

## 1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Пространственные железобетонные конструкции** - выполненные из железобетона конструкции, работающие как пространственные системы, применяющиеся в качестве покрытий, перекрытий, стен зданий и сооружений, или представляющие собой сооружение в целом.

**Тонкостенные пространственные системы** - конструкции, у которых два измерения одного порядка существенно превышают третье (толщину).

**Оболочка** - пространственная конструкция, ограниченная двумя криволинейными поверхностями, расстояние между которыми (толщина) мало по сравнению с другими ее размерами.

**Складка** - оболочка, составленная из отдельных пластинок, соединенных между собой и образующих поверхность многогранника. Складка из прямоугольных пластинок называется призматической. Балочные складки состоят из плоских элементов-граней, соединенных между собой под углом так, что в месте их сопряжения образуется прямолинейное ребро.

(использованы также основные термины и определения по СП 63.13330 и другим нормативным документам.)

## 2. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

### 2.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Железобетонные тонкостенные пространственные конструкции покрытий и перекрытий (рис. 1.1) различаются:

#### по очертанию срединной поверхности

а) складки с различной формой поперечного сечения, в том числе складчатые своды и оболочки (рис. 1.1, а);

б) оболочки и своды нулевой гауссовой кривизны - цилиндрические и конические оболочки и цилиндрические своды (рис. 1.1, б);

в) оболочки и волнистые своды положительной гауссовой кривизны - сферические оболочки и купола, очерченные по поверхностям вращения с вертикальной осью (рис. 1.1, д); оболочки, очерченные по поверхности переноса в виде эллиптического параболоида, круговой поверхности (рис. 1.1, в) и бочарные своды (рис. 1.1, е, 10);

г) оболочки и волнистые своды отрицательной гауссовой кривизны - оболочки, очерченные по линейчатым поверхностям гиперболического параболоида (гипары) (рис. 1.1, г); и по поверхностям вращения с горизонтальной осью (рис. 1.1, е, 11);

д) оболочки разнозначной гауссовой кривизны - тороидальные оболочки (рис. 1.1, ж); поверхности которых имеют на некоторых участках положительную, а на других - отрицательную кривизну (между точками А и В на рис. 1.1, ж), коноиды (поверхность которых имеет в большей части нулевую гауссову кривизну) и параболические оболочки на плоском контуре (в основном, положительной кривизны), угловые участки которых имеют отрицательную гауссову кривизну и др.;

е) многогранники, в том числе вписанные в поверхности оболочек, указанных в подпунктах «б», «в», «г», «д» (рис. 1.1, з), а также шатровые складки (рис. 1.1, и);

ж) составные оболочки, имеющие сложную поверхность, образуемые из оболочек, указанных в подпунктах «б», «в», «г», «д», «е» (рис. 1.1, к, л);

з) вспарушенные плиты, в том числе ступенчато-вспарушенные шатровые и рамно-шатровые панели (рис. 1.1, м, 16);

по форме перекрываемой площади (при опирании на стены, фундаменты или отдельные опоры) и конструктивным особенностям

а) на круглом плане;

б) на овальном (эллиптическом) плане;

в) на квадратном плане;

г) на прямоугольном плане;

д) на треугольном плане;

е) на полигональном плане;

ж) кольцевые тороидальные и составные оболочки;

з) неразрезные многоволновые оболочки, многогранники и складки;

и) неразрезные многопролетные оболочки, многогранники и складки;

к) висячие оболочки;

л) шедовые конструкции;

м) то же, что и в подпунктах «а» - «л», но гладкие или ребристые;

н) консольные оболочки, складки и многогранники;

