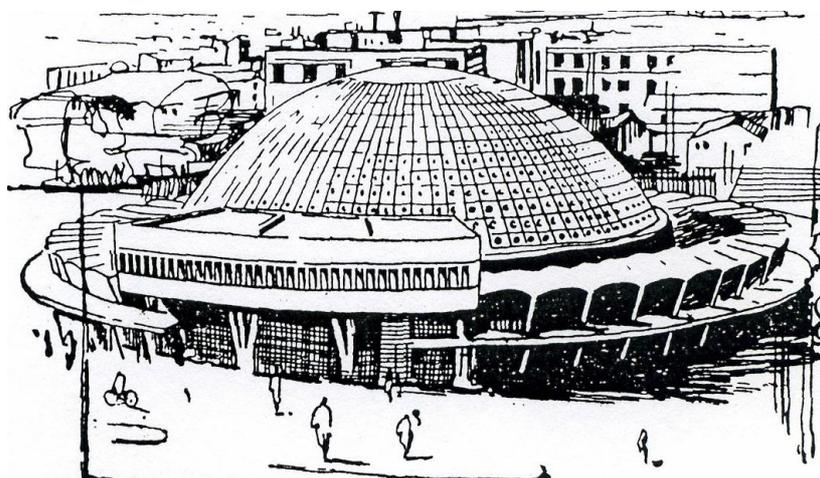


ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КУПОЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ

**Методические указания
для дипломного проектирования**



Омск – 2009

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная
академия (СибАДИ)»

Кафедра строительных конструкций

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КУПОЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Методические указания
для дипломного проектирования

Составитель А.Г. Кельнер

Омск
СибАДИ
2009

УДК 624.082
ББК 38.53

Рецензент канд. техн. наук, доц. Г.Г. Воробьёв

Работа одобрена научно-методическим советом факультета ПГС в качестве методических указаний для студентов специальностей «Промышленное и гражданское строительство» (270102), «Проектирование зданий» (270114) при выполнении дипломного проекта.

Железобетонные купольные покрытия: методические указания для дипломного проектирования/Сост. А.Г. Кельнер. – Омск:СибАДИ, 2009. – 33с.

Приведены рекомендации по проектированию железобетонных куполов. Рассмотрены вопросы назначения основных геометрических размеров, приведены рекомендации по расчёту конструирования купола.

Табл.6. Ил.11. Библиогр.: 3 назв.

Оглавление

Введение.....	4
1. Общие сведения.....	4
2. Методика проектирования купола.....	5
2.1. Рекомендации по выбору материалов и основных размеров.....	5
2.2. Геометрические характеристики купола.....	6
3. Нагрузки действующие на купол.....	10
4. Определение усилий в оболочке купола.....	10
5. Устойчивость куполов-оболочек.....	12
6. Определение усилий в месте сопряжения купола с опорным кольцом.....	14
7. Анализ распределения усилий в куполе при действии нагрузок.....	20
8. Принципы конструирования куполов.....	23
8.1. Монолитный купол.....	23
8.2. Сборный купол.....	24
Библиографический список.....	24

Введение

В последние годы железобетонные купольные покрытия получают всё большее распространения. Студенты, обучающиеся по специальностям «Промышленное и гражданское строительство» (270102), «Проектирование зданий» (270114), часто используют купольные покрытия при выполнении дипломного проекта.

Цель данных методических указаний – углубить знания студентов по теме «Железобетонные купола» и оказать им помощь при выполнении дипломного проекта.

Методические указания предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Купольные покрытия используются в основном для зданий и сооружений круглых или овальных в плане (спортивно-зрелищных и выставочных залов, цирков, планетариев и др.). Особенно увеличилось использование куполов в последние годы в связи со значительным увеличением строительства храмов и других культовых сооружений.

Основой купольного покрытия является купол. Купол представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из оболочки с вертикальной осью вращения и опорного кольца. При наличии центрального проёма в вершине купола устраивают фонарное кольцо (рис. 1).

В зависимости от очертания образующий купол может быть сферическим, коническим, эллиптическим и др.

Форма очертания поверхности оболочки купола определяется архитектурными, конструктивно-планировочными и другими требованиями, обеспечивающими экономичность конструктивного решения и простоту изготовления.

Оболочка купола может проектироваться монолитной или сборной. Монолитные купола делаются гладкими, а сборные – из ребристых панелей.

В методических указаниях рассматриваются тонкостенные пологие оболочки. Для куполов данного типа должны выполняться следующие требования:

$$\left. \begin{aligned} t &\leq \frac{1}{20} R_{\min}; \\ f &\leq \frac{1}{5} D, \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где t – толщина оболочки; f – стрела подъёма; R_{\min} – минимальный радиус кривизны; D – диаметр купола.

2.МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КУПОЛА

2.1.Рекомендации по выбору материалов и основных размеров

Оболочка купола выполняется с использованием бетона классов В15 – В20. Опорное кольцо делается, как правило, предварительно-напряжённым, поэтому для него рекомендуется использовать бетон классов В25 – В40.

В качестве напрягаемой арматуры рекомендуется применять преимущественно канаты классов К1400 (К-7) и К1500 (К-19) или высокопрочную проволоку Вр1200 (Вр-II). Допускается применять стержневую арматуру классов А600 (А-IV), А800 (А-V).

В качестве ненапрягаемой арматуры чаще всего используют стержневую класса А-400 (А-III) и арматурную проволоку А-500 (Вр-I).

Основными габаритными размерами купола являются: диаметр D , стрела подъёма f , размеры поперечного сечения опорного кольца h_k , b_k , толщина оболочки t (рис. 2).

Диаметр купола определяется заданием на проектирование.

Стрела подъёма назначается из условия

$$f = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{8} \right) D. \quad (2.1)$$

Размеры поперечного сечения опорного кольца рекомендуется назначать по данным осуществлённых проектов.

Допускается размеры сечения опорного кольца назначать, руководствуясь следующими рекомендациями.

Ширина сечения b_k назначается из условия опирания опорного кольца на поддерживающие его конструкции.

Высоту h_k рекомендуется принимать из условия размещения рабочей арматуры.

Как правило, соотношение размеров поперечного сечения опорного кольца принимается в пределах

$$h_k/b_k = 1,0 \div 2,0. \quad (2.2)$$

Толщина оболочки назначается по конструктивным соображениям.

Для монолитных куполов толщину оболочки рекомендуется принимать равной $1/600$ радиуса кривизны купола, но не менее 50 мм. В сборных куполах минимальная толщина плиты принимается равной 30 мм.

2.2. Геометрические характеристики купола

В качестве примера в методических указаниях рассматривается проектирование купола сферического очертания.

В сферическом куполе радиусы кривизны меридионального и кольцевого сечений равны между собой и постоянны:

$$r_1 = r_2 = r_c = \text{const} . \quad (2.3)$$

При круговом очертании купола основными геометрическими характеристиками являются: радиус окружности (сферы), координаты центра и уравнение окружности (рис.3), также дополнительно определяются половина центрального угла, длина дуги, координаты сечений купола и значения тригонометрических функций.

При сферической оболочке радиус кривизны определяется по следующему равенству:

$$r_c = \frac{D^2 + 4f^2}{8f}, \quad (2.4)$$

где D – диаметр купола; f – стрела подъёма.

Координаты центра окружности зависят от выбранного расположения осей координат. В случае, если ось ординат

совпадает с осью вращения, координаты центра будут определяться по следующим равенствам (рис. 3):

$$\left. \begin{array}{l} x_c = 0 ; \\ y_c = - (r_c - f) . \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

Уравнение окружности будут иметь следующий вид:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r_c^2 , \quad (2.6)$$

где x и y – координаты сечений купола.

Половина центрального угла определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{D}{2(r_c - f)} \rightarrow \varphi_0 \text{ рад.} \quad (2.7)$$

Длина дуги, соответствующая половине центрального угла:

$$S = \pi r_c \frac{\varphi_0}{180^\circ} . \quad (2.8)$$

Пример. Определение геометрических характеристик купола (рис.4).

Диаметр купола $D = 42\text{м}$. Стрела подъёма $f = 9\text{м}$.

Радиус окружности (сферы):

$$r_c = \frac{D^2 + 4f^2}{8f} = \frac{42^2 + 4 \cdot 9^2}{8 \cdot 9} = 29\text{м} .$$

Координаты центра окружности:

$$\left. \begin{array}{l} x_c = 0 ; \\ y_c = - (r_c - f) = - (29 - 9) = -20\text{м} . \end{array} \right\}$$

Уравнение окружности:

$$\begin{aligned}(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 &= r_c^2; \\ x^2 + [y - (-20)]^2 &= 29^2; \\ x^2 + y^2 + 40y - 441 &= 0,\end{aligned}$$

где x и y – координаты сечений купола по горизонтали и вертикали.

Для расчёта купола намечаем четыре сечения (см. рис.4). Для выбранных сечений определяем координаты.

