менее $0,2L$ и остальные 50% F_a на $0,1L$ в обе стороны диафрагмы.

2. Арматура главных растягивающих напряжений

1) В зонах, где главные растягивающие напряжения σ , превышают расчетное сопротивление бетона на растяжение R_p , нужно главные растягивающие напряжения полностью воспринять арматурой. Арматура может быть из сеток с продольными и поперечными стержнями, а также из наклонных стержней (косая арматура).

Приблизительная потребность арматуры находится по формуле

$$F_{от} = \frac{\frac{T_1}{2} + S}{R_a} \quad (56)$$

где $F_{от}$ — поперечное сечение косо́й арматуры или проекция стержней сеток под 45° .

T_1 — продольная нормальная сила в данной точке (сжатие " - ", растяжение "+").

S — сдвигающие силы в данной точке.

2) Сжатые зоны и зоны, где главные растягивающие напряжения менее R_p , армируются конструктивно шагом 20 — 25 см, сечением не менее 0,2% площади бетона (см.рис.18).

3) В местах, где рядом с арматурными сетками применяют наклонную (косую) арматуру, нужно их заанкеровать в бортовой элемент и торцевую диафрагму.

4) Общее требование — сжимающие напряжения не должны превышать прочность бетона на сжатие, главные растягивающие напряжения не должны превышать $0,25 R_u$. В противном случае надо создать утолщения.

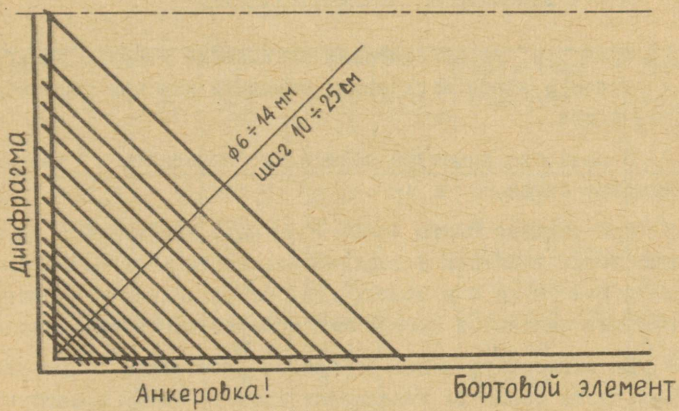


Рис. 18.

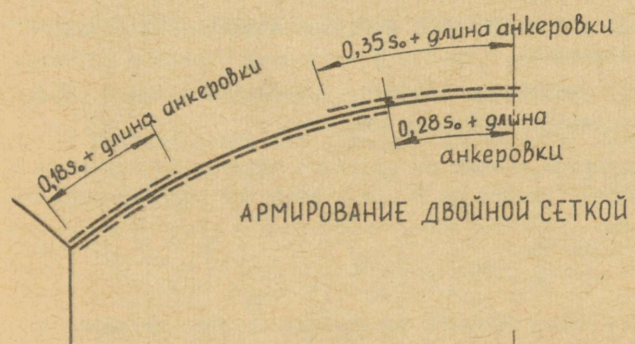


Рис. 19.

3. Арматура изгибающих моментов

1) Арматура, воспринимающая изгибающие моменты, выбирается согласно эпюры изгибающих моментов, как при железобетонной плите.

2) В качестве арматуры желательно применять сварные арматурные сетки.

3) При толщине плиты более 9 см надо принимать арматурные сетки у нижней и верхней плоскости. Двойная сетка применяется также и в местах, где от различных условий загрузки ожидается изгибающие моменты переменных знаков.

4) На совместную линию бортового элемента и криволинейной части оболочки укладывают двойную сетку арматуры ($\phi 6 - 10$ мм, шаг ≤ 20 см).

В случае внешней волны эта арматура применяется конструктивно, а при внутренних волнах мощность арматуры определяется расчетами.

Арматуру изгибающих моментов внутренней волны желательно расположить согласно рис. 19.

