

В.И. Тур



КУПОЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ:
формообразование, расчет,
конструирование, повышение
эффективности



УДК 69(075)
ББК 38.5 я 7
Т 86

Рецензенты:

кафедра строительных конструкций ПГУАС
(зав. каф., заслуженный деятель науки РФ, член-корреспондент РААСН,
д.т.н., профессор *Т.И. Баранова*);
зав. каф. архитектуры МГСУ, проф., канд. техн. наук, *А.К. Саловьев*

Тур В.И.

Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование,
повышение эффективности: Учебное пособие. - М.: Издательство АСВ,
2004. - 96 стр.

ISBN 5-93093-249-2

Представлен обзор развития купольных конструкций из различных ма-
териалов, вопросов формообразования, расчета и конструирования. Рассма-
тривается возможность повышения эффективности конструкций путем при-
менения предварительного напряжения с помощью высокопрочных затя-
жек. Приведен пример расчета сетчатого металлического купола.

Пособие предназначено для студентов старших курсов вузов, аспиран-
тов и инженерно-технических работников проектных и строительных орга-
низаций.

УДК 69(075)
ББК 38.5 я 7

ISBN 5-93093-249-2

© Издательство АСВ, 2004 г.
© В.И. Тур, 2004 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
1. КУПОЛА. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ	7
1.1. Общие сведения	7
1.2. Конструктивная схема купола	7
1.3. Основные типы куполов	8
1.4. Купола – оболочки	9
1.5. Ребристые купола	11
1.6. Ребристо-кольцевые купола	16
1.7. Ребристо-кольцевые купола со связями	18
1.8. Сетчатые купола	26
1.9. Пластинчатые купола	31
1.10. Контрольные вопросы к главе 1	33
2. ПРИНЦИПЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КУПОЛОВ	34
2.1. Общие сведения	34
2.2. Меридионально-кольцевая система разрезки	34
2.3. Звездчатая система	35
2.4. Система Кайвитта	36
2.5. Система "Ромб-1"	37
2.6. Системы, основанные на применении многогранников, вписанных в сферу	37
2.7. Схема геометрического членения сферы по системе "Р" ...	39
2.8. Контрольные вопросы к главе 2	44
3. УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КУПОЛОВ	45
3.1. Принципы конструирования узлов куполов	45
3.2. Схемы нижних опорных колец куполов	46
3.3. Узлы ребристо-кольцевых куполов	49
3.4. Узлы сетчатых куполов	51
3.5. Контрольные вопросы к главе 3	54
4. РАСЧЕТ КУПОЛОВ	55
4.1. Ребристые купола	55
4.2. Ребристо - кольцевые купола и ребристо-кольцевые со связями	59
4.3. Сетчатые и пластинчатые купола	60
4.4. Расчет купола по безмоментной теории, как сплошной осесимметричной оболочки	62
4.5. Определение усилий от собственного веса	63
4.6. Определение усилий от снеговой нагрузки	64

4.7. Определение крайних усилий в месте сопряжения купола с опорным кольцом	69
4.8. Расчет купола как дискретной стержневой системы	73
4.9. Контрольные вопросы к главе 4	78
5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КУПОЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ)	79
5.1. Способы создания предварительного напряжения в куполах	79
5.2. Особенности расчёта предварительно-напряженного сетчатого купола	84
5.3. Контрольные вопросы к главе 5	89
6. ПРИМЕР РАСЧЕТА СЕТЧАТОГО КУПОЛА	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	92
ПРЕДМЕТНО-АДРЕСНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	93

Развитие современного строительства возможно только на основе экономически эффективных, надежных, технологичных конструкций с применением прогрессивных направлений проектирования и строительства, обеспечивающих универсальность планировки и многофункциональность помещений, располагаемых в здании.

В условиях сурового российского климата строительные площадки должны стать монтажными площадками, где производится сборка подготовленных на заводе несущих и ограждающих конструкций. Только тогда наше строительство станет не сезонным, а круглогодичным.

Одним из направлений повышения эффективности строительного производства является широкое применение легких пространственных конструкций, в том числе сетчатых оболочек и куполов. В настоящее время в мире на объектах гражданского, промышленного и сельскохозяйственного назначения построено более пяти тысяч современных пространственных систем разных конструкций и размеров. Эффективность применения этих конструкций по сравнению с традиционными стоечно-балочными системами обусловлена снижением материалоемкости несущего каркаса, снижением трудоемкости изготовления и монтажа, возможностью перекрывать как малые, так и большие пролеты, создавать здания универсального назначения высокой архитектурной выразительности. Эти конструкции преимущественно изготавливаются на заводе, компактны при транспортировке, легко собираются, диапазон применяемых материалов широк: это прежде всего металл, а также и бетон, железобетон, дерево, пластмассы.

Особое место среди представленных пространственных конструкций занимают купола. Это одни из наиболее древних пространственных систем покрытия.

Но и сегодня купола благодаря своей конструктивной форме перекрывают рекордные (200-250 м) пролеты, и они наиболее экономичны по сравнению с любыми другими жесткими конструкциями, именно в диапазоне больших пролетов.