Сечение “0,,:

$$x_0 = 0; \quad y_0 = 9\text{м}.$$

Сечение “1,,:

$$\begin{aligned}x_1 &= 6\text{м}; \\ 6^2 + y^2 + 40y - 441 &= 0; \\ y^2 + 40y - 405 &= 0; \\ y' &= -20 \pm 28,373; \\ y_1 &= 20 + 28,373 = 8,373\text{м}.\end{aligned}$$

По аналогии вычисляются координаты сечений “2,, и “3,,.

Сечение “2,,:

$$x_2 = 15\text{м}; \quad y_2 = 4,819\text{м}.$$

Сечение “3,,:

$$x_3 = 21\text{м}; \quad y_3 = 0.$$

Определяем величину половины центрального угла:

$$\begin{aligned}\text{tg}\varphi_0 &= \frac{D}{2(r_c - f)} = \frac{42}{2(29 - 9)} = 1,05\text{рад}; \\ \varphi_0 &= 46^{\circ}24' .\end{aligned}$$

Длина дуги, соответствующая центральному углу:

$$S = \pi r_c \frac{\varphi_0}{180^0} = 3,14 \cdot 29 \cdot \frac{46,4}{180} = 23,47 \text{ м.}$$

Определяем центральные углы для выбранных сечений купола. При круговом очертании купола центральный угол рассматриваемого сечения численно равен углу наклона касательной к горизонтальной оси (см. рис. 3).

При выбранной системе координат величина угла вычисляется по формуле

$$\sin \varphi_i = \frac{x_i}{r_c} \rightarrow \varphi_i.$$

В этом случае величины углов для выбранных сечений будут равны:

Сечение “0,,:

$$x_0 = 0; \sin \varphi_0 = 0 \rightarrow \varphi_0 = 0.$$

Сечение “1,,:

$$x_1 = 6 \text{ м}; \sin \varphi_1 = \frac{6}{29} = 0,2069 \rightarrow \varphi_1 = 11^0 56'.$$

Сечение “2,,:

$$x_2 = 15 \text{ м}; \sin \varphi_2 = \frac{15}{29} = 0,5172 \rightarrow \varphi_2 = 31^0 9'.$$

Сечение “3,,:

$$x_3 = 21 \text{ м}; \sin \varphi_3 = \frac{21}{29} = 0,7242 \rightarrow \varphi_3 = 46^0 24'.$$

Результаты расчётов сводим в табл. 1.

Координаты сечений купола и значения тригонометрических функций

Номера точек	x , м	y , м	φ , рад	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$
0	0	9,000	0	0,0000	1,0000	0,0000
1	6	8,373	$11^{\circ}56'$	0,2069	0,9784	0,2115
2	15	4,819	$31^{\circ}9'$	0,5172	0,8558	0,6044
3	21	0	$46^{\circ}24'$	0,7242	0,6896	1,0501

3. НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА КУПОЛ

Основными нагрузками, определяющими напряжённое состояние купола, являются собственный вес оболочки купола и снеговая нагрузка. Обе нагрузки принимают действующими симметрично относительно вертикальной оси оболочки (нагрузка осесимметричная). Ветровая нагрузка при пологих купольных покрытиях решающего значения не имеет и поэтому при расчетах она не учитывается.

Собственный вес оболочки купола при постоянной её толщине рассматривается как равномерная нагрузка, распределённая по поверхности купола, а снеговая нагрузка принимается как равномерно распределённая по горизонтальной проекции купола (рис. 5).

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ОБОЛОЧКЕ КУПОЛА

Тонкостенные купола, подобно другим пространственным покрытиям, можно рассчитывать по безмоментной теории. Именно безмоментная теория в данной работе принята как основная при определении усилий в куполе.

Для определения усилий, действующих в куполе, рассмотрим элементарно малый элемент оболочки, ограниченный двумя меридиональными и двумя кольцевыми сечениями (рис. 6). При действии внешней нагрузки в рассматриваемом элементе возникнут меридиональные, кольцевые и сдвигающие усилия. При внешней осесимметричной нагрузке сдвигающие усилия равны нулю. В этом случае меридиональные и кольцевые усилия могут быть определены из условий статики.

Подробный вывод зависимостей для определения меридиональных, кольцевых усилий, а также усилия в опорном кольце приведён в работе [1].

В качестве примера приводятся формулы для определения усилий в сферической замкнутой оболочке купола при загрузениях:

а)нагрузкой от собственного веса;

б)равномерно распределённой нагрузкой на горизонтальной проекции (снеговая нагрузка).

Таблица 2

Формулы для определения усилий в оболочке по безмоментной теории

Схема загрузки-ния	N_1	N_2	N_κ	Q_φ	Примеча-ние
Нагрузка от собствен-ного веса g , Па, толщина оболочки постоян-ная	$-\frac{r_c g}{1 + \cos \varphi}$	$-r_c g \cos \varphi - N_1$	$r_c g \cdot \frac{1 - \cos \varphi_0}{\operatorname{tg} \varphi_0}$	$2r_c^2 \cdot (1 - \cos \varphi)$	При $\varphi = 51^\circ 49'$ $N_2 = 0$
Равномер-но распреде-лённая нагрузка на горизонталь-ной проекции p , Па	$-\frac{1}{2} p r_c$	$-\frac{1}{2} p r_c \cdot \cos 2\varphi$	$\frac{p r_c^2}{4} \sin 2\varphi_0$	$p r_c^2 \sin^2 \varphi$	При $\varphi = 45^\circ$; $N_2 = 0$

В табл. 2 приняты обозначения:

N_1 – меридиональное усилие, приходящееся на единицу длины кольцевого сечения;

N_2 – кольцевое усилие, приходящееся на единицу длины меридионального сечения;

N_κ – усилие в опорном кольце;

Q_φ – внешняя нагрузка на сегмент, ограниченный углом φ ;

φ – переменный угол в меридиональном сечении оболочки, отсчитываемый от оси вращения;

φ_0 – половина центрального угла дуги оболочки в меридиональном сечении.

Пример. Определение усилий в оболочке купола.

Диаметр купола $D = 42$ м. Стрела подъёма $f = 9$ м. Радиус сферы $r_c = 29$ м.

Расчётная нагрузка: 1) постоянная: $g = 4000$ Па = 4000 Н/м²;
2) снеговая: $p = 1000$ Па = 1000 Н/м².

Усилия определяются для четырёх сечений купола, координаты которых приведены в табл. 1 (см. рис. 4). Расчеты по определению усилий в куполе выполнены в табличной форме. Их результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Усилия в оболочке купола от нагрузок по поверхности и по горизонтальной проекции, кН/м²

Номера точек	Медиальные			Кольцевые		
	Нагрузка по поверхности $q = 4$ кН/м ²	Нагрузка по проекции $p = 1$ кН/м ²	Суммарное усилие	Нагрузка по поверхности $q = 4$ кН/м ²	Нагрузка по проекции $q = 1$ кН/м ²	Суммарное усилие
0	-58,00	-14,5	-72,50	-174,00	-29,00	-203,00
1	-58,63	-14,5	-73,13	-172,12	-26,52	-198,64
2	-62,51	-14,5	-77,01	-161,78	-13,48	-175,26
3	-68,65	-14,5	-83,15	-148,65	1,42	-147,23

5. УСТОЙЧИВОСТЬ КУПОЛОВ - ОБОЛОЧЕК

Расчёт куполов-оболочек на устойчивость заключается в том, что определяются сжимающие напряжения в оболочке от всех видов загрузки, которые затем сопоставляются с их критическими напряжениями. Для железобетонных оболочек дополнительно учитывается рост деформации купола во времени в виду ползучести бетона.

Ползучесть бетона рекомендуется учитывать, заменяя в формулах, полученных теоретическим путём, модуль упругости

бетона E_b модулем деформации $E_{b,деф}$. Для тяжёлого бетона величину модуля деформации рекомендуется определять по формуле

$$E_{b, деф} = \frac{E_b}{4}. \quad (5.1)$$

Для гладких сферических оболочек интенсивность полной расчетной нагрузки не должна превышать величины

$$q \leq 0,2 E_{b,деф} \left(\frac{t}{r_c} \right)^2 = \frac{E_b}{20} \left(\frac{t}{r_c} \right)^2, \quad (5.2)$$

где t – толщина оболочки.

Данная формула справедлива для оболочки постоянной толщины.

Рёбристая оболочка при проверке её на устойчивость может быть заменена для расчёта фиктивной гладкой, имеющей ту же жёсткость сечения на сжатие и тот же радиус инерции. Фиктивная толщина оболочки в этом случае определяется по формуле

$$t_{фик} = \sqrt{\frac{12I}{A}}, \quad (5.3)$$

а фиктивный модуль упругости – по равенству

$$E_{b,фик} = E_b \cdot \frac{A}{b \cdot t_{фик}}, \quad (5.4)$$

где b – расстояние между осями соседних рёбер; A – площадь сечения, образованная одним ребром с примыкающими частями тела оболочки шириной b ; I – момент инерции того же сечения.