5) Изгибающий момент от краевого эффекта на совместной линии торцевой диафрагмы и плиты оболочки определяется по формуле (см. [1]).

$$m_1 = -0,3q \cdot R \cdot \delta. \quad (57)$$

Согласно этому моменту определяют соответствующую арматуру.

X АРМИРОВАНИЕ (ПРИМЕРЫ)

В основу принимаем бетон марки "200" и сталь А-I и А-II.

I. Продольная растянутая арматура

1) Крайняя волна (по примеру I).

Продольную арматуру находим в табличной форме.

Т а б л и ц а 15

Зона	ΣT	m	$\frac{\Sigma T}{m}$	$F_a = \frac{\Sigma T}{m R_a}$	$0,3 F_{a \max}$	Выбранная арматура	Действи- тельная F_a
	т		т				
max	152,3	1,1	138,3	51,3	15,4	10 ϕ 25	49,1
VI	136,0	1,1	123,5	45,8		8 ϕ 25+2 ϕ 20	45,6
V	122,0	1,1	111,0	41,1		6 ϕ 25+4 ϕ 20	41,9
IV	100,0	1,1	91,0	33,7		4 ϕ 25+6 ϕ 20	38,4
III	72,6	1,1	66,0	24,6		2 ϕ 25+8 ϕ 20	34,9
II	39,2	1,1	35,6	13,5		10 ϕ 20	31,4
I	0	1,1	0	0		10 ϕ 20	31,4

Изменение диаметра арматуры производится путем приварки арматуры меньшего диаметра. В середине оболочки арматуру 6 ϕ 25 расположили на дно бортового элемента.

2) Крайняя волна (по примеру 2) с опертым краем

Т а б л и ц а 16

Зона	ΣT	m	$\frac{\Sigma T}{m}$	$F_a = \frac{\Sigma T}{m R_a}$	$0,3 F_{a \max}$	Выбранная арматура	Действи- тельная F_a
	т		т				
max	91,3	1	91,3	33,8	10,2	6 ϕ 25+2 ϕ 18	34,54
VI	81,2	1	81,2	30,1		4 ϕ 25+4 ϕ 18	29,81
V	73,0	1	73,0	27,1		4 ϕ 25+4 ϕ 18	29,81
IV	59,8	1	59,8	22,1		2 ϕ 25+6 ϕ 18	25,08
III	43,4	1	43,4	16,1		8 ϕ 18	20,36
II	23,4	1	23,4	8,7		8 ϕ 18	20,36
I	0	1	0	0		8 ϕ 18	20,36

3) Внутренняя волна (по примеру 3).

Т а б л и ц а 17

Зона	ΣT	m	$\frac{\Sigma T}{m}$	$F_a = \frac{\Sigma T}{m R_a}$	$0,3 F_{a \max}$	Выборная арматура	Действительная F_a см ²
	т		т	см ²	см ²		
max	152,5	I	152,5	56,5	17,0	10 ϕ 25+ 2 ϕ 20	55,4
VII	135,8	I	135,8	50,3		8 ϕ 25+ 4 ϕ 20	51,9
V	122,0	I	122,0	45,2		6 ϕ 25+ 6 ϕ 20	48,2
IV	100,0	I	100,0	37,1		3 ϕ 25+ 9 ϕ 20	42,9
III	72,6	I	72,6	26,9		12 ϕ 20	37,8
II	39,2	I	39,2	14,5		9 ϕ 20+ 3 ϕ 16	34,2
I	0	I	0	0		9 ϕ 20+ 3 ϕ 16	34,2

100% F_a расположим на дно бортового элемента.

2. Арматура главных растягивающих напряжений

Расчет арматуры главных растягивающих напряжений производим в табличной форме.

I) Крайняя волна (по примеру I).