Конструктивные возможности куполов и оболочек далеко не исчерпаны и представляется возможным повысить эффективность этих конструкций искусственным регулированием усилий и деформаций, то есть предварительным напряжением. Предварительным напряжением возможно создать разгружающее напряженное состояние и тем самым расширить область упругой работы, уменьшить расчетные усилия и, в конечном счете, снизить массу и стоимость оболочки. Возможно регулирование усилий и деформаций в процессе эксплуатации конструкции, в этом случае оболочку можно рассматривать как механизм и трансформируемую пространственную структуру. Конечно, при этом возникает целый комплекс вопросов и проблем, связанных с устойчивостью системы при различных видах нагрузе-

ний и условиях эксплуатации, но при современном уровне развития теоретических исследований, вычислительной техники и программном обеспечении - это вполне разрешимые задачи.

Настоящее пособие предназначено для студентов специальностей 290100, 290200, 290300, 291400 при изучении дисциплины "Металлические конструкции", "Конструкция гражданских и промышленных зданий", а также может быть полезным при формировании спецкурса по пространственным конструкциям для указанных специальностей, в курсовом и дипломном проектировании.

Инженерно-технические работники проектных и строительных организаций несомненно найдут в пособии полезную информацию.

Из методических соображений пособие скомпоновано таким образом, что изучение материала начинается с описания существующих типов конструкций куполов, далее излагаются принципы формирования поверхностей, конструкции узловых соединений куполов и затем основы расчета различных типов куполов и способы повышения их эффективности путем предварительного напряжения. В качестве приложения дан пример расчета сетчатого металлического купола.

При подготовке книги учтены замечания и рекомендации, высказанные при рецензировании профессорами Т.И. Барановой и А.К. Соловьевым, которым автор выражает глубокую благодарность.

1. КУПОЛА. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

1.1. Общие сведения

Значительное развитие в практике современного строительства получили купола. В настоящее время в мире построено более трех тысяч металлических стержневых оболочных систем разных конструкций и размеров, значительную часть из которых составляют купольные конструкции, которые среди пространственных жестких систем по расходу материала являются наиболее экономичными. Эффективность этих конструкций возрастает с увеличением пролета и не случайно, что большинство покрытий более 200 м являются купольными. Велики и композиционные возможности этих конструкций, что позволяет перекрывать здания универсального назначения, создавать прекрасные образцы архитектурного творчества.

Купольные конструкции известны с древних времен. Их применяли в Месопотамии, Сирии, Иране, Древнем Риме. Основным материалом при этом был камень. Наиболее известные древние купола имели пролет до 30-40 м, а толщину оболочки от 1/15-17 диаметра в основании до 1/30-40 в верхней части. И эти соотношения сохранялись вплоть до конца 19 века. С появлением железобетона и стали в строительстве ситуация резко изменилась - существенно стали расти пролеты, уменьшаться толщина оболочки.

В двадцатом веке значительный вклад в развитие купольных конструкций внесли: Ледерер, Маковский, Отто, Райт, Фуллер, Туполев М.С., Линицкий М.Е., Савельев В.А.

1.2. Конструктивная схема купола

Купола - распорные системы, имеющие в своем составе, как правило, три основных конструктивных элемента: нижнее опорное кольцо, оболочку, верхнее опорное кольцо (рис. 1.1).

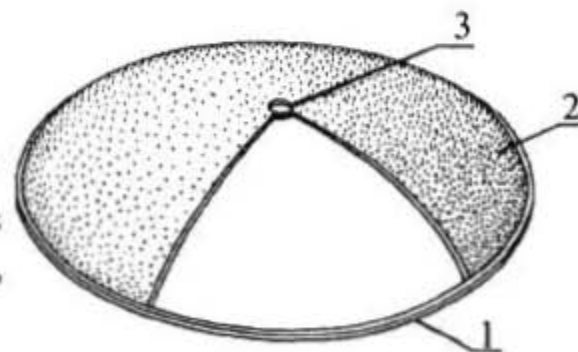


Рис. 1.1. Конструктивная схема купола:

- 1 - нижнее опорное кольцо;
- 2 - оболочка;
- 3 - верхнее опорное кольцо

Распор купола воспринимается нижним опорным кольцом, вследствие чего в нем могут возникать растягивающие усилия, изгибающие и крутящие

моменты. Опорное кольцо проектируется в плане криволинейным в виде окружности, эллипса или в виде многогранника с жестким или шарнирным соединением в углах. Нижнее опорное кольцо укладывается на нижележащие опоры свободно и должно быть закреплено от горизонтального смещения. Вследствие особенностей напряженного состояния нижнее опорное кольцо выполняют преимущественно из металла или железобетона.

Оболочка купола может быть гладкой, состоять из плиты с ребрами расположенными в меридиональном и кольцевых направлениях, или собираться из стержневых элементов с последующим покрытием разными типами прогонов и плит.

Верхнее опорное кольцо испытывает усилие сжатия. Пространство внутри верхнего опорного кольца часто используется для размещения светового или светоаэрационного фонаря. В гладких куполах-оболочках верхнее опорное кольцо может отсутствовать.

1.3. Основные типы куполов

Купольные конструкции обладают большим разнообразием объемно-пространственных форм, конструктивных решений, технологий возведения. Это позволяет применять их в объектах гражданского, промышленного и сельскохозяйственного назначения, а так же в различных климатических зонах, в том числе и в условиях сурового климата.