Пример. Проверка устойчивости оболочки купола.

Расчетная нагрузка постоянная: 1) $g = 4000 \text{ Н/м}^2$; 2) снеговая: $p = 1000 \text{ Н/м}^2$. Радиус сферы $r_c = 29 \text{ м}$. Толщина оболочки $t = 0,06 \text{ м}$.

Модуль упругости бетона $E_b = 27 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ (В20).

Проверка устойчивости выполняется для гладкой сферической оболочки согласно формуле (5.2):

$$q \leq 0,2 E_{b,деф} \left(\frac{t}{r_c} \right)^2,$$

тогда

$$4000 + 1000 \leq \frac{27 \cdot 10^3 \cdot 10^6}{20} \left(\frac{0,06}{29} \right)^2;$$

$$5000 \text{ Н/м}^2 \leq 5400 \text{ Н/м}^2.$$

Следовательно, устойчивость оболочки купола обеспечена.

6.ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В МЕСТЕ СОПРЯЖЕНИЯ КУПОЛА С ОПОРНЫМ КОЛЬЦОМ

В реальных конструкциях оболочка купола опёрта не свободно, а имеет упругое закрепление в опорном кольце. В связи с этим на опорном контуре возникают дополнительные изгибающие моменты и горизонтальный распор (рис.7). Их определяют методами строительной механики из условия равенства нулю взаимного угла поворота и взаимного смещения сечений в примыкании оболочки к опорному кольцу от суммарного взаимодействия всех сил.

Ниже рассматривается решение данной задачи методом сил для сферической оболочки. Необходимая система канонических уравнений в этом случае будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}M_0 + a_{12}H_0 + a_{10} &= 0; \\ a_{21}M_0 + a_{22}H_0 + a_{20} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

где M_0 и H_0 – соответственно момент и кольцевое усилие в месте контакта оболочки и опорного кольца; a_{11} – взаимный угол поворота оболочки и кольца от момента $\bar{M} = 1$ по направлению этого момента; a_{12} – то же от усилий $\bar{H} = 1$ по направлению момента; a_{10} – взаимный угол поворота, вызванный внешней нагрузкой; a_{21} – взаимное перемещение от момента $\bar{M} = 1$ по направлению силы H ; a_{22} – то же от усилий $\bar{H} = 1$ по направлению силы H ; a_{20} – взаимное перемещение, вызванное внешней нагрузкой.

Величины перемещений для сферической оболочки постоянного сечения определяются по следующим равенствам:

$$a_{11} = S; \quad (6.2)$$

$$a_{12} = a_{21} = \frac{S^2}{2} \sin \varphi_0; \quad (6.3)$$

$$a_{22} = \frac{S^3}{2} \sin^2 \varphi_0, \quad (6.4)$$

где S – линейная характеристика жёсткости.

Для гладких куполов значение линейной характеристики жёсткости определяется по формуле

$$S = 0,76 \sqrt{t \cdot r_c}. \quad (6.5)$$

где t – толщина оболочки.

Перемещения края сферической оболочки при действии внешней нагрузки определяются по следующим формулам:

а) постоянная нагрузка – собственный вес g :

$$a_{10} = \frac{gS^4}{2r_c} \sin \varphi_0; \quad (6.6)$$

$$a_{20} = \frac{gS^4}{4} \left(\cos \varphi_0 - \frac{1}{1 + \cos \varphi_0} \right) \cdot \sin \varphi_0; \quad (6.7)$$

б) вертикальная, распределённая на горизонтальную проекцию, нагрузка – снеговая нагрузка p :

$$a_{10} = \frac{3}{8} \cdot p \frac{gS^4}{r_c} \sin 2\varphi_0; \quad (6.8)$$

$$a_{20} = \frac{pS^4}{8} \sin \varphi_0 \cdot \cos 2\varphi_0. \quad (6.9)$$

Пример. Определение момента и кольцевого усилия в месте контакта оболочки и опорного кольца.

Радиус сферы $r_c = 29$ м. Толщина оболочки $t = 6$ см.

Центральный угол в месте контакта (сечение “3,,) и его тригонометрические функции: $\varphi_0 = 46^{\circ}24'$; $\sin 46^{\circ}24' = 0,7242$; $\cos 46^{\circ}24' = 0,6896$.

Расчётные нагрузки:

1) от собственного веса $g = 4000 \text{ Па} = 4000 \text{ Н/м}^2$;

2) от снега $p = 1000 \text{ Па} = 1000 \text{ Н/м}^2$.

Линейная характеристика жёсткости купола согласно формуле (6.5) равна

$$S = 0,76 \sqrt{0,06 \cdot 29} = 1,0025 \text{ м.}$$

Единичные перемещения определяются по формулам (6.2) – (6.4):

$$a_{11} = 1,0025;$$

$$a_{12} = a_{21} = \frac{1,0025^2}{2} \cdot 0,7242 = 0,3639;$$

$$a_{22} = \frac{1,0025^3}{2} \cdot 0,7242^2 = 0,2542.$$

Значения величин свободных членов от внешней нагрузки определяются по формулам (6.6) – (6.9):

1) от собственного веса ($g = 4000 \text{ Н/м}^2$):

$$a_{10} = \frac{4000 \cdot 1,0025^4}{2 \cdot 29} \cdot 0,72 \cdot 42 = 50,4436;$$

$$a_{20} = \frac{4000 \cdot 1,0025^4}{4} \cdot \left(0,6896 - \frac{1}{1 + 0,6896} \right) \cdot 0,7242 = 71,5476;$$

2) от снеговой нагрузки ($p = 1000 \text{ Н/м}^2$):

$$a_{10} = \frac{1000 \cdot 1,0025^4}{8 \cdot 29} \cdot 0,9988 = 13,0458;$$

$$a_{20} = \frac{1000 \cdot 1,0025^4}{8} \cdot 0,7242 \cdot (-0,049) = -4,4573.$$

Суммарные перемещения от собственного веса и снеговой нагрузки:

$$a_{10} = 50,4436 + 13,0458 = 63,4894;$$

$$a_{20} = 71,5476 - 4,4573 = 67,0903 .$$

Система уравнений:

$$\begin{aligned} 1,0025M_0 + 0,3639H_0 + 63,4894 &= 0; \\ 0,3639M_0 + 0,2642H_0 + 67,0903 &= 0. \end{aligned}$$

Решаем систему уравнений и получаем требуемые усилия:

$$\begin{aligned} M_0 &= 57,6916 \text{ Нм}; \\ H_0 &= -333,4026 \text{ Н}. \end{aligned}$$

После определения значений моментов и кольцевых усилий у края оболочки можно найти их величины по длине меридиана в любой точке по формулам

$$M_\lambda = M_0\eta_1 + (M_0 + SH_0\sin\varphi_0)\eta_2; \quad (6.10)$$

$$N_{2\lambda} = N_2 + \frac{2r}{S^2} [M_0\eta_2 - (M_0 + SH_0\sin\varphi_0)\eta_1], \quad (6.11)$$

где M_λ и $N_{2\lambda}$ – соответственно момент и кольцевое усилие в произвольной точке оболочки; N_2 – кольцевое усилие в оболочке при безмоментном напряжённом состоянии, определяется по формулам табл. 4; r – радиус кривизны рассматриваемой точки поверхности оболочки, для сферической оболочки $r = r_c$; $\lambda = \frac{\ell_{\text{дуг}}}{S}$ – безразмерная координата; φ – текущая угловая координата, отсчёт ведётся по меридиану, начиная от опорного кольца; $\ell_{\text{дуг}}$ – длина дуги меридиана, отсчитываемая от места примыкания оболочки купола к нижнему опорному кольцу.

Значение функций η_1 и η_2 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Численные значения функций

$$\eta_1 = e^{-\lambda} \cos\lambda ; \eta_2 = e^{-\lambda} \sin\lambda$$

λ	η_1	η_2	λ	η_1	η_2
0	1	0	1,6	-0,0059	0,2018
0,1	0,9004	0,0903	1,7	-0,0236	0,1812
0,2	0,8024	0,1627	1,8	-0,0376	0,1610
0,3	0,7078	0,2189	1,9	-0,0484	0,1415
0,4	0,6174	0,2610	2	-0,0564	0,1231
0,5	0,5323	0,2908	2,1	-0,0618	0,1057
0,6	0,4530	0,3099	2,2	-0,0652	0,0896
0,7	0,3798	0,3199	2,3	-0,0668	0,0748
0,8	0,3130	0,3223	2,4	-0,0669	0,0613
0,9	0,2528	0,3185	2,5	-0,0658	0,0491
1	0,1988	0,3096	2,6	-0,0636	0,0383
1,1	0,1510	0,2967	2,7	-0,0608	0,0287
1,2	0,1092	0,2807	2,8	-0,0573	0,0204
1,3	0,0729	0,2626	2,9	-0,0535	0,0133
1,4	0,0419	0,2430	3	-0,0493	0,0070
1,5	0,0158	0,2226	–	–	–

Пример. Определение усилий в куполе от влияния краевого эффекта.