Т а б л и ц а 18

№ точ-ки	T_1	S	$\frac{T_1}{2} + S$	$(\frac{T_1}{2} + S) : R_a$	Арматура
	т/м	т/м	т/м	см ²	
I	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	5 ϕ 10
I	0	1,70	1,70	0,63	5 ϕ 10
2	0	7,50	7,50	2,75	5 ϕ 10
3	0	16,07	16,07	5,95	7,5 ϕ 10
4	0	24,39	24,39	9,00	12 ϕ 10

Продолжение таблицы 18

1	2	3	4	5	6
7	-3,26	1,46	-0,17	-	5 φ 10
8	-7,30	6,48	2,83	1,04	5 φ 10
9	-8,10	13,85	9,80	3,64	5 φ 10
10	-7,53	21,01	17,25	6,38	8 φ 10
14	-15,07	11,64	4,11	1,52	5 φ 10
15	-13,98	17,65	10,65	3,94	5 φ 10
19	-19,20	14,30	4,70	1,75	5 φ 10

Выбранная арматура применяется и при армировании внутренней волны (пример 3).

2) Крайняя волна (по примеру 2) с опертым краем.

Т а б л и ц а 19

№ точ- ки	T_f	S	$\frac{T_f}{2} + S$	$(\frac{T_f}{2} + S) : R_a$	Арматура
	т/м	т/м	т/м	см ²	
0	0	0	0	0	5 φ 10
1	0	2,95	2,95	1,10	5 φ 10
2	0	11,15	11,15	4,13	6 φ 10
3	0	16,38	16,38	6,07	8 φ 10
4	0	12,39	12,39	4,58	6 φ 10
7	-5,46	2,55	-0,18	-	-
8	-8,24	9,60	5,48	2,03	5 φ 10
9	-0,34	14,12	13,95	5,17	7 φ 10
10	+6,06	10,68	13,71	5,08	7 φ 10
13	-15,25	8,05	0,43	0,16	5 φ 10
14	-0,64	11,85	11,53	4,28	6 φ 10
15	+11,20	8,97	14,57	5,40	7 φ 10
18	-0,87	9,61	9,43	3,49	5 φ 10
19	+15,41	7,28	14,98	5,54	7 φ 10
21	-1,07	7,37	6,84	2,53	5 φ 10
22	+18,85	5,58	15,0	5,55	7 φ 10
24	+21,00	3,89	14,39	5,32	7 φ 10

3. Арматура изгибающих моментов

1) По примеру 1

Т а б л и ц а 20

Сече- ние	m_2 тм/м	δ см	h_0 см	μ	F_a см ²	Арматура
0	-0,299	7	5,5	0,50	2,75	6φ8 или 10φ6
1	-0,241	7	5,0	0,53	2,65	6φ8 или 10φ6
2	-0,090	7	3,0	0,50	1,50	5φ6
3	0,094	7	5,0	0,18	0,90	5φ6
4	0	10	5,5			5φ6 верхняя 5φ6 нижняя

2) По примеру 2

Т а б л и ц а 21

Сече- ние	m_2 тм/м	δ см	h_0 см	μ	F_a см ²	Арматура
0	-0,121	7	5,5	0,20	1,10	5φ6
1	-0,042	7	5,0	0,16	0,80	5φ6
2	0,137	7	3,0	0,80	2,40	6φ8 или 10φ6
3	0,287	7	5,0	0,58	2,90	6φ8 или 10φ6
4	0	10	5,5			5φ6 верхняя 10φ6 нижняя

3) По примеру 3

Т а б л и ц а 22

Сече- ние	m_2 тм/м	δ см	h_0 см	μ	F_a см ²	Арматура
0	-0,269	7	5,0	0,55	2,75	6φ8 или 10φ6
1	-0,084	7	4,0	0,26	1,04	5φ6
2	0,202	7	5,0	0,40	2,00	10φ6
3	0,175	7	5,0	0,35	1,75	10φ6
4	-0,487	10	8,5	0,33	2,80	6φ8 или 10φ6

Некоторые численные величины

Т а б л и ц а 23

α_0	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	60°
α_0	0,349066	0,436332	0,523599	0,610865	0,698132	0,785398	0,872665	1,047198
$\sin \alpha_0$	0,342020	0,422618	0,500000	0,573576	0,642788	0,707107	0,766044	0,866025
$\cos \alpha_0$	0,939693	0,906308	0,866025	0,819152	0,766044	0,707107	0,642788	0,500000
$\sin \alpha_0 / \alpha_0$	0,979816	0,968570	0,954930	0,938957	0,920725	0,900316	0,877822	0,826993