Рассмотрим основные типы куполов по различным признакам [4]:

а) по конструкции: ребристые, ребристо-кольцевые, ребристо-кольцевые со связями, сетчатые, пластинчатые, купола-оболочки (сплошные);

б) по форме (рис. 1.2): сферические, эллиптические, стрельчатые, зонтичные и другой формы;

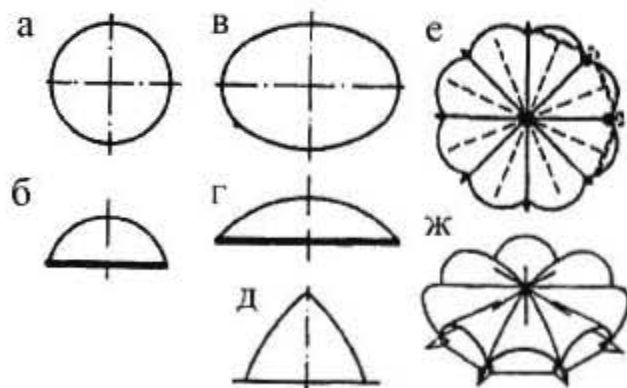


Рис. 1.2. Формы куполов:

а - план сферического купола; б - поперечный разрез сферического купола; в - план эллиптического купола; г - поперечный разрез эллиптического купола; д - стрельчатый купол; е - план зонтичного купола; ж - вид зонтичного купола

в) по стреле подъема (рис. 1.3): подъемистые (высокие) купола, при высоте подъема $1/2 - 1/5$ диаметра и пологие, при высоте подъема менее $1/5$ диаметра;

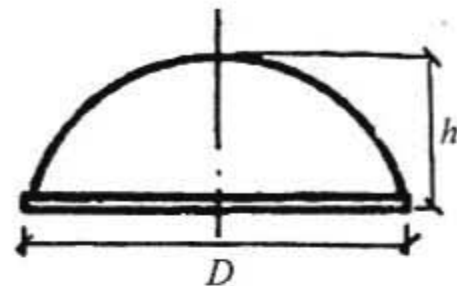


Рис. 1.3. Геометрические параметры куполов:

D - диаметр; h - высота подъема

г) по условиям работы: с элементами предварительного напряжения, ненапрягаемые;

д) по материалам: металлические (сталь, алюминиевые сплавы), железобетонные, бетонные, из каменных материалов, дерево, пластмасс, тканевых материалов (воздухоопорные);

е) по технологии возведения: монолитные, сборно-монолитные, сборные.

Правильное определение технических характеристик купола важно при выборе архитектурного решения и технико-экономическом обосновании применяемого решения.

1.4. Купола – оболочки

Поверхность куполов – оболочек (в ряде литературных источников такие купола называют сплошными или гладкими) образуется в результате вращения вокруг вертикальной оси меридиональной образующей в виде дуги круга, эллипса, параболы (рис. 1.1). Возможны комбинации из этих кривых, тогда образуются стрельчатые, зонтичные и другой формы купола. Материалом для этих куполов обычно служит бетон, железобетон (фибробетон), бетон с применением стеклопластиковой арматуры. Купола – оболочки преимущественно возводят по монолитной и сборно-монолитной технологиям. Весьма перспективна технология возведения монолитной оболочки на пневматической опалубке, поднимающей от земли всю конструкцию: арматуру, бетон в несхватившемся состоянии и, если требуется, тепло и гидроизоляционные материалы [4].

Пневматическая опалубка представляет собой мембрану из армированной синтетической ткани. Известны варианты применения в качестве пневмоопалубки прорезиненных хлопчатобумажных тканей. Мембрана прикрепляется к нижнему опорному кольцу, обеспечивая при этом механическое закрепление и герметичность опалубки. На мембрану укладывается арматура и жидкий бетон. Арматура при этом закрепляется одним концом к нижнему опорному кольцу. При подаче сжатого воздуха под мембрану она

вспучивается, и арматура, расположенная в спиралях, занимает проектное положение, бетон растекается по поверхности мембраны и схватывается.

Известны технологии, когда пневматическая опалубка предварительно накачивается сжатым воздухом до проектного положения, а затем на опалубке крепят арматурные сетки и наносят методом торкретирования бетон.