Усилия в месте контакта оболочки и опорного кольца: $M_0 = 57,6916 \text{ Нм}$; $H_0 = -333,4026 \text{ Н}$; $N_2 = -147230 \text{ Н}$.

Радиус сферы $r_c = 29 \text{ м}$. Линейная характеристика жёсткости купола $S = 1,0025 \text{ м}$.

Центральный угол в месте контакта и его тригонометрическая функция:

$$\varphi_0 = 46^{\circ}24'; \sin \varphi_0 = 0,7242.$$

Значение моментов и кольцевых усилий по длине меридиана определяют по формулам (6.10), (6.11). При этом переменной величиной является λ , значение которой принимают по табл. 4 от нуля (0) до (3).

Расчеты по определению усилий в куполе по длине меридиана рекомендуется выполнять в табличной форме. Результаты расчетов для данного примера приведены в табл. 5,6. По вычисленным значениям усилий строятся эпюры моментов и кольцевых сил (рис. 8).

Длина дуги, на протяжении которой рассматривается влияние краевого эффекта на усилия в куполе, может быть определена по следующему равенству:

$$\ell_{\text{дуг}} = \lambda \cdot S = 3 \cdot 1,0025 = 3,0075 \text{ м.}$$

С достаточной точностью можно считать, что длина дуги практически равняется её проекции:

$$3,0075 \text{ м} \approx 3 \text{ м.}$$

Данный вывод позволяет эпюры усилий строить с использованием прямоугольной системы координат. За ось абсцисс принимается касательная, проходящая через точку в месте контакта оболочки и опорного кольца (см. рис. 8).

Таблица 5

**Значения изгибающих моментов по длине меридиана оболочки
(влияние краевого эффекта)**

Исходные данные	λ	η_1	η_2	$M_0 \eta_1$	$SH_0 \cdot \sin \varphi_0$	$(M_0 + SH_0 \sin \varphi_0) \eta_2$	M_λ (5)+(7)
1	2	3	4	5	6	7	8
$M_0 = 57.69 \text{ Н} \cdot \text{м}$	0	1	0	57.69	-242.05	0	57.69
$H_0 = -333.40 \text{ Н}$	0.1	0.9004	0.0903	51.95	-242.05	-16.65	35.30
$S = 1.0025$	0.2	0.8024	0.1627	46.29	-242.05	-30.00	16.30
$\varphi_0 = 46^\circ 24'$	0.3	0.7078	0.2189	40.83	-242.05	-40.36	0.48
$\sin \varphi_0 = 0.7242$	0.4	0.6174	0.261	35.62	-242.05	-48.12	-12.5
	0.5	0.5323	0.2908	30.71	-242.05	-53.61	-22.90
	0.6	0.453	0.3099	26.13	-242.05	-57.13	-31

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8
	0.7	0.3798	0.3199	21.91	-242.05	-58.98	-37.07
	0.8	0.313	0.3223	18.06	-242.05	-59.42	-41.36
	0.9	0.2528	0.3185	14.58	-242.05	-58.72	-44.13
	1	0.1988	0.3096	11.47	-242.05	-57.08	-45.61

	1.1	0.151	0.2967	8.71	-242.05	-54.70	-45.99
	1.2	0.1092	0.2807	6.30	-242.05	-51.75	-45.45
	1.3	0.0729	0.2626	4.21	-242.05	-48.41	-44.21
	1.4	0.0419	0.243	2.42	-242.05	-44.80	-42.38
	1.5	0.0158	0.2226	0.91	-242.05	-41.04	-40.13
	1.6	-0.0059	0.2018	-0.34	-242.05	-37.20	-37.54
	1.7	-0.0236	0.1812	-1.36	-242.05	-33.41	-34.77
	1.8	-0.0376	0.161	-2.17	-242.05	-29.68	-31.85
	1.9	-0.0484	0.1415	-2.79	-242.05	-26.09	-28.88
	2	-0.0564	0.1231	-3.25	-242.05	-22.69	-25.95
	2.1	-0.0618	0.1057	-3.57	-242.05	-19.49	-23.05
	2.2	-0.0652	0.0896	-3.76	-242.05	-16.52	-20.28
	2.3	-0.0668	0.0748	-3.85	-242.05	-13.79	-17.64
	2.4	-0.0669	0.0613	-3.86	-242.05	-11.30	-15.16
	2.5	-0.0658	0.0491	-3.80	-242.05	-9.05	-12.85
	2.6	-0.0636	0.0383	-3.67	-242.05	-7.06	-10.73
	2.7	-0.0608	0.0287	-3.51	-242.05	-5.29	-8.80
	2.8	-0.0573	0.0204	-3.31	-242.05	-3.76	-7.07
	2.9	-0.0535	0.0133	-3.09	-242.05	-2.45	-5.54
	3	-0.0493	0.007	-2.84	-242.05	-1.29	-4.13

7. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В КУПОЛЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗОК

В данных методических указаниях рассматривается распределение усилий в куполе с оболочкой сферического очертания при загрузениях постоянной и снеговой нагрузками.

Меридиональные усилия от постоянной и снеговой нагрузок сжимающие по всей высоте оболочки, но при этом величина их увеличивается от вершины к опорам (рис. 9).

Кольцевые усилия от этих же нагрузок изменяются от максимальной величины сжатия в вершине оболочки до нуля и затем до максимальной величины растяжения у опорного кольца. Угол, при котором кольцевые усилия равны нулю, для постоянной нагрузки составляет приблизительно 52° , для снеговой – 45° (см. рис. 9).

Таблица 6

Горизонтальный распор и соответствующие ему кольцевые усилия в опорном кольце при действии постоянной и снеговой нагрузок увеличиваются пропорционально косинусу центрального угла. Это же правило остаётся в силе для изгибающих моментов, возникающих в зоне контакта оболочки с опорным кольцом.

В опорном кольце действуют осевая растягивающая сила и изгибающий момент. Следовательно, опорное кольцо находится в условиях внецентренного растяжения. Вследствие незначительной

величины изгибающего момента его допускается рассчитывать как центральное растянутое. При этом считается, что всё растягивающее усилие воспринимается только арматурой.

8. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ КУПОЛОВ

8.1. Монолитный купол

В верхней части купола в зоне действия сжимающих усилий арматура в меридиональном и кольцевом направлениях устанавливается без расчёта по конструктивным соображениям. Конструктивная арматура выполняется в виде сетки из стержней диаметром $5 \div 6$ мм с шагом $150 \div 200$ мм. Сетку рекомендуется располагать посередине сечения оболочки. При проектировании сетки следует иметь в виду, что число стержней, укладываемых в меридиональном направлении, с приближением к вершине уменьшается в соответствии с уменьшением длины окружности купола.

В нижней части купола в зоне примыкания к опорному кольцу ставят дополнительную арматуру в меридиональном и кольцевом направлениях. Меридиональная арматура рассчитывается по изгибающему моменту, а кольцевая – по растягивающему усилию. Дополнительная арматура выполняется в виде сетки из стержней диаметром $6 \div 10$ мм и шагом не более 200 мм.

Опорное кольцо в целях повышения трещиностойкости делается предварительно-напряжённым. Натяжению подвергается кольцевая рабочая арматура. Натяжение осуществляется на «бетон» механическим или электрическим способом.

В целом армирование купола может быть представлено в виде схемы (рис. 10).

8.2. Сборный купол

Членение сборного купола на монтажные элементы может осуществляться по меридиональному и меридионально-кольцевому направлениям (рис. 11). При членении по меридиональному направлению монтажный элемент имеет криволинейное очертание (см. рис. 11). Из условия транспортировки длина сборного элемента не должна превышать 18 м, а ширина – 3,5 м. Данные рекомендации

могут быть выполнены при условии, если диаметр опорного кольца не превышает 40м.

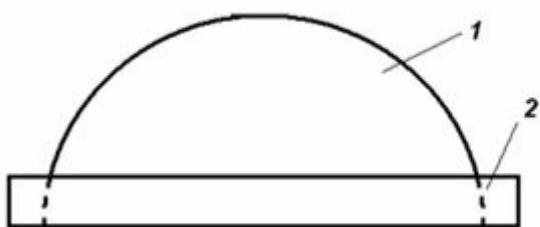
Сборные элементы купола усиливаются контурными и промежуточными рёбрами.

Членение купола по меридионально-кольцевым направлениям позволяет получать как криволинейные, так и плоские монтажные элементы (см. рис.11). Плоские панели проще в изготовлении, но ухудшают внешний вид купола и работу оболочки, так как в местах стыков будут переломы, приводящие к возникновению дополнительных изгибающих моментов.