57

$$\cos \frac{i\pi\alpha}{\alpha_0}$$

Т а б л и ц а 24

α / α_0	0	1/4	1/2	3/4	1,0
$\cos \frac{\pi\alpha}{\alpha_0}$	1,0000	0,7071	0	-0,7071	-1,0000
$\cos \frac{2\pi\alpha}{\alpha_0}$	1,0000	0	-1,0000	0	1,0000
$\cos \frac{3\pi\alpha}{\alpha_0}$	1,0000	-0,7071	0	0,7071	-1,0000

$$\int_0^{\alpha_0} m_i m_k ds = A \psi_{ik} \quad \text{Т а б л и ц а 25}$$

$\psi_{ik} \backslash \alpha_0$	20°	25°	30°	35°	
ψ_{11}	0,00705	0,03344	0,11927	0,34877	$R^5 : 10^4$
ψ_{12}	0,00692	0,03286	0,11700	0,34190	$-R^5 : 10^4$
ψ_{1I}	0,01028	0,04878	0,17351	0,50672	$R^5 : 10^4$
ψ_{1a}	0,8634	2,5938	6,3306	13,3712	$R^4 : 10^4$
ψ_{1b}	0,1758	0,6654	1,9681	4,9068	$-R^4 : 10^4$
ψ_{10}	0,12930	0,48845	1,44114	3,58276	$qR^5 : 10^4$
ψ_{A1}	0,03078	0,07502	0,15522	0,28682	$-R^3 : 100$
ψ_{22}	0,00694	0,03290	0,11712	0,34184	$R^5 : 10^4$
ψ_{2I}	0,01024	0,04864	0,17293	0,50459	$-R^5 : 10^4$
ψ_{2a}	0,8997	2,7001	6,5818	13,8812	$-R^4 : 10^4$
ψ_{2b}	0,1869	0,7072	2,0899	5,2056	$R^4 : 10^4$
ψ_{20}	0,13112	0,49480	1,45801	3,61922	$-qR^5 : 10^4$
ψ_{A2}	0,03326	0,08101	0,16752	0,30932	$R^3 : 100$
ψ_{II}	0,01512	0,07186	0,25570	0,74602	$R^5 : 10^4$
ψ_{Ia}	1,3274	3,9837	9,7092	20,4726	$R^4 : 10^4$
ψ_{Ib}	0,2757	1,0422	3,0809	7,6731	$-R^4 : 10^4$
ψ_{I0}	0,19365	0,73066	2,15277	5,34306	$qR^5 : 10^4$
ψ_{AI}	0,04927	0,12000	0,24810	0,45801	$-R^3 : 100$
ψ_{aa}	134,163	253,946	422,181	640,177	$R^3 : 10^4$
ψ_{ab}	29,717	70,921	143,005	256,242	$-R^3 : 10^4$
ψ_{a0}	17,7921	42,4122	85,4001	152,778	$qR^4 : 10^4$
ψ_{Aa}	5,90802	9,07098	12,7825	16,9530	$-R^2 : 100$
ψ_{bb}	6,751	20,335	49,794	105,599	$R^3 : 10^4$
ψ_{Ab}	1,40055	2,71669	4,6550	7,3185	$R^2 : 100$