Использование пневмоопалубки позволяет снизить стоимость и сроки возведения куполов. Тканевая оболочка легче и дешевле деревянной или металлической опалубки и ее легко транспортировать. Сроки возведения железобетонного купола диаметром до 30 м на пневмоопалубке составляют 7-10 дней, что во много раз меньше при применении традиционной опалубки. Характерным примером купола-оболочки является зонтичный купол на рис. 1.4, диаметром 31 м [4]. Главной особенностью этой конструкции является то, что для ее возведения применен песчаный бетон, армированный щелочестойким рубленым стекловолокном. Такой бетон по сравнению с обычным обладает более высокой прочностью на растяжение и изгиб, лучше сопротивляется удару, разрушается при более высоком относительном удлинении. Благодаря этому удалось возвести купол без стальной арматуры и придать оболочке исключительно малую толщину; всего 1 см. Это самая тонкая бетонная оболочка и первый случай использования бетона, армированного стекловолокном, в несущих конструкциях. Купол имеет меридиональную разрезку и собран из восьми одинаковых элементов — волн, представляющих собой форму гиперболического параболоида. В меридиональном направлении выпуклость такого элемента направлена внутрь зонтичного купола (вниз), в кольцевом — наружу (вверх). Длина элемента составляет 15,5 м, ширина — 10 м, высота — 5 м, масса — 2,5 т. Элементы соединены впритык и оперты на восемь железобетонных контрфорсов, расположенных по окружности диаметром 26 м так, что каждый элемент образует консольный козырек вылетом 2,5 м. Контрфорсы опираются на отдельные железобетонные фундаменты, соединенные между собой по контуру сооружения предварительно напряженными балками. Для изготовления элементов была применена специальная форма из досок шириной 10 см, расположенных в двух перекрестных направлениях вдоль прямолинейных образующих гиперболического параболоида. На эту форму с помощью бетонного насоса подавалась песчано-бетонная смесь с водоцементным отношением 0,45. Эта смесь перед соприкосновением с поверхностью формы наполнялась рубленым стекловолокном, подаваемым сжатым воздухом по другому шлангу. Смесь подавали до тех пор, пока толщина оболочки не достигла проектного размера — 1 см. На красных участках элемента толщина увеличивалась до 4 см для возможности закладки стыковой арматуры. Во избежание растрескивания готовый элемент покрывался увлажненными матами из пенопласта, а на следующий день маты сменялись предохранительной коркой из специального пластика, чем замедлялось испарение влаги из материала оболочки. Через 40 часов, когда бетон набирал необходимую прочность, элемент

снимали с формы с помощью автокрана со специальной траверсой и вакуумным подъемным устройством и переносили непосредственно на монтажный кондуктор купола. Здесь осуществлялось стыкование элементов купола между собой и крепление их к опорным контрфорсам. Стык элементов выполнен с помощью арматуры из проволок диаметром 4 мм, расположенных с шагом 7,5 см близ опоры и 15 см — на других участках. Эти проволоки соединены между собой двумя арматурными стержнями диаметром 10 мм, идущими вдоль стыка, и весь стык замоноличен песчаным бетоном с рубленым стекловолокном. В месте каждого стыка воли образована ендова, по которой вода стекает с покрытия.

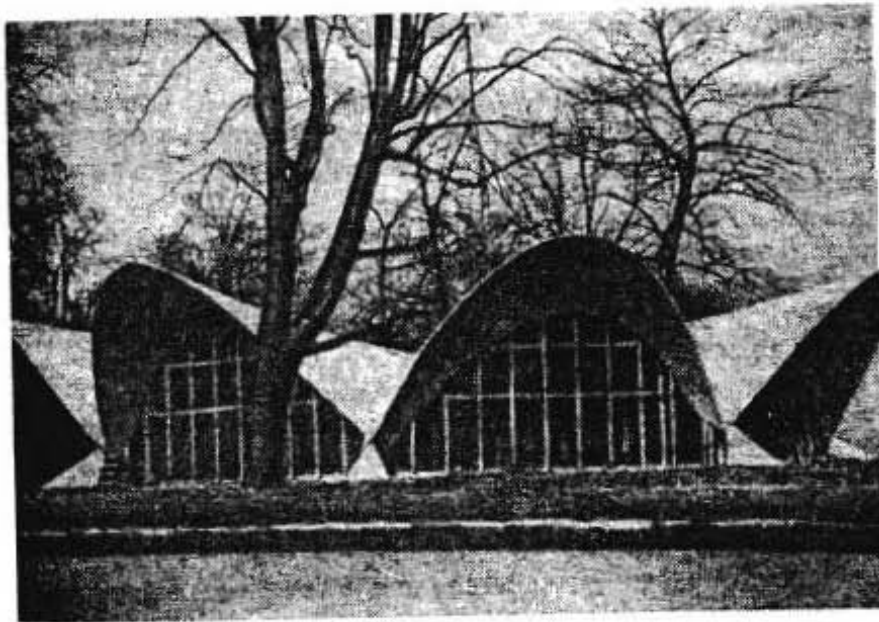


Рис. 1.4. Зонтичный купол диаметром 31 м

Масса купола, включая замоноличенные стыки, составляет 25 т или 35 кг на 1 м² перекрываемой площади.

1.5. Ребристые купола

Ребристые купола (рис. 1.5) состоят из отдельных плоских ребер, поставленных в радиальном направлении; верхние пояса ребер образуют поверхность купола. При прямолинейных ребрах образуются пирамидальные или конические купола; в вершине купола радиально расположенные ребра примыкают к верхнему кольцу. Иногда, при частом расположении ребер или при устройстве на вершине купола фонаря, верхнее опорное кольцо получается значительных размеров; тогда в целях повышения жесткости и устой-

чивости оно скрепляется внутренними ребрами по крайней мере в двух диаметральных плоскостях [3].

Ребристые купола являются распорной системой. Распор может быть воспринят конструкцией фундаментов, стен или специальным опорным кольцом. Опорное кольцо проектируется в плане изогнутым по окружности или в виде многогранника с жестким или шарнирным сопряжением в углах. При достаточно частом расположении ребер возможно устройство круглого кольца. При редко поставленных ребрах опорное кольцо должно проектироваться многоугольным во избежание его работы на изгиб и кручение. На опоры кольцо укладывается свободно и должно быть закреплено от горизонтального смещения. Наиболее распространено жесткое многоугольное кольцо с опорами в углах, имеющими подвижность в радиальном направлении. Между ребрами обычно укладываются специальные настилы или создается мембранное покрытие. Мембранное или панельное покрытия обеспечивают общую устойчивость ребер из их плоскости, уменьшая расчетную длину ребер. Возможно устройство кровли по кольцевым прогонам между ребрами.