Библиографический список

1. Байков В.Н., Сигалов К.Э. Железобетонные конструкции. – М.: Стройиздат, 1991.
2. Липницкий М.Е. Купольные покрытия для строительства в условиях сурового климата. – Л.: Стройиздат, 1981.
3. Руководство по проектированию железобетонных конструкций покрытий и перекрытий/НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1979.

а)



б)

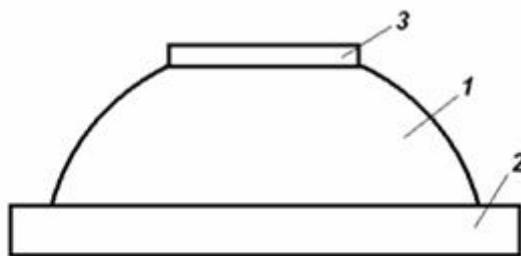


Рис. 1. Конструктивные схемы купольных покрытий: *a* – с полным куполом; *б* – усеченный купол с фонарным кольцом; 1 – оболочка купола; 2 – опорное кольцо; 3 – фонарное кольцо

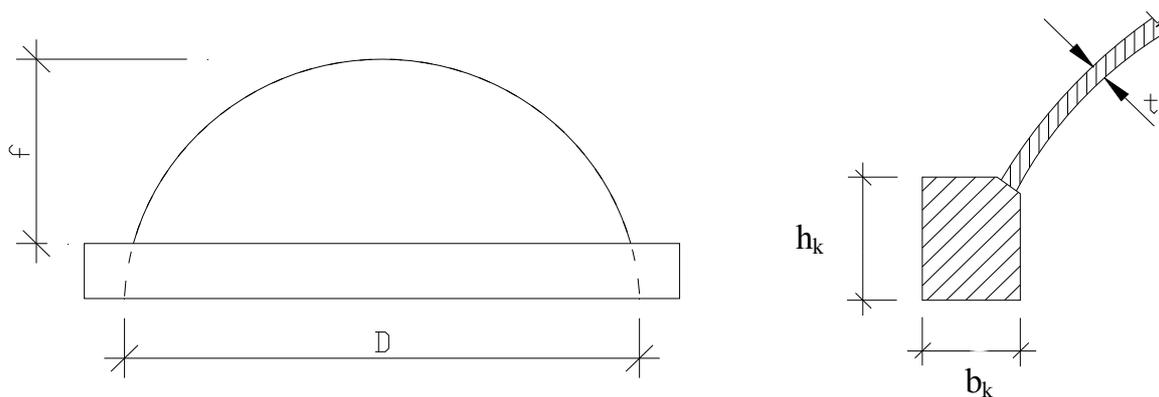


Рис. 2. Основные габаритные размеры купола: D – диаметр купола; f – стрела подъёма; h_k , b_k – размеры поперечного сечения кольца; t – толщина оболочки

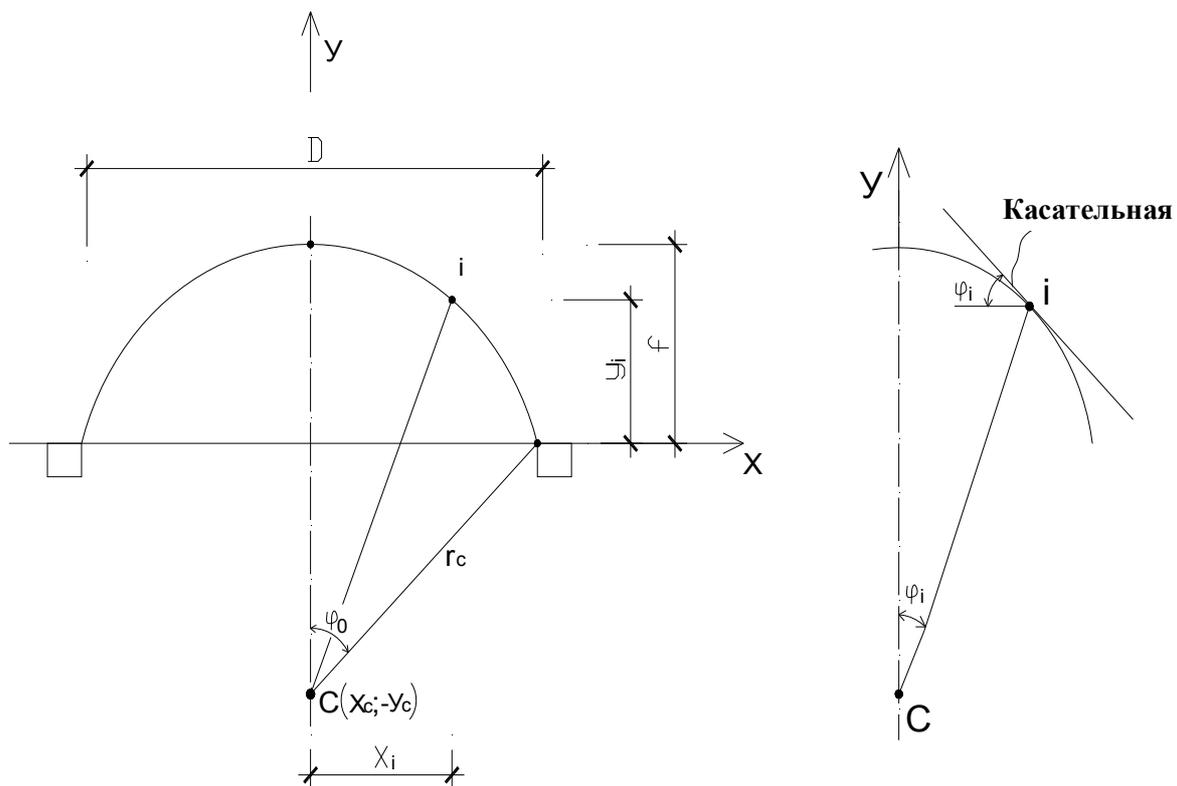


Рис. 3. Основные геометрические характеристики купола: X_c , Y_c – координаты центра окружности; X_i , Y_i – координаты сечений купола по горизонтали и вертикали; φ_i – центральный угол сечения