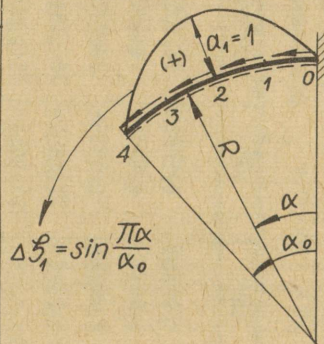
Т а б л и ц а 25
Продолжение

$\Psi_{ik} \backslash \alpha_0$	40°	45°	50°	60°	
Ψ_{11}	0,88200	1,99584	4,13635	14,5233	$R^5 : 10^4$
Ψ_{12}	0,86360	1,95158	4,03853	14,1302	$-R^5 : 10^4$
Ψ_{1I}	1,27976	2,89122	5,98166	20,9173	$R^5 : 10^4$
Ψ_{1a}	25,3788	44,3472	72,5291	166,144	$R^4 : 10^4$
Ψ_{1b}	10,7909	21,5531	39,8854	114,569	$-R^4 : 10^4$
Ψ_{10}	7,85271	15,6240	28,7865	81,8238	$qR^5 : 10^4$
Ψ_{A1}	0,48783	0,77877	1,18249	2,43063	$-R^3 : 100$
Ψ_{22}	0,86262	1,94716	4,02431	14,0395	$R^5 : 10^4$
Ψ_{2I}	1,27400	2,87265	5,93534	20,6917	$-R^5 : 10^4$
Ψ_{2a}	26,3008	45,8653	74,8383	170,475	$-R^4 : 10^4$
Ψ_{2b}	11,4361	22,8145	42,1631	120,734	$R^4 : 10^4$
Ψ_{20}	7,91867	15,7235	28,9035	81,7120	$-qR^5 : 10^4$
Ψ_{A2}	0,52566	0,83834	1,27156	2,60714	$R^3 : 100$
Ψ_{II}	1,88160	4,24507	8,76839	30,5489	$R^5 : 10^4$
Ψ_{Ia}	38,7804	67,6107	110,288	251,061	$R^4 : 10^4$
Ψ_{Ib}	16,8518	33,6091	62,0915	177,664	$-R^4 : 10^4$
Ψ_{I0}	11,6885	23,2050	42,6484	120,521	$qR^5 : 10^4$
Ψ_{AI}	0,77816	1,24072	1,88132	3,85476	$-R^3 : 100$
Ψ_{aa}	905,476	1211,85	1549,50	2264,65	$R^3 : 10^4$
Ψ_{ab}	420,455	644,077	933,203	1715,50	$-R^3 : 10^4$
Ψ_{a0}	250,240	382,599	553,244	1013,06	$qR^4 : 10^4$
Ψ_{Aa}	21,4795	26,2467	31,1287	40,6900	$-R^2 : 100$
Ψ_{bb}	201,405	353,981	582,905	1358,79	$R^3 : 10^4$
Ψ_{Ab}	10,7988	15,1746	20,5106	34,2427	$R^2 : 100$

$$m_1 = -\frac{R^2}{100} \psi_1$$

Т а б л и ц а 26

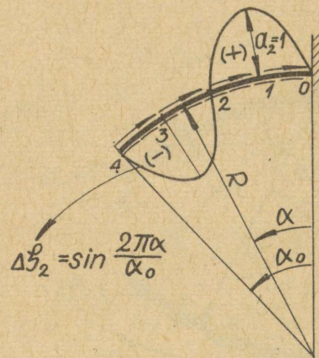
$\alpha_0 \backslash \alpha$	0	I	2	3	4
20°	0,4007	0,1462	0,0320	0,0021	0
25°	0,7805	0,2852	0,0625	0,0042	0
30°	1,3443	0,4920	0,1079	0,0072	0
35°	2,1266	0,7798	0,1713	0,0114	0
40°	3,1603	1,1612	0,2554	0,0170	0
45°	4,4771	1,6489	0,3632	0,0243	0
50°	6,1070	2,2553	0,4976	0,0332	0
60°	10,4166	3,8706	0,8574	0,0574	0



$$m_z = \frac{R^2}{100} \psi_2$$

Т а б л и ц а 27

$\alpha_0 \backslash a$	0	1	2	3	4
20°	0,3361	0,1727	0,0503	0,0040	0
25°	0,6538	0,3367	0,0981	0,0078	0
30°	1,1243	0,5805	0,1694	0,0135	0
35°	1,7750	0,9194	0,2687	0,0214	0
40°	2,6320	1,3683	0,4007	0,0320	0
45°	3,7192	1,9416	0,5698	0,0456	0
50°	5,0589	2,6534	0,7805	0,0625	0
60°	8,5714	4,5448	1,3443	0,1079	0