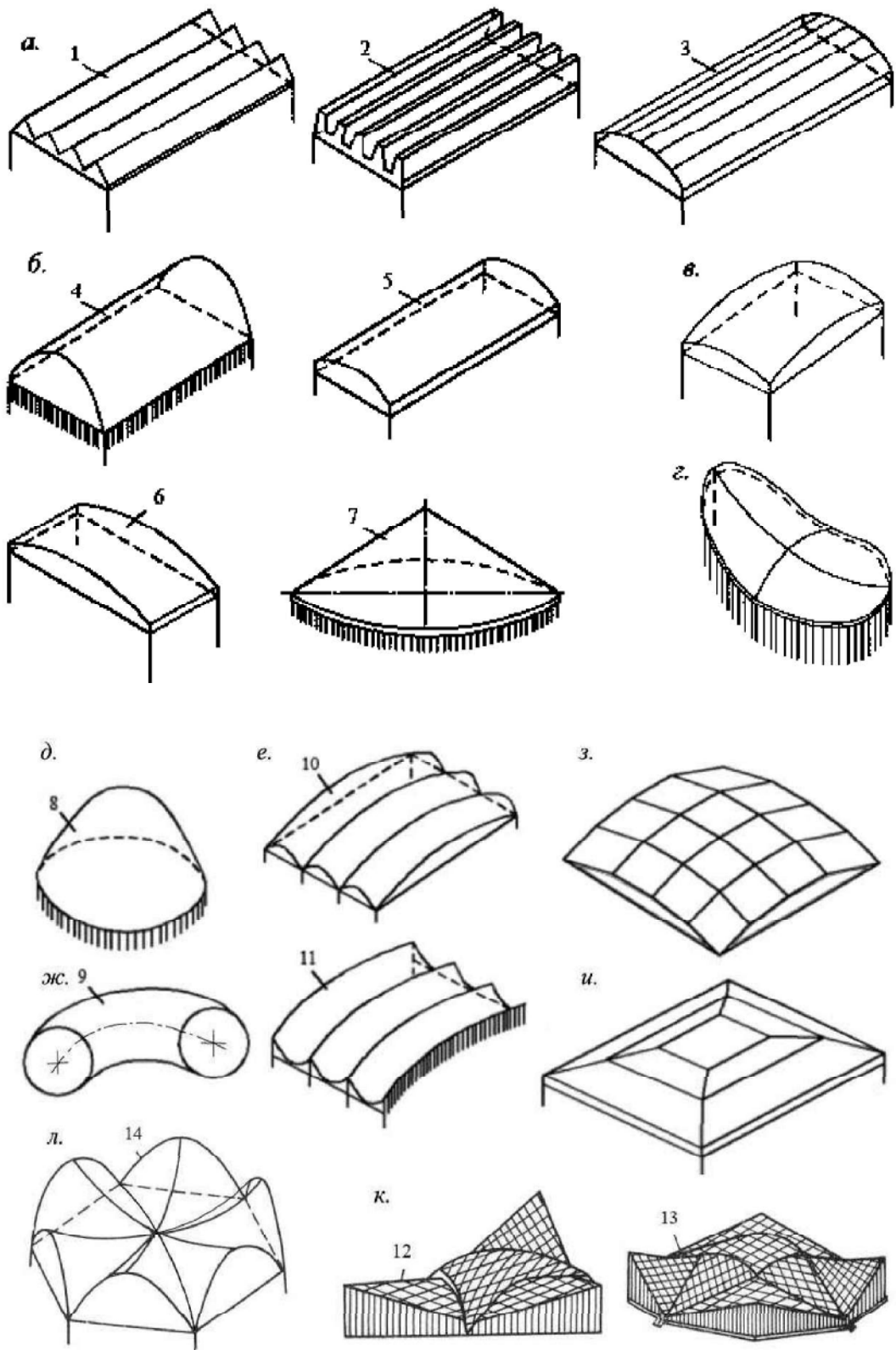
по способу изготовления и возведения

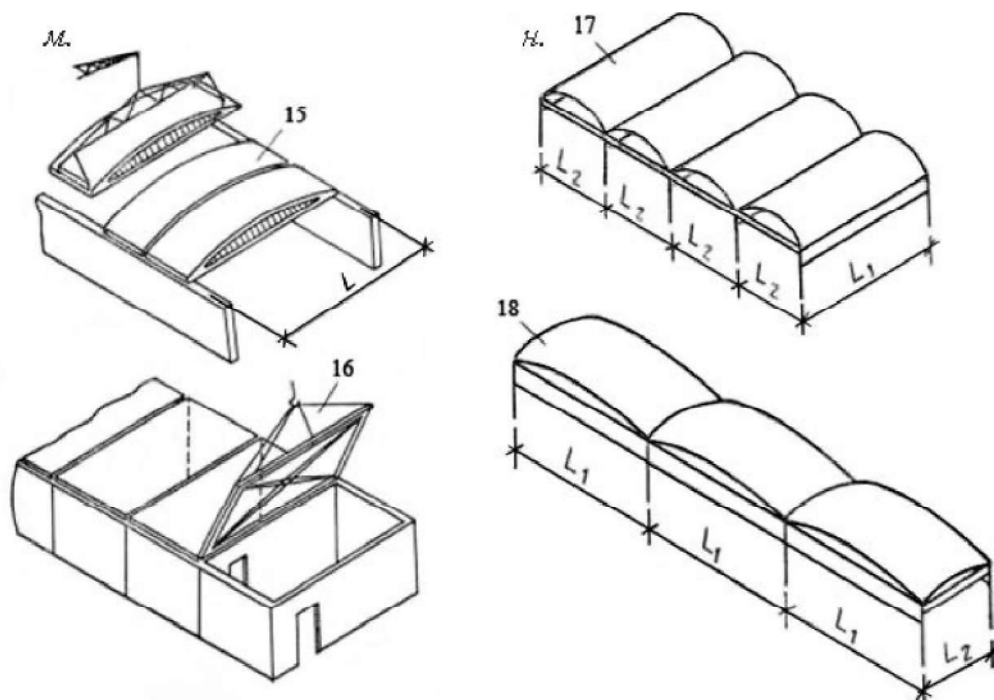
а) монолитные;

б) сборно-монолитные (когда сборные элементы служат несущей опалубкой или, например, бортовые элементы сборные, а плита-оболочка - монолитная);

в) сборные из плоских, цилиндрических и других элементов;

г) панели-оболочки и панели-складки, изготавливаемые и монтируемые в готовом виде (как правило, не требующие расчетного замоноличивания швов между ними) и имеющие размеры, соответствующие пролету между опорами и габаритам, установленным с учетом условий изготовления, перевозки и монтажа;





*a* — призматические складки; *б* — оболочки нулевой гауссовой кривизны; *в* — оболочки положительной гауссовой кривизны; *г* — то же, отрицательной; *д* — оболочки с вертикальной осью вращения; *е* — оболочки с горизонтальной осью вращения; *жс* — тороидальные оболочки разнозначной гауссовой кривизны; *з* — многогранники; *и* — то же, шатрового типа; *к* — составные оболочки; *л* — то же, из гиперболических треугольных сводов; *м* — панели-оболочки; КЖС размером на пролет покрытия и вспарушенные оболочки размером на ячейку здания; *н* — неразрезные оболочки; *1* — балочная складка с треугольным поперечным сечением; *2* — то же, с трапециевидным; *3* — то же, со сводчатым (призматические выпуклые складки); *4* — свод-оболочка; *5* — длинные цилиндрические оболочки, *6* — то