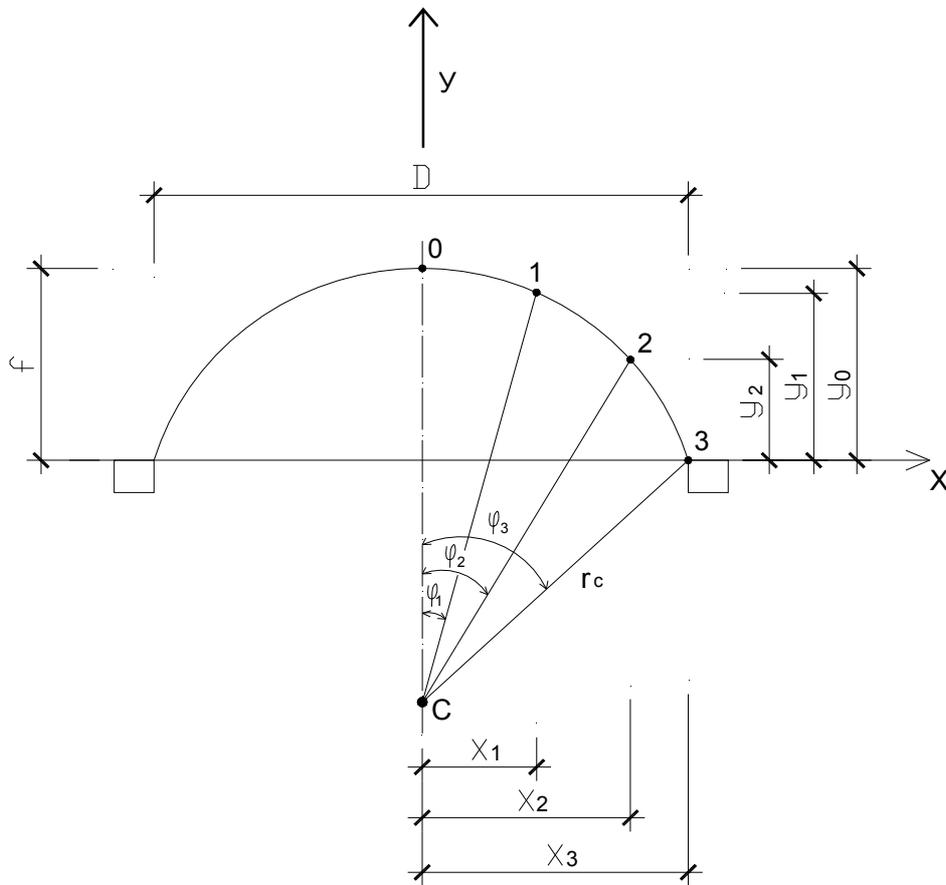


Рис. 4. Геометрическая схема купола с расчётными сечениями

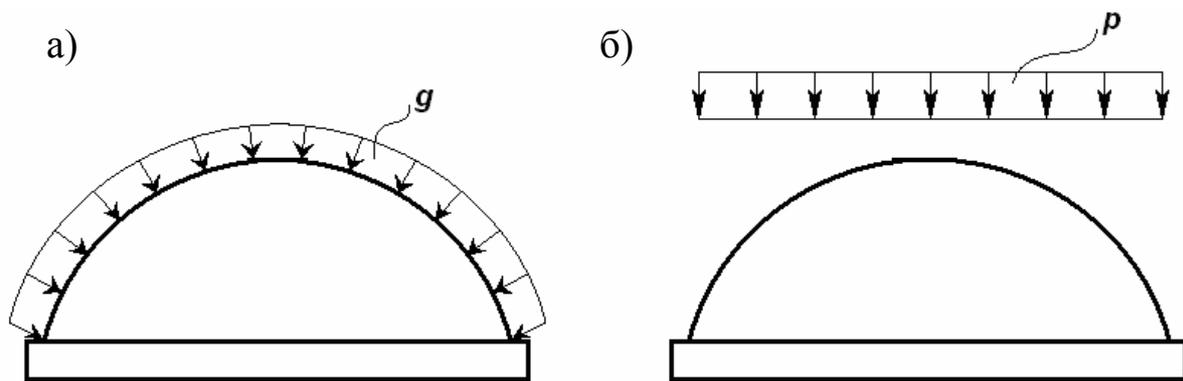


Рис. 5. Схемы загрузки: *а* – нагрузка от собственного веса; *б* – равномерно распределенная нагрузка от снега

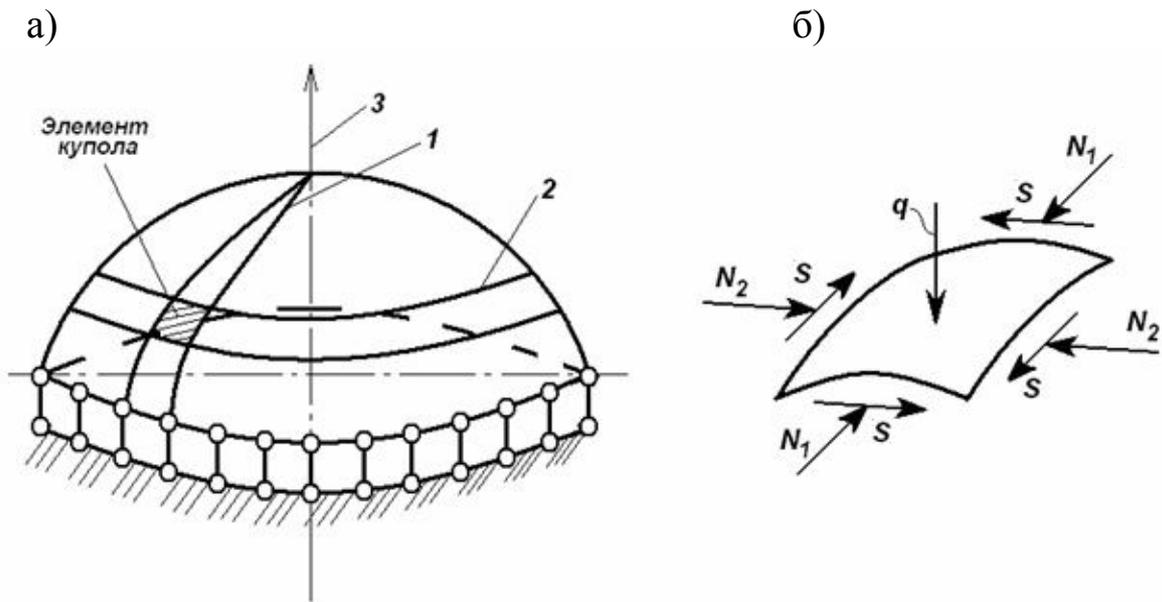


Рис.6. К расчету оболочки купола: *a* – схема купола с шарнирно-подвижным опиранием по контуру; *б* – элемент купола с внутренними усилиями; *1* – меридиональное сечение; *2* – кольцевое сечение; *3* – ось вращения

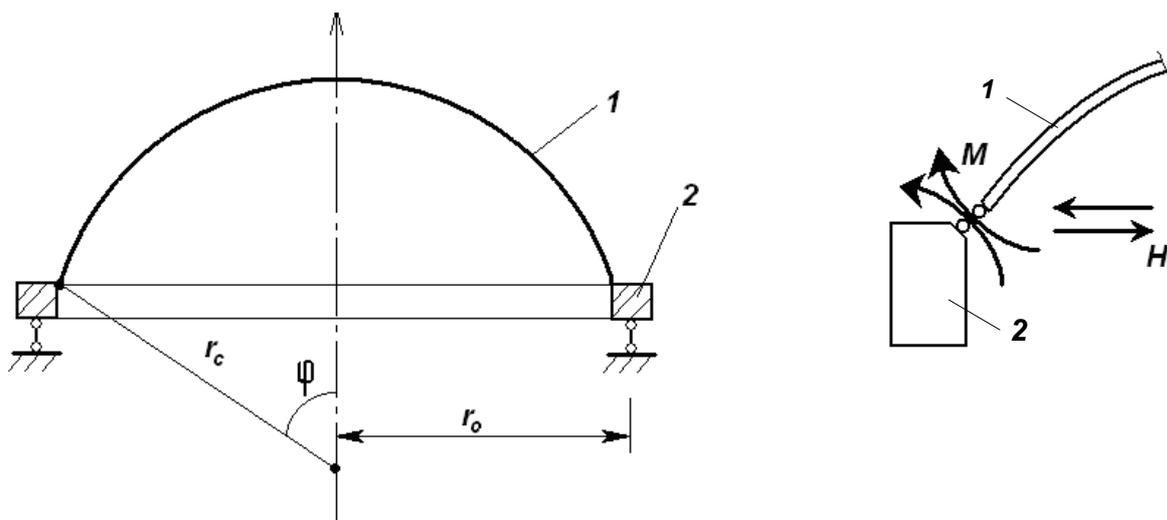


Рис. 7. Расчетная схема купола для определения усилий краевого эффекта: *1* – оболочка купола; *2* – опорное кольцо

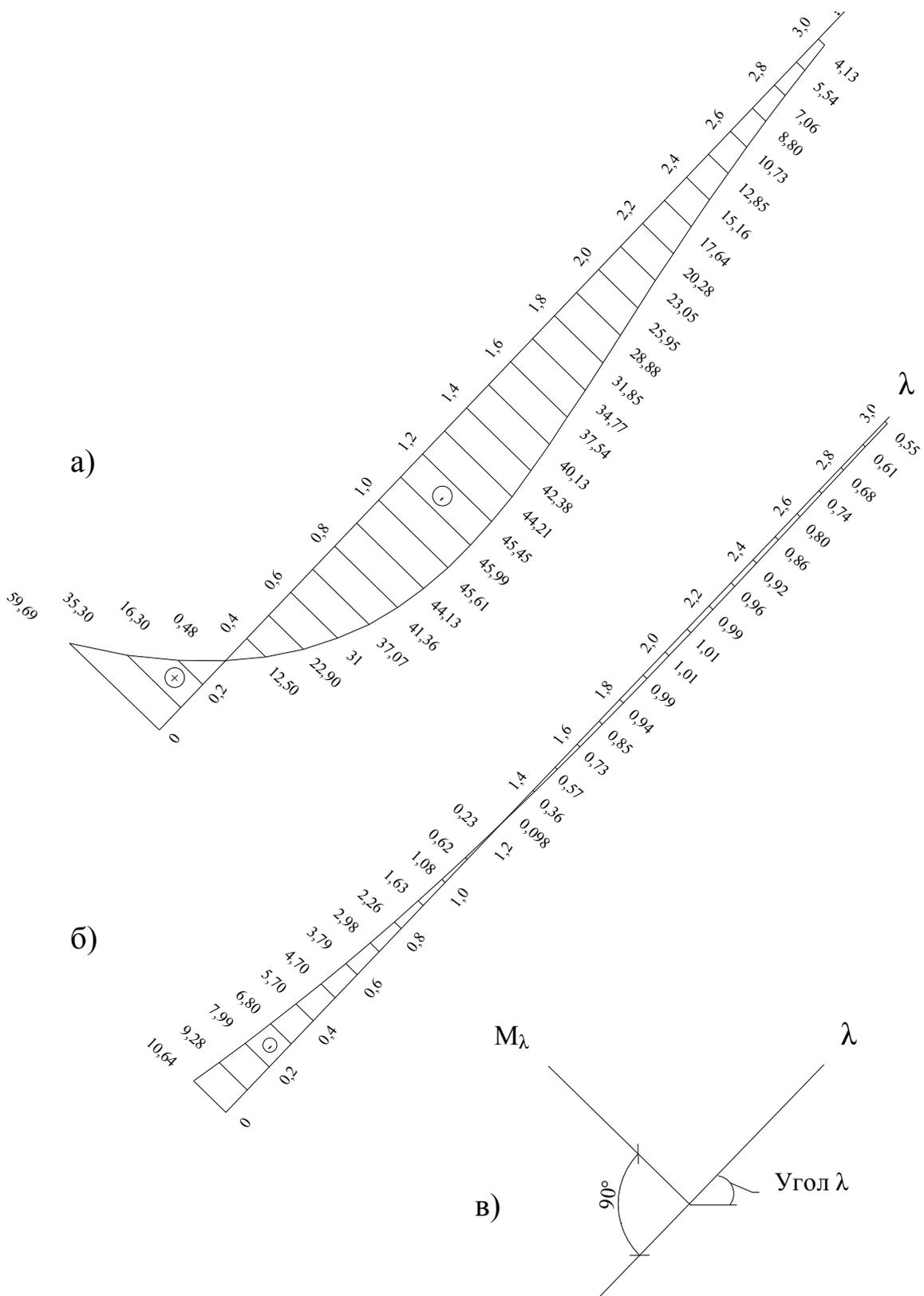


Рис. 8. Эпюры усилий в куполе: а – эпюра изгибающих моментов; б – эпюра кольцевых усилий; в – направление осей координат