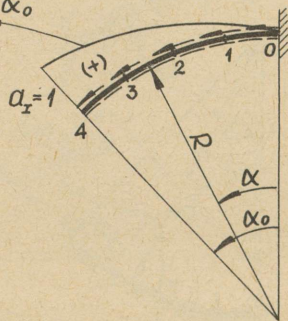


$$m_I = -\frac{R^2}{100} \psi_I$$

Т а б л и ц а 28

$\alpha_0 \backslash \alpha$	0	1	2	3	4
20°	0,5277	0,2421	0,0774	0,0103	0
25°	1,0274	0,4719	0,1510	0,0203	0
30°	1,7673	0,8133	0,2608	0,0351	0
35°	2,7908	1,2874	0,4134	0,0555	0
40°	4,1395	1,9155	0,6163	0,0829	0
45°	5,8515	2,7164	0,8760	0,1181	0
50°	7,9623	3,7100	1,1994	0,1618	0
60°	13,5039	6,3459	2,0636	0,2794	0

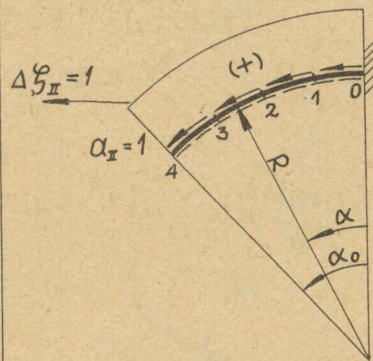
$$\Delta \psi_1 = \frac{\alpha}{\alpha_0}$$



$$m_{II} = -\frac{R^2}{100} \psi_{II}$$

Таблица 29

α_0	α	0	I	2	3	4
20°		0,7046	0,2980	0,0885	0,0110	0
25°		1,3714	0,5810	0,1726	0,0216	0
30°		2,3599	1,0016	0,2980	0,0374	0
35°		3,7289	1,5860	0,4727	0,0593	0
40°		5,5344	2,3599	0,7046	0,0885	0
45°		7,8291	3,3479	1,0016	0,1260	0
50°		10,6621	4,5737	1,3714	0,1726	0
60°		18,1173	7,8291	2,3599	0,2980	0



$$m_{\alpha} = -\frac{R}{100} \psi_{\alpha}$$

Таблица 30

$\alpha_0 \backslash \alpha$	0	I	2	3	4
20 ⁰	34,2020	25,4864	16,8372	8,3201	0
25 ⁰	42,2618	31,3751	20,6178	10,1179	0
30 ⁰	50,0000	36,9474	24,1181	11,7317	0
35 ⁰	57,3576	42,1453	27,2870	13,1287	0
40 ⁰	64,2788	46,9140	30,0768	14,2788	0
45 ⁰	70,7107	51,2017	32,4424	15,1537	0
50 ⁰	76,6044	54,9604	34,3426	15,7283	0
60 ⁰	86,6025	60,7206	36,6025	15,8918	0

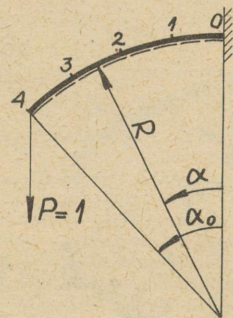
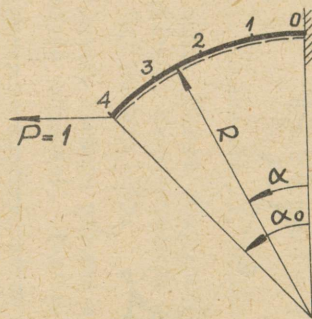