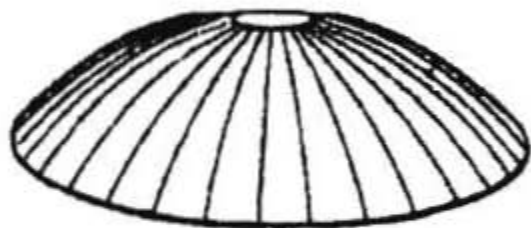


Рис. 1.5. Ребристый купол

Примерами применения ребристых куполов в конструкциях зданий являются следующие объекты:

Спортивный комплекс в г. Атланта (США) (рис. 1.6) [1]

Основной несущей конструкцией купольного покрытия служат 32 стальные полуарки эллиптического очертания, установленные на уровне земли и опертые на верхний обрез фундаментов. В точках опирания арок устроены шарниры. Верхние концы полуарок сопрягаются над центром здания при помощи стального кольца диаметром 11,6 м. Диаметр купола составляет 82,3 м, стрела подъема 16 м. Полуарки между собой связаны фермочками, которые устанавливались и закреплялись болтами немедленно после установки каждой полуарки. Конструкции полуарок сварные, двутаврового сечения с ребрами жесткости таврового сечения. Очертание осевой линии арок описано по эллипсу, однако их сечение на всем протяжении переменное. Расстояние до верхней и нижней полок от осевой линии также переменное. Сечение ребер у фундамента 91 см, у полудужья - 137 см и у центрального верхнего кольца - 91 см. Центральное кольцо купола имеет также двутавровое сечение. Над центральным кольцом возвышается купол анало-

гичной конструкции, под которым расположены вентиляторы вытяжной системы и прожекторы. После окончания монтажа радиальных ребер и фермочек жесткости к последним были приварены элементы обрешетки таврового сечения с расстоянием между осями 840 мм, по которой уложены древесноволокнистые плиты размером 810x2420 мм. Покрытие выполнено из белой кровельной стали со стоячим фальцем. Каждая полуарка изготовлена на заводе из двух частей, которые соединялись на строительной площадке посредством сварки и затем устанавливались на место. Подъем и установка полуарок производились двумя кранами. Центральное кольцо опиралось на специально возведенную для него монтажную стойку.



Рис. 1.6. Спортивный зал в Атланта (США), 1957 год

Покрытие цирка в Москве (рис. 1.7) [1]

Основной несущей конструкцией покрытия цирка служит стальной купол с сильно развитыми консолями. Купол выполнен из системы наклонно расположенных плоских ферм, образующих ребра складчатой формы. Диаметр купола по осям колонн - 65 м. Вылет консолей - 17 м. Опорами купола служат 24 стальные трубчатые колонны диаметром 529 мм, заполненные бетоном. Опирание купола на колонны и колонн на фундаменты - шарнирное. Шаг колонн - 8,5 м. Основные элементы купола - плоские (наклонные) решетчатые фермы с поясами из одиночных уголков, нижнее опорное кольцо диаметром 65 м и верхнее опорное кольцо диаметром 8,3 м. В связи с наличием консолей вылетом 17 м и большой временной нагрузкой (400 кг/м^2) в качестве расчетной схемы купола принята 2-шарнирная арка. Расход стали на несущие конструкции купола составил 1040 т. Покрытие купола выполнено сборным из алюминиевых утепленных панелей с расходом алюминия в $11,5 \text{ кг/м}^2$. С применением алюминия решены также витражи и подшивные потолки. При этом общий расход алюминия составил 150 т.

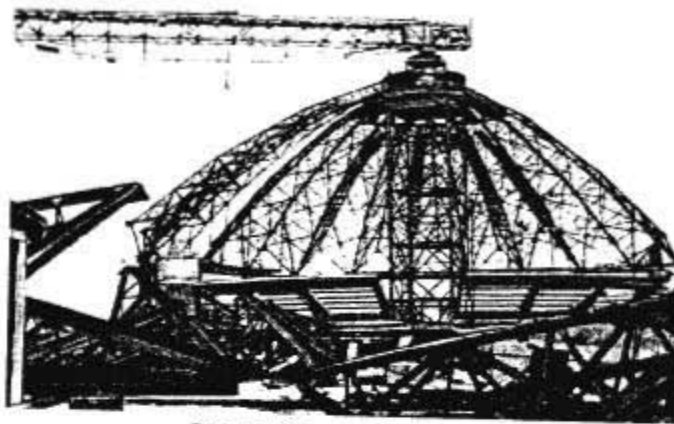


Рис. 1.7. Цирк в Москве

Купол над зданием цирка в Екатеринбурге (рис. 1.8), представляет собой ребристую конструкцию без покрытия диаметром 62 м, к верхнему кольцу которой на тросах подвешен конусный купол покрытия диаметром 59 м, который и является покрытием арены. Ребра несущего купола выполнены из стали и обетонированы.