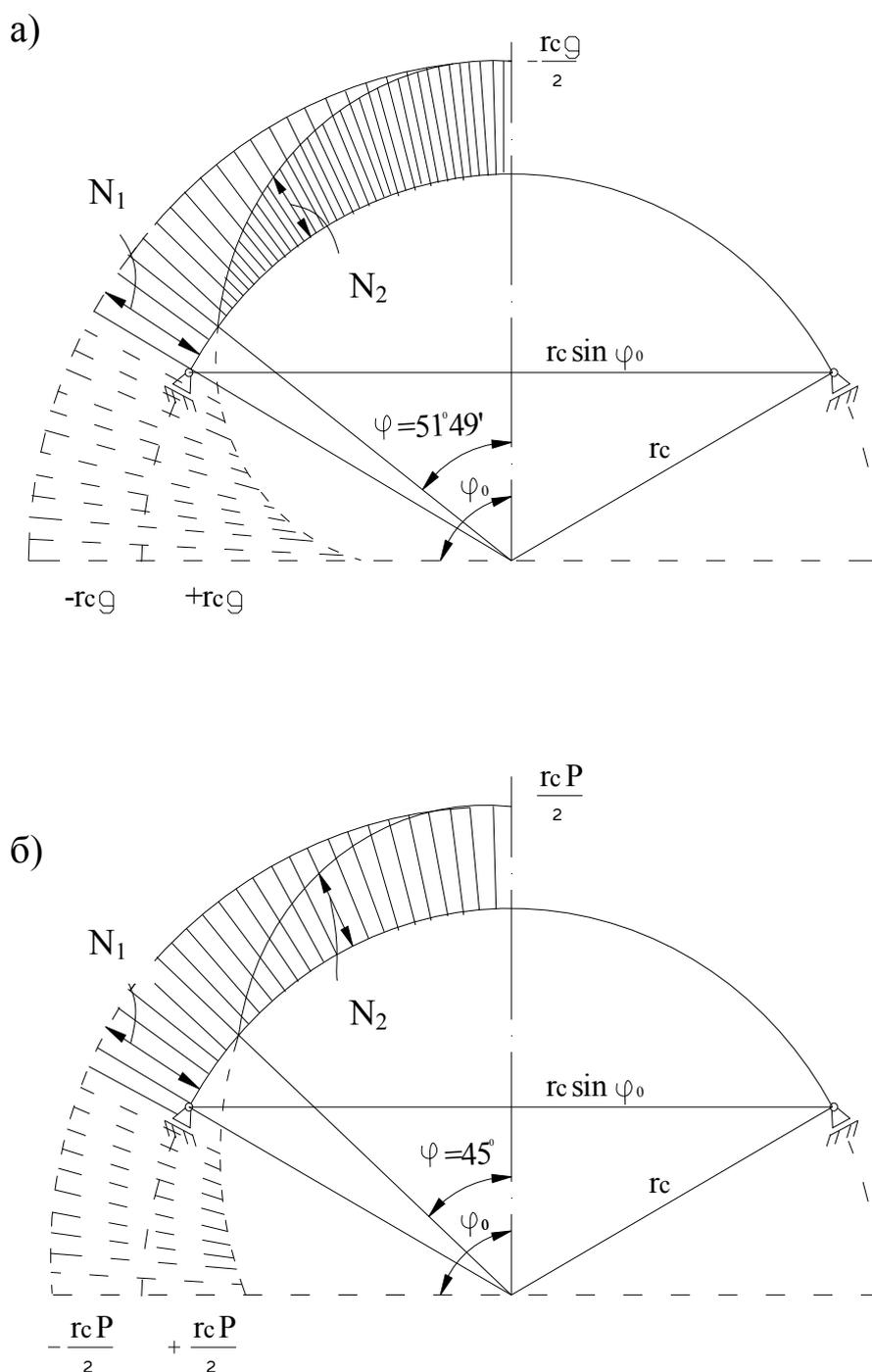


Рис. 9. Эпюры усилий N_1 и N_2 в куполе-оболочке: *а* – при загрузении купола собственным весом; *б* – при загрузении купола снеговой нагрузкой

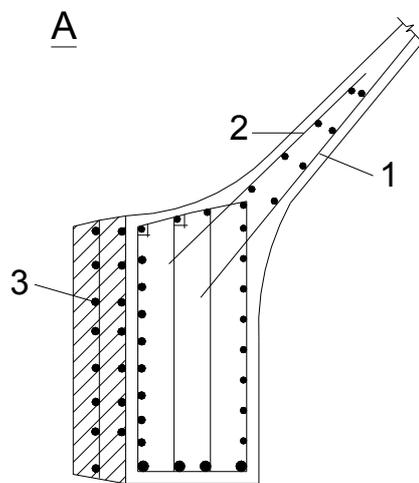
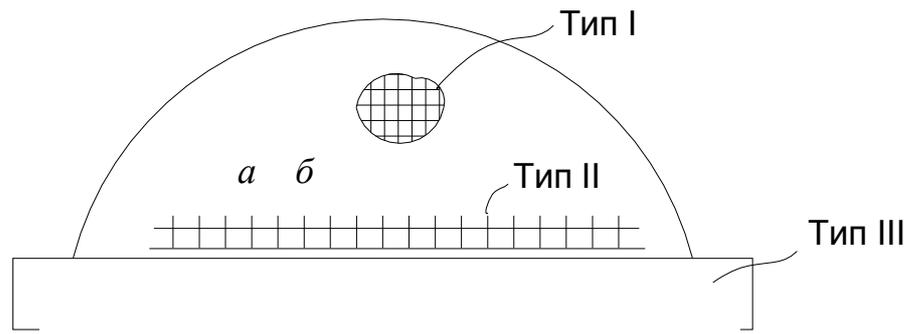
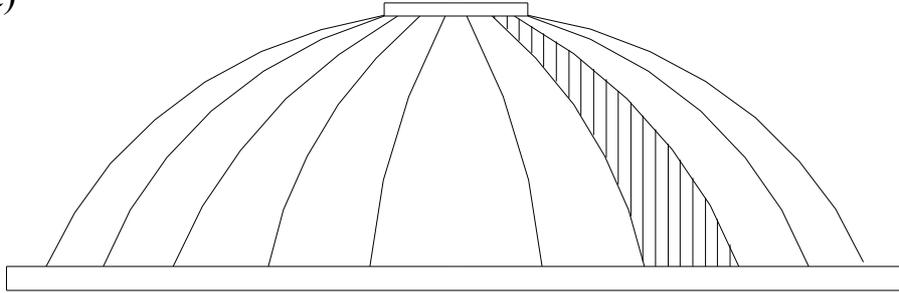


Рис. 10. Схемы армирования купола: тип I – арматура оболочки; тип II – арматура в зоне примыкания оболочки у опорному кольцу: *a* – арматурные стержни меридионального направления, рассчитываются по изгибающему моменту; *б* – кольцевая арматура, рассчитывается по растягивающему усилию; тип III – рабочая арматура опорного кольца. A – узел сопряжения оболочки с опорным кольцом; 1 – арматура конструктивной сетки оболочки; 2 – дополнительная арматурная сетка; 3 – предварительно-напряжённая арматура опорного кольца

а)



б)