же, короткие; *7* — коническая оболочка; *8* — купол; *9* — тороидальная оболочка; *10* — бочарные своды; *11* — гиперболические оболочки; *12* — покрытие с треугольным планом из оболочек положительной и отрицательной гауссовой кривизны; *13* — то же, с полигональным планом; *14* — покрытие из составных гипаров; *15* — панели-оболочки КЖС; *16* - вспарушенные плиты-оболочки; *17* - многоволновые оболочки; *18* — многопролетные оболочки.

Рисунок 1.1. Схемы тонкостенных пространственных конструкций покрытий и перекрытий.

**по материалам, из которых возводятся:**

- а) железобетонные (в том числе с применением легких и других бетонов);
- б) комбинированные, состоящие из железобетонной плиты и металлических диафрагм или бортовых элементов;
- в) комплексные, состоящие из железобетонной пространственной конструкции и теплоизоляционных, гидроизоляционных и других материалов,
- г) армоцементные и сталефибробетонные.

Железобетонные пространственные конструкции должны быть обеспечены с требуемой надежностью от возникновения всех видов предельных состояний расчетом, выбором показателей качества материалов, назначением размеров и конструированием, согласно указаниям настоящего свода правил. При этом должны быть выполнены технологические требования при изготовлении конструкций и соблюдены требования по эксплуатации зданий и сооружений, а также требования по экологии, устанавливаемые соответствующими нормативными документами.