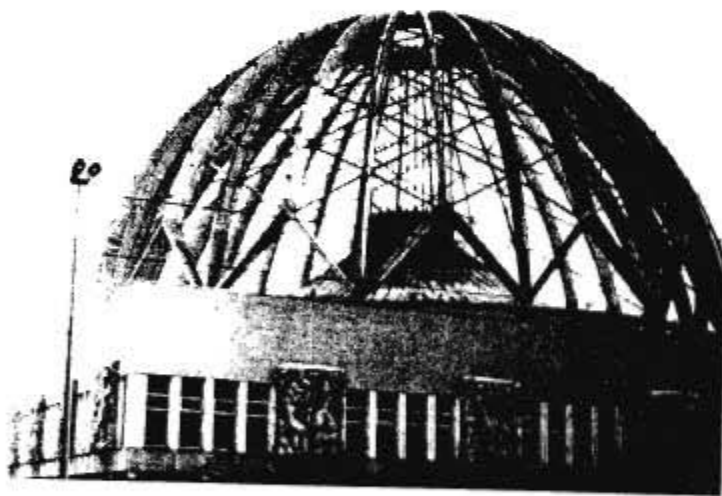


Рис. 1.8. Цирк в Екатеринбурге

Купол над зданием рынка в г. Волоколамске (рис. 1.9), выполнен из древесины, диаметр купола 30 м, высота 14,5 м. Несущий каркас образован двенадцатью стреловидными полуарками сечением 130x670 мм и двенадцатью витражными и входными трехшарнирными арками сечением 130x570 мм и высотой 7 м, а также прогонами, расположенными с шагом

1,5 м. На высоте 7 м устроена затяжка из напрягаемой арматурной стали. Верхнее металлическое опорное кольцо выполнено из трубы диаметром 1,02 м; нижний опорный пояс железобетонный.

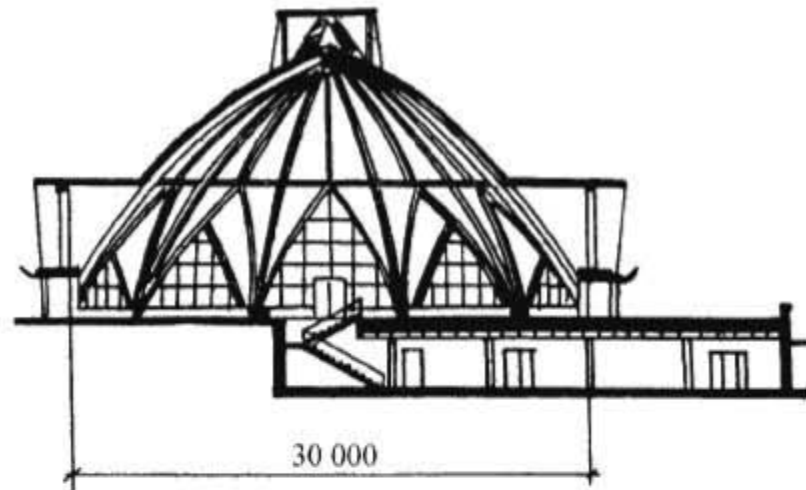


Рис. 1.9. Купол над зданием рынка в г. Волоколамске

Купол над спортивным центром в г. Жилина (Чехословакия) (рис. 1.10) выполнен из древесины, диаметр купола 105 м, высота 18,2 м. Купол состоит из 44 ребер, расположенных с шагом 7,5 м, ребра имеют переменное сечение (800 мм на опорах и 1900 мм в средней части), ширина сечения 230 мм. Полуарки сверху шарнирно опираются на металлическое опорное кольцо диаметром 4 м, а внизу - на железобетонное кольцо.

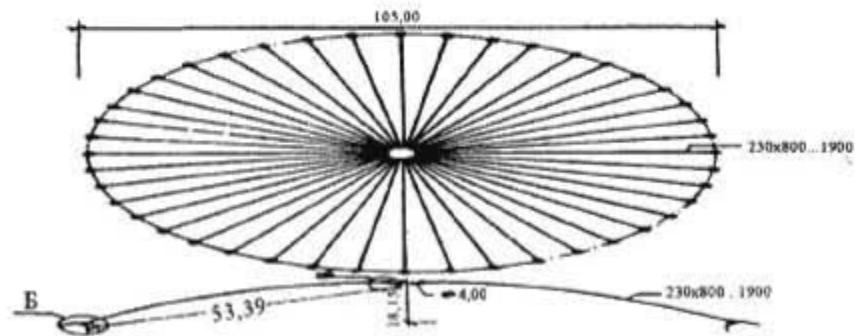


Рис. 1.10. Схема несущего каркаса купола над спортивным центром в г. Жилина (Чехословакия)

1.6. Ребристо-кольцевые купола

Конструктивная схема ребристо-кольцевого купола представлена на рис. 1.11 [3]

Устройство и включение в работу конструкции кольцевых прогонов приводит к созданию ребристо-кольцевой схемы. Прогоны могут быть использованы как затяжки купола. В этом случае кольца не только работают на местный изгиб от нагрузок кровли, но и воспринимают нормальные усилия от ребер купола, а в случае жесткого сопряжения колец с ребрами - и изгибающие моменты. Однако вследствие малой жесткости колец и ребер в плоскостях, касательных к поверхности купола, влиянием жесткости узлов можно пренебречь и считать, что кольца примыкают к ребрам шарнирно.