Таблица 31

$$m_b = \frac{R}{100} \psi_b$$

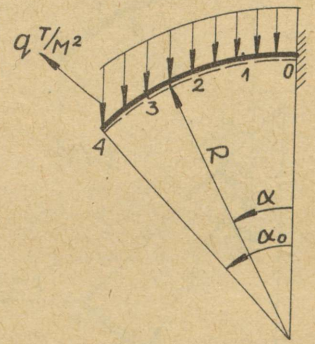
$\alpha_0 \backslash \alpha$	0	1	2	3	4
20°	6,0307	5,6502	4,5115	2,6233	0
25°	9,3692	8,7748	6,9988	4,0622	0
30°	13,3975	12,5420	9,9901	5,7855	0
35°	18,0848	16,9210	13,4565	7,7721	0
40°	23,3956	21,8764	17,3649	9,9981	0
45°	29,2893	27,3678	21,6773	12,4363	0
50°	35,7212	33,3508	26,3520	15,0565	0
60°	50,0000	46,5926	36,6025	20,7107	0



$$m_0 = - \frac{q R^2}{100} \psi_0$$

Т а б л и ц а 32

$\alpha_0 \backslash \alpha$	0	I	2	3	4
20°	6,0307	3,3685	1,4808	0,3647	0
25°	9,3692	5,2121	2,2768	0,5558	0
30°	13,3975	7,4163	3,2142	0,7762	0
35°	18,0848	9,9515	4,2719	1,0176	0
40°	23,3956	12,7842	5,4261	1,2715	0
45°	29,2893	15,8760	6,6494	1,5277	0
50°	35,7212	19,1848	7,9118	1,7754	0
60°	50,0000	26,2650	10,4225	2,1987	0



Л и т е р а т у р а

1. H.Laul. Raudbetoon II, Tallinn 1962.

2. X.X. Лауль. Расчет цилиндрических оболочек с криволинейными частями, очерченными по окружности. Труды ТПИ. Серия А, № 50, Таллин, 1953.

3. X.X. Лауль. Примеры расчета железобетонных оболочек I (Методические указания). Таллин, 1964.

4. Инструкция по проектированию железобетонных тонкостенных пространственных покрытий и перекрытий. АСИА СССР, Москва, 1961.

5. СНиП П - А. II-62. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования, Москва 1962.

6. СНиП П-В. I-62. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования, Москва 1962.

7. Ю.А. Тярно. О проектировании оболочек Нарвской мебельной фабрики. Труды ТПИ. Серия А, № 229, Таллин 1965.

С о д е р ж а н и е

Г.	Введение	3
П.	Применяемые обозначения.	3
Ш.	Выбор основных размеров.	4
IV.	Образования покрытия	6
У.	Дополнительные детали проекта.	6
VI.	Нагрузки	7
VII.	Определение внутренних сил в оболочке	7
	Пример 1. Крайняя волна (отдельно стоящая оболочка)	9
	1) Нагрузки.	9
	2) Расчетная схема, метод и ход расчета для определения $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_x$ и α	10
	3) Определение внутренних сил.	20
	4) Проверка результатов расчета.	23
	Пример 2. Крайняя волна (отдельно стоящая оболочка с опертым краем)	26
	1) Нагрузки.	26
	2) Расчетная схема, метод и ход расчета для определения $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_x$ и реакции стены r	26
	3) Определение внутренних сил.	31
	4) Проверка результатов расчета.	35
	Пример 3. Средняя волна.	35
	1) Нагрузки.	35
	2) Расчетная схема, метод и ход расчета	36
VIII.	Расчет торцевых диафрагм	40
	1. Пример 1 (продолжение).	45
	2. Пример 3 (продолжение).	48
IX.	Руководство для армирования.	49
	1. Армирование бортового элемента	49
	2. Арматура главных растягивающих напряжений	50
	3. Арматура изгибающих моментов.	52
X.	Армирование (примеры).	52
	1. Продольная растянутая арматура	52
	2. Арматура главных растягивающих напряжений	54
	3. Арматура изгибающих моментов.	56
	П р и л о ж е н и е	57

Бесплатно

XI ARH
1A-19713
250139

TÜ RAAMATUKOGU

1 0300 00485841 3