Элементы сборных и сборно-монолитных пространственных конструкций рекомендуется проектировать с учетом условий механизации их изготовления на заводах или полигонах, а железобетонные монолитные пространственные конструкции - с учетом механизированного выполнения опалубочных, арматурных и бетонных работ.

Сборные и сборно-монолитные пространственные конструкции рекомендуется проектировать из унифицированных плоских, цилиндрических или иных, как правило, ребристых

панелей, монтируемых с применением укрупнительной сборки или из крупноразмерных элементов, изготовленных вблизи места возведения конструкции.

Панели-оболочки и панели-складки следует проектировать с учетом особенностей их транспортирования и складирования.

Применение укрупненных тонкостенных элементов покрытий и перекрытий длиной более 24 м или шириной (высотой) более 3,2 м, а также весом более 15 т должно быть специально обосновано с учетом их перевозки и монтажа.

Железобетонные покрытия пространственного типа следует проектировать с учетом комплекса требований по гидро- и теплоизоляции, водоотводу, устройству различных проходов через покрытие, фонарных и других проемов и отверстий.

Панели сборных пространственных конструкций рекомендуется проектировать так, чтобы завод или полигон изготовлял их повышенной готовности — утепленными, с гидроизоляцией и т. п.

## **ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ**

Расчеты железобетонных пространственных конструкций следует производить по предельным состояниям, включающим:

- предельные состояния первой группы (по полной непригодности к эксплуатации вследствие потери несущей способности);
- предельные состояния второй группы (по непригодности к нормальной эксплуатации вследствие образования или чрезмерного раскрытия трещин, появления недопустимых деформаций и др.)

Расчеты по предельным состояниям первой группы включают расчет по прочности, с учетом в необходимых случаях деформированного состояния конструкции перед разрушением, и расчет по устойчивости (общей и локальной).

Расчеты по предельным состояниям второй группы включают расчеты по образованию и раскрытию трещин и по деформациям.

Расчет пространственных конструкций покрытий и перекрытий по предельным состояниям следует производить для всех воздействий на конструкцию или ее элементы на стадии изготовления, транспортирования, возведения и эксплуатации, в том числе:

- монолитные конструкции, в том числе с предварительно напряженным армированием, должны быть рассчитаны по прочности и трещиностойкости при раскружаливании;
- элементы сборно-монолитных конструкций должны быть рассчитаны по прочности и трещиностойкости на действие собственного веса и веса бетона замоноличивания и монтажных нагрузок;
- сборно-монолитная конструкция после достижения бетоном замоноличивания проектной прочности должна быть рассчитана в целом как монолитная с включением в работу сборных элементов - если для этого предусмотрены соответствующие конструктивные и технологические мероприятия;
- элементы сборных конструкций, в том числе укрупненных, при монтаже (до замоноличивания) должны быть проверены по прочности и трещиностойкости на усилия от действия собственного веса, монтажных нагрузок и реактивных усилий от временных опор, затяжек и других приспособлений;
- сборные конструкции после достижения бетоном замоноличивания стыков проектной прочности и после раскружаливания должны быть рассчитаны по прочности, жесткости, трещиностойкости на действие собственного веса, монтажных нагрузок и предварительного напряжения арматуры с учетом изменения на данной стадии напряженно-деформированного состояния конструкции от удаления всех или части временных связей.

Расчетные схемы и нагрузки должны отвечать принятым конструктивным решениям пространственных конструкций и воздействиям для каждой рассматриваемой стадии.

Расчеты железобетонных пространственных конструкций следует, как правило, производить с учетом наличия трещин и неупругих деформаций в бетоне и арматуре.

Определение усилий и деформаций от различных воздействий в конструкциях и в образуемых ими системах зданий и сооружений следует производить по методам строительной

механики, как правило, с учетом физической и геометрической нелинейности работы конструкций.

Допускается усилия и деформации определять в предположении упругой работы железобетонных элементов с последующей корректировкой результатов расчета для учета влияния физической нелинейности их работы.