Рис. 1.11. Ребристо-кольцевой купол

Примерами применения ребристо-кольцевых куполов в конструкциях зданий являются следующие объекты:

Коллизей в г. Шарлотта (США) (рис. 1.12) [1]

Конструктивно купол представляет собой радиально-кольцевую систему. Основной несущий каркас купола составляют 48 радиально расположенных ребер длиной 47 м, сопряженных между собой восемью кольцевыми прогонами. Все элементы системы выполнены из широкополочных двутавров. Каждое из ребер сварено по длине из семи прямых отрезков по 6,8 м длиной. Ребра и кольца раскреплены системой крестовых связей из круглой стали диаметром 1,5 и 2 дюйма. В зените купола над ареной устроен световой проем, опертый на кольцевую ферму диаметром 14 м и высотой 62 см.

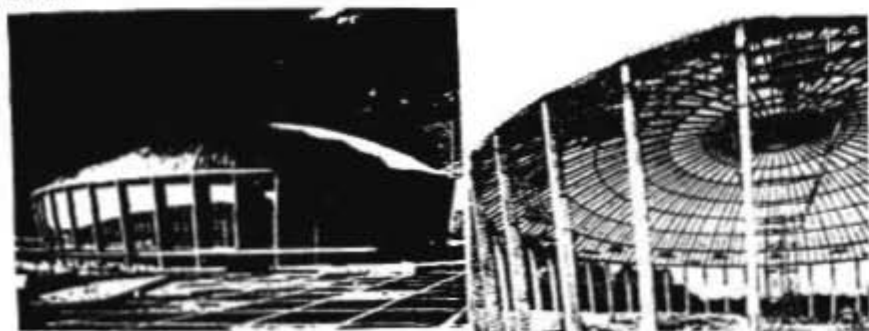


Рис. 1.12. Коллизей в г. Шарлотта (США)

Стадион в г. Сан-Паулу (Бразилия) (рис. 1.13) [1]

Конструкция купольного покрытия выполнена в металле в виде стальных решетчатых полуарок эллиптического очертания, опирающихся вверх на сжатое металлическое решетчатое кольцо. Нижние концы полуарок опираются шарнирно на оголовники вертикальных опор. Количество меридиональных ребер полуарок соответствует количеству вертикальных стоек, несущих купол. Распор купола воспринимается железобетонным кольцом со стойками. По верхнему контуру меридиональных полуарок в кольцевых направлениях укладываются горизонтальные балочки, по которым устраивается обрешетка и кровля с утеплителем. Купол имеет форму поверхности эллипсоида вращения с диаметром в основании 80 м.

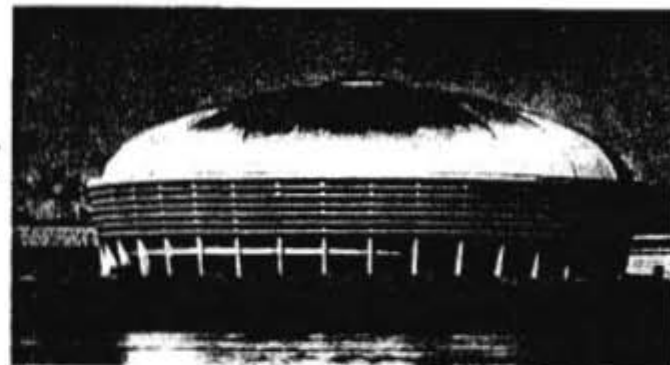


Рис. 1.13. Стадион в Сан-Паулу (Бразилия), 1958 г.

Купол рынка в г. Бресте (Белоруссия) (рис. 1.14) выполнен из древесины. Диаметр купола составляет 60 м, высота - 12 м, 24 меридиональных ребра имеют сечение 160x800 мм и опираются на железобетонное нижнее опорное кольцо. Верхнее опорное кольцо многоугольное и выполнено из клееной древесины. Кольца размещаются с шагом 1,1 м и служат для крепления дощатого настила.

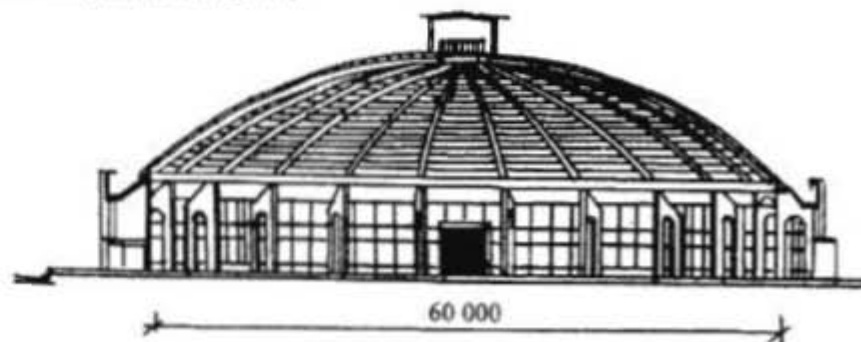


Рис. 1.14. Купол рынка в г. Бресте (Белоруссия)

1.7. Ребристо-кольцевые купола со связями

Ребристо-кольцевые купола со связями (рис. 1.15) [3] представляют собой дальнейшее увеличение связности системы путем введения в конструкцию раскосов между ребрами.