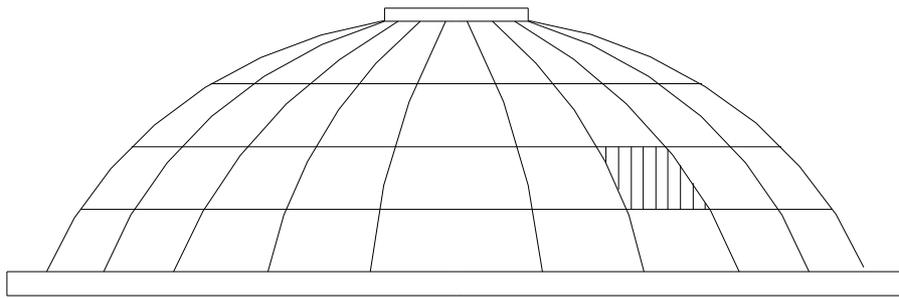


Рис. 11. Членение купола на сборные элементы: *а* – разрезка по меридиональному направлению; *б* – меридионально-кольцевая разрезка

Таблица 6

**Значения кольцевых усилий по длине меридиана оболочки
(влияние краевого эффекта)**

Исходные данные	λ	η_1	η_2	$M_0\eta_1$	$M_0\eta_2$	$SH_0 \cdot \sin\varphi_0$	$SH_0 \cdot \sin\varphi_0 \cdot \eta_1$ (3) x (7)	$M_0\eta_1 + SH_0 \sin\varphi_0 \eta_1$ (5) + (8)	$M_0\eta_2 - (M_0\eta_1 + SH_0 \sin\varphi_0 \eta_1)$ (6) + (9)	$S \frac{2r_c}{S^2}$	$2r_c/S^2 \cdot [M_0\eta_2 - (M_0\eta_1 + SH_0 \sin\varphi_0 \eta_1)]$ (10)x(11)	$N_{2\lambda}$, кН (N ₂)+(12)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$M_0 = 57.69$ Н·м	0	1	0	57.69	0	-242.05	-242.05	-184.36	-184.36	57.7	-10.64	-147.241
$H_0 = -333.4026$ Н	0.1	0.9	0.0903	51.95	5.21	-242.05	-217.95	-166.00	-160.79	57.7	-9.28	-147.239
$S = 1.0025$	0.2	0.802	0.1627	46.29	9.39	-242.05	-194.22	-147.93	-138.55	57.7	-8.00	-147.238
$N_2 = -147.23$ кН	0,3	0.708	0.2189	40.83	12.63	-242.05	-171.33	-130.49	-117.86	57.7	-6.80	-147.237
$\sin\varphi_0 = 0.7242$	0.4	0.617	0.261	35.62	15.06	-242.05	-149.44	-113.83	-98.77	57.7	-5.70	-147.236
$r_c = 29$ м	0.5	0.532	0.2908	30.71	16.78	-242.05	-128.85	-98.14	-81.36	57.7	-4.70	-147.235
	0.6	0.453	0.3099	26.13	17.88	-242.05	-109.65	-83.52	-65.64	57.7	-3.79	-147.234
	0.7	0.38	0.3199	21.91	18.46	-242.05	-91.93	-70.02	-51.57	57.7	-2.98	-147.233
	0.8	0.313	0.3223	18.06	18.59	-242.05	-75.76	-57.71	-39.11	57.7	-2.26	-147.232
	0.9	0.253	0.3185	14.58	18.37	-242.05	-61.19	-46.61	-28.23	57.7	-1.63	-147.232

Окончание табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	1	0.199	0.3096	11.47	17.86	-242.05	-48.12	-36.65	-18.79	57.7	-1.08	-147.231
	1.1	0.151	0.2967	8.71	17.12	-242.05	-36.55	-27.84	-10.72	57.7	-0.62	-147.231
	1.2	0.109	0.2807	6.30	16.19	-242.05	-26.43	-20.13	-3.94	57.7	-0.23	-147.230
	1.3	0.073	0.2626	4.21	15.15	-242.05	-17.65	-13.44	1.71	57.7	0.10	-147.230
	1.4	0.042	0.243	2.42	14.02	-242.05	-10.14	-7.72	6.29	57.7	0.36	-147.230
	1.5	0.016	0.2226	0.91	12.84	-242.05	-3.82	-2.91	9.93	57.7	0.57	-147.229
	1.6	- 0.0059	0.2018	-0.34	11.64	-242.05	1.43	1.09	12.73	57.7	0.73	-147.229
	1.7	- 0.0236	0.1812	-1.36	10.45	-242.05	5.71	4.35	14.80	57.7	0.85	-147.229
	1.8	- 0.0376	0.1610	-2.17	9.29	-242.05	9.10	6.93	16.22	57.7	0.94	-147.229
	1.9	- 0.0484	0.1415	-2.79	8.16	-242.05	11.72	8.92	17.09	57.7	0.99	-147.229
	2	- 0.0564	0.1231	-3.25	7.10	-242.05	13.65	10.40	17.50	57.7	1.01	-147.229
	2.1	- 0.0618	0.1057	-3.57	6.10	-242.05	14.96	11.39	17.49	57.7	1.01	-147.229
	2.2	- 0.0652	0.0896	-3.76	5.17	-242.05	15.78	12.02	17.19	57.7	0.99	-147.229
	2.3	- 0.0668	0.0748	-3.85	4.32	-242.05	16.17	12.32	16.63	57.7	0.96	-147.229
	2.4	- 0.0669	0.0613	-3.86	3.54	-242.05	16.19	12.33	15.87	57.7	0.92	-147.229
	2.5	- 0.0658	0.0491	-3.80	2.83	-242.05	15.93	12.13	14.96	57.7	0.86	-147.229

	2.6	- 0.0636	0.0383	-3.67	2.21	-242.05	15.39	11.73	13.94	57.7	0.80	-147.229
	2.7	- 0.0608	0.0287	-3.51	1.66	-242.05	14.72	11.21	12.86	57.7	0.74	-147.229
	2.8	- 0.0573	0.0204	-3.31	1.18	-242.05	13.87	10.56	11.74	57.7	0.68	-147.229
	2.9	- 0.0535	0.0133	-3.09	0.77	-242.05	12.95	9.86	10.63	57.7	0.61	-147.229
	3	- 0.0493	0.0070	-2.84	0.40	-242.05	11.93	9.09	9.49	57.7	0.55	-147.229

Рецензия

на методическое пособие
«Железобетонные купольные покрытия»,
составитель А.Г. Кельнер.

Представленное на рецензию методическое пособие предназначено для студентов специальностей «Промышленное и гражданское строительство» (270102), «Проектирование зданий» (270114) при выполнении дипломного проекта.

Цель указаний оказать методическую помощь студентам дневной и заочной форм обучения при самостоятельном изучении вопросов конструирования и расчета купольных покрытий.

В методическом пособии проектирование купола, рассматривается последовательно, начиная с назначения основных размеров и кончая конструированием. Для каждой стадии проектирования купола приводятся рекомендации по их расчёту с подробными примерами.

Методическое пособие состоит из _____ страниц текста, рисунков, таблиц.

Оценивая в целом методическое пособие, считаю, что автор А.Г. Кельнер подготовил работу, которая окажет существенную помощь студентам при дипломном проектировании и поэтому рекомендую её издать.

Главный специалист
технического отдела
ОАО «ТПИ Омскгражданпроект» _____

П.Г. Фролов

« » _____ 2009г.

Рецензия

на методическое пособие
«Железобетонные купольные покрытия»,
составитель А.Г. Кельнер.

Представленное на рецензию методическое пособие предназначено для студентов специальностей «Промышленное и гражданское строительство» (270102), «Проектирование зданий» (270114) при выполнении дипломного проекта.

Купольные покрытия широко применяются в строительстве. Особенно увеличилось использование куполов в последние годы в связи со значительным увеличением строительства храмов и других культовых сооружений. В то же время в учебной литературе последних лет нет не только темы «Купольные покрытия», но и всего раздела «Пространственные покрытия» (В.М. Бондаренко «Железобетонные и каменные конструкции» 2002г.). Поэтому сам факт написания методического пособия по железобетонным купольным покрытиям следует признать положительным.

В методическом пособии последовательно рассматриваются все стадии проектирования купола – назначение геометрических размеров, статический расчёт, конструирование.

Методическое пособие состоит из _____ страниц текста, _____ рисунков, _____ таблиц.

Считаю, что автор А.Г. Кельнер подготовил методическое пособие, которое окажет существенную помощь студентам при дипломном проектировании и при изучении дисциплины «Железобетонные пространственные покрытия» и поэтому рекомендую её издать.

Доцент, канд. тех. наук
каф. «Строительная механика» _____

Г.Г. Воробьев.

« _____ » 2009г.

Учебное издание

**ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ
КУПОЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ**

Методические указания для
дипломного проектирования

Составитель Артур Генрихович Кельнер

* * *

Редактор И.Г. Кузнецова

* * *

Подписано к печати 22.09.2009
Формат 60×90 1/16. Бумага писчая
Оперативный способ печати.
Гарнитура Times New Roman
Усл. п. л. 2,0, уч.- изд.л. 1,5
Тираж 75 экз. Заказ №
Цена договорная

* * *

Издательство СибАДИ
644099, г. Омск, ул. П.Некрасова, 10

Отпечатано в подразделении ОП издательства СибАДИ
644099, г. Омск, ул. П.Некрасова, 10