Усилия и деформации в пространственных конструкциях следует определять, используя:

- метод конечных элементов с учетом физической нелинейности (неупругих деформаций бетона и арматуры) и возможного образования трещин в соответствии с указаниями СП 63.13330;

- методы теории упругости с использованием технической теории оболочек и практических методов расчета тонких оболочек и складок, учитывающих неразрезность конструкции, податливость опор и диафрагм, наличие ребер, отверстий и проемов, а также неравномерные и динамические нагрузки и т. п.;

- методы упругопластической теории с использованием прикладной теории деформаций железобетона с учетом практических гипотез и упрощений упругопластического расчета, вытекающих из особенностей работы железобетона с трещинами;

- метод предельного равновесия, в том числе по деформированной схеме, для определения несущей способности или проверки назначенных сечений бетона и арматуры в предварительных и рабочих расчетах, с использованием схемы излома и формы разрушения, установленных испытаниями моделей конструкций до разрушения;

- результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния образцов пространственных конструкций.

При проектировании сложных пространственных конструкций помимо расчетной оценки несущей способности, трещиностойкости и деформативности следует выполнять испытание их физических моделей.

При составлении расчетной схемы покрытия или перекрытия рекомендуется использовать срединную поверхность гладкой плиты, подкрепленной ребрами плиты оболочки, многогранника или складки. Для покрытий, которые по условиям возведения образуются как многогранники, вписанные в поверхность оболочки, с количеством граней  $n > 7$  (например, на участке между диафрагмами) за расчетную поверхность допускается принимать гладкую срединную поверхность оболочки. При этом дополнительные моменты и нормальные силы, возникающие в местах переломов действительной поверхности, допускается определять приближенно.

Для пространственных ребристых конструкций, а также для складчатых и волнистых сводов-оболочек за срединную поверхность допускается принимать поверхность, в которой лежат центры тяжести поперечных сечений конструкций. В этом случае при расчете ребристых, складчатых и волнистых оболочек допускается использовать в расчетах усредненную приведенную толщину оболочки  $S_{red} = A_b / c$  и усредненную приведенную жесткость  $D = E I_b / c$  (где  $A_b$  и  $I_b$  — соответственно площадь и момент инерции приведенного двутаврового сечения с шириной полки, равной  $c$ ).

За расчетный пролет оболочек, многогранников и складок следует принимать расстояние между осями опор покрытий и перекрытий.

За расчетный размер сторон оболочек, многогранников и складок в плане следует принимать расстояние между осями соответствующих бортовых элементов или диафрагм. При этом если для расчета система делится на поле оболочки и краевые элементы, в расчете следует учитывать эксцентриситет примыкания поля оболочки к диафрагме или к бортовым элементам.

При определении усилий в железобетонных пространственных конструкциях в упругой стадии площадь и момент инерции допускается принимать как для бетонного или, если  $\mu > 1\%$  ( $\mu$  — количество арматуры в % площади бетонного сечения) — как для приведенного к нему сечения. При расчете с учетом неупругих свойств железобетона и образования трещин, а также методом предельного равновесия, следует учитывать действительные характеристики железобетонных сечений для рассматриваемой стадии их работы.

При расчете железобетонных пологих оболочек кинематическим способом метода предельного равновесия следует рассматривать равновесие конструкции в момент исчерпания ее

несущей способности и перехода в изменяемую систему. Вид и характер пластического механизма, конфигурацию и размеры дисков в схеме излома следует принимать с учетом вида нагрузки, свойств поверхности и условий закрепления контура. При необходимости расчет несущей способности следует выполнять с учетом деформированного состояния - как отдельных элементов конструкции, так и конструкции в целом.

Расчет несущей способности монолитных, сборно-монолитных и сборных пространственных конструкций методом предельного равновесия допускается производить без учета монтажных и других усилий, возникающих в них до замоноличивания, в процессе изготовления и раскручивания. При необходимости следует учитывать деформированную схему конструкции - в том числе от перемещений, накопленных в процессе изготовления и возведения конструкции.

Участки плиты, оболочек и складок, в которых главные растягивающие равным: 1,60 - при транспортировании, 1,40 - при подъеме и монтаже. Допускается принимать более низкие, обоснованные в установленном порядке, значения коэффициента динамичности, но не ниже 1,25.