Примерами ребристо-кольцевых куполов со связями являются следующие конструкции.

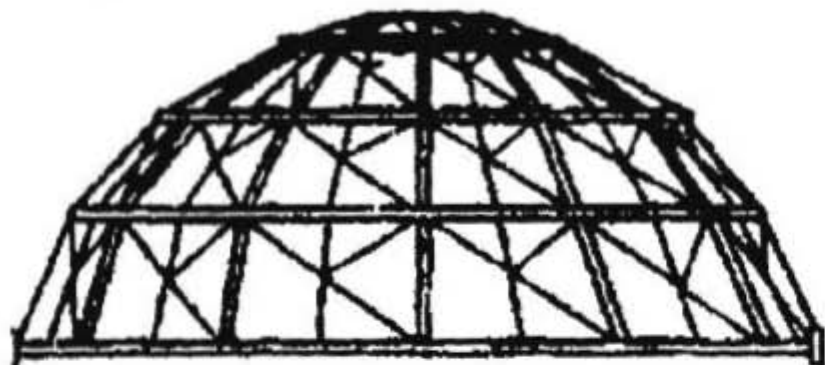


Рис. 1.15. Купол ребристо-кольцевой со связями

Покрытие над складом в Новокузнецке (рис. 1.16) [4] имеет сферическую форму и выполнено в виде ребристо-кольцевого купола со связями, соединяющими попарно ребра купола таким образом, что связи размещаются через сектор. Здание в плане имеет круглую форму; диаметр купола - 42 м, стрела подъема - 7 м. Ребра купола внизу опираются на стенку стального цилиндра через опорное кольцо, а в ключе - на центральное фонарное кольцо диаметром около 9 м.

Помимо нижнего опорного и верхнего колец, имеются четыре промежуточных кольца. Тридцать ребер купола двутаврового сечения изготавливаются из трех сварных листов. Опорное кольцо представляет собой горизонтально расположенную двутавровую сварную балку из трех листов. Промежуточные кольца из швеллера с уголком.

Покрытие актового зала в г. Ульяновске (рис. 1.17) представляет собой купол диаметром 36 м, диаметром верхнего кольца 3 м, высотой подъема 5,93 м. Каркас купола состоит из 16 ребер (двутавр с параллельными гранями полок № 40Б1) и шести ярусов промежуточных колец. Треугольные связи между ребрами расположены через сектор. Купол опирается на «перевернутую» железобетонную чашу конической формы, внутри которой размещается киноконцертный зал вместимостью 1000 зрителей.

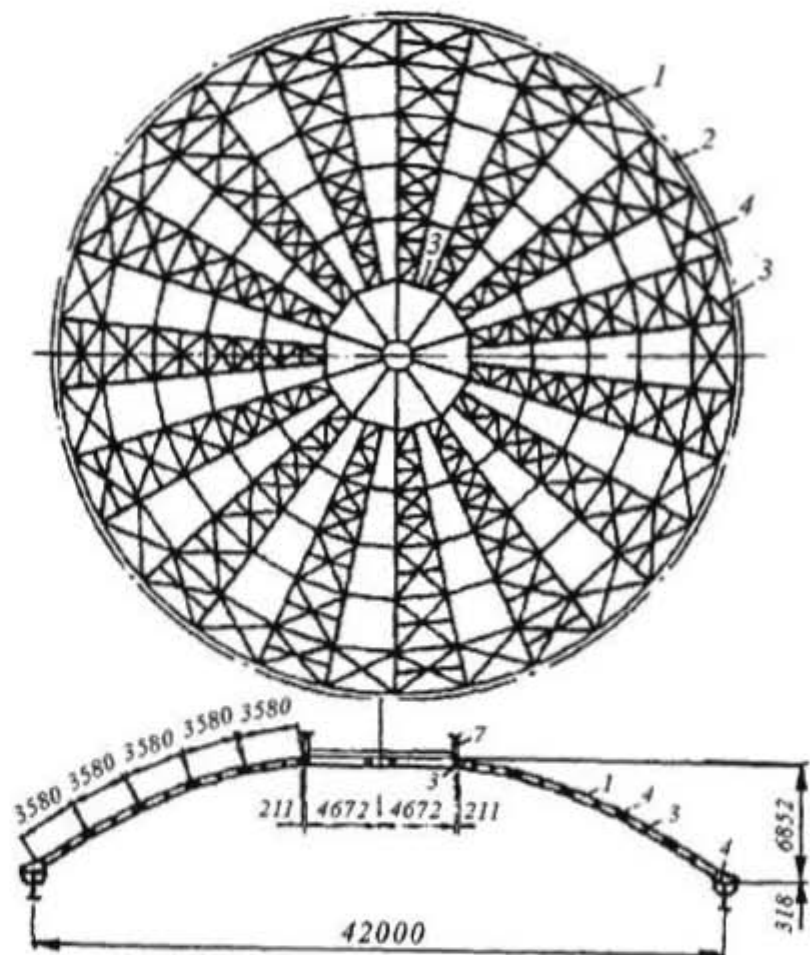


Рис. 1.16. Купол над резервным складом глинозема Новокузнецкого алюминиевого завода