При расчете по прочности железобетонных элементов на действие сжимающей продольной силы следует учитывать случайный эксцентриситет  $e_a$ , принимаемый по указаниям СП 63.13330.

Расчет по устойчивости формы тонкостенных пространственных конструкций следует производить с учетом начальных несовершенств, а также деформаций ползучести бетона при длительном действии нагрузки.

Максимальные значения начального несовершенства следует определять опытным путем или задавать по аналогии с конструкциями подобного типа, для которых установлены их возможные значения.

В практических расчетах гладких длинных цилиндрических оболочек продольные нормальные сжимающие напряжения  $\sigma$  от действия расчетной нагрузки, вычисленные в предположении упругой работы железобетонных элементов, не должны превышать значение

$$\sigma_0 = 0,25 \frac{E \delta}{R}, \quad (4.1)$$

а скалывающие напряжения  $\tau$  по нейтральной оси не должны превышать значение

$$\tau_0 = 0,3 E \left( \frac{\delta}{R} \right)^{3/2}. \quad (4.2)$$

При сочетании нормальных и касательных напряжений следует соблюдать неравенство

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} + \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^3 \leq 1, \quad (4.3)$$

где  $\sigma_0$  и  $\tau_0$  вычисляются по формулам (4.1) и (4.2).

Для гладких коротких цилиндрических оболочек интенсивность полной расчетной нагрузки не должна превышать величины

$$q = 0,75 E \left( \frac{\delta}{R} \right)^2 \frac{1}{\left( l / \sqrt{\delta R} \right) - 1} \quad (4.4)$$

Для замкнутой сферической оболочки при равномерном внешнем давлении значение верхней критической нагрузки следует вычислять по формуле:

$$q_{up} = 1,21E \left( \frac{\delta}{R} \right)^2, \quad (4.5)$$

а значение нижней критической нагрузки - по формуле:

$$q_l = 0,2E \left( \frac{\delta}{R} \right)^2. \quad (4.6)$$

Гладкие подъемистые и пологие оболочки вращения и переноса следует проектировать таким образом, чтобы при равномерном внешнем давлении интенсивность полной расчетной нагрузки не превышала значения критической нагрузки, определенной по формуле:

$$q = 0,2E \left( \frac{\delta}{R_2} \right)^2 K, \quad (4.7)$$

где  $R_2$  - больший из радиусов кривизны оболочки;  $K = f(R_2/R_1)$  - коэффициент, учитывающий увеличение критической нагрузки на оболочку с увеличением отношения  $R_2/R_1$ . Для оболочек, у которых  $R_2/R_1 < 1,5$  принимается  $K = 1$ , а для оболочек, у которых  $R_2/R_1 > 1,5$  - значение  $K$  принимается по таблице:

$R_2/R_1$	1,5	1,75	2	2,25	2,5
$K$	1,15	1,4	1,6	1,8	2,0

В формулах 4.1 - 4.7:

$\delta, R$  - толщина и радиус кривизны оболочек;

$E$  - модуль деформаций бетона, принимаемый в зависимости от длительности действия нагрузки.

В случае если по результатам расчета устойчивость гладкой оболочки не обеспечена, в ней следует предусматривать устройство ребер жесткости. Для оболочек положительной или отрицательной гауссовой кривизны ребра следует, как правило, располагать в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для цилиндрических оболочек допускается устройство только кольцевых ребер.

Для предотвращения потери местной устойчивости расстояние между ребрами следует назначать не менее чем

$$7\sqrt{R_1\delta}$$

где  $R_1$  - меньший радиус кривизны оболочки.

Ребристые оболочки при расчете устойчивости могут рассматриваться как ортотропные. В случае, когда размеры ребер обоих направлений и расстояния между ними различаются между собой не более чем на 20%, ребристую оболочку при расчете допускается рассматривать как гладкую с условной толщиной  $5f$ , определяемой по формуле:

$$\delta_f = \sqrt{12I/A}, \quad (4.8)$$

и с условным модулем упругости  $E_f$ , определяемым по формуле:

$$E_f = E \frac{A}{b\delta_f}, \quad (4.9)$$



где  $b$  - расстояние между осями соседних ребер;  $A$  - площадь сечения, образованного одним ребром вместе с примыкающими частями тела оболочки шириной  $b$ ;  $I$  - момент инерции того же сечения.

Для ребристых цилиндрических оболочек при пользовании формулами следует понимать напряжения, отнесенные к условной толщине оболочки.

При проектировании железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий следует обеспечить их устойчивость против прогрессирующего обрушения при локальных аварийных воздействиях. Устойчивость пространственных конструкций покрытий и перекрытий, здания и сооружения против прогрессирующего обрушения следует обеспечивать избыточной несущей способностью «ключевых» элементов, конструктивными мерами и применением материалов, обеспечивающих развитие в конструктивных элементах и их соединениях пластических деформаций.

Расчет на прогрессирующее обрушение следует производить на действие нормативных нагрузок, с использованием нормативных значений прочностных характеристик арматуры и бетона, и с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности.

Большепролетные пространственные конструкции зданий и сооружений следует рассчитывать на усилия от изменения температуры, а в случае необходимости — и от усадки бетона, возникающих в конструкциях вследствие заделки их в основание, а также вследствие взаимодействия наружных и внутренних конструкций, имеющих разные температурные и усадочные деформации.

## ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ И ИЗДЕЛИЯМ

Для железобетонных тонкостенных пространственных конструкций следует применять бетоны и арматуру, предусмотренные СП 63.13330.

Для несущих тонкостенных пространственных конструкций рекомендуется применять тяжелые, в том числе мелкозернистые, бетоны классов по прочности на сжатие от В20 до В60, или легкие бетоны по прочности на сжатие не ниже В 12,5 (ГОСТ 25820).

Легкие бетоны классов по прочности на сжатие В7,5 и В10 допускается применять в совмещенных пространственных конструкциях покрытий (ГОСТ 25820).

Поризованные и крупнопористые бетоны в несущих железобетонных пространственных конструкциях допускается использовать при специальном технико-экономическом обосновании.

В качестве предварительно напряженной арматуры растянутых бортовых элементов большепролетных пространственных конструкций рекомендуется предусматривать канатную проволочную арматуру или пучки из таких канатов, защищенные от коррозии до замоноличивания оцинковкой или другим способом, допускаемым СП 28.13330.

Класс по прочности на сжатие тяжелого мелкозернистого бетона, применяемого для омоноличивания несущих стыков, должен быть не ниже проектного класса по прочности на сжатие бетона стыкуемых элементов.

При омоноличивании конструктивных стыков класс по прочности на сжатие тяжелого бетона или бетона на пористых заполнителях должен быть не ниже В10.

Для пространственных конструкций покрытий, эксплуатируемых без наружной гидроизоляции, рекомендуется применять тяжелые бетоны марки по водонепроницаемости не ниже W8. В остальных случаях для конструкций, подверженных атмосферным воздействиям при расчетной отрицательной температуре наружного воздуха выше минус 40°C, марку бетона по водонепроницаемости не нормируют.

Марку бетона по морозостойкости следует назначать в зависимости от требований, предъявляемых к конструкциям, режима их эксплуатации и условий окружающей среды.

Для конструкций, подвергаемых атмосферным воздействиям окружающей среды при расчетной отрицательной температуре наружного воздуха в холодный период от минус 5°C до минус 40°C, марку бетона по морозостойкости следует принимать не ниже F75, а при расчетной температуре наружного воздуха выше минус 5°C марку бетона по морозостойкости не нормируют.

В остальных случаях требуемые марки бетона по морозостойкости устанавливают в зависимости от назначения конструкций и условий окружающей среды (СНиП 23-01).

Значения начального модуля упругости бетона при сжатии и растяжении, а также значения модуля сдвига бетона следует принимать в соответствии с указаниями СП 63.13330.

При продолжительном действии нагрузки значения модуля деформаций бетона определяют с учетом ползучести по формуле (6.3) СП 63.13330.

При непродолжительном действии нагрузки значение модуля деформаций бетона определяют умножением значения его начального модуля упругости  $E_b$  на коэффициент 0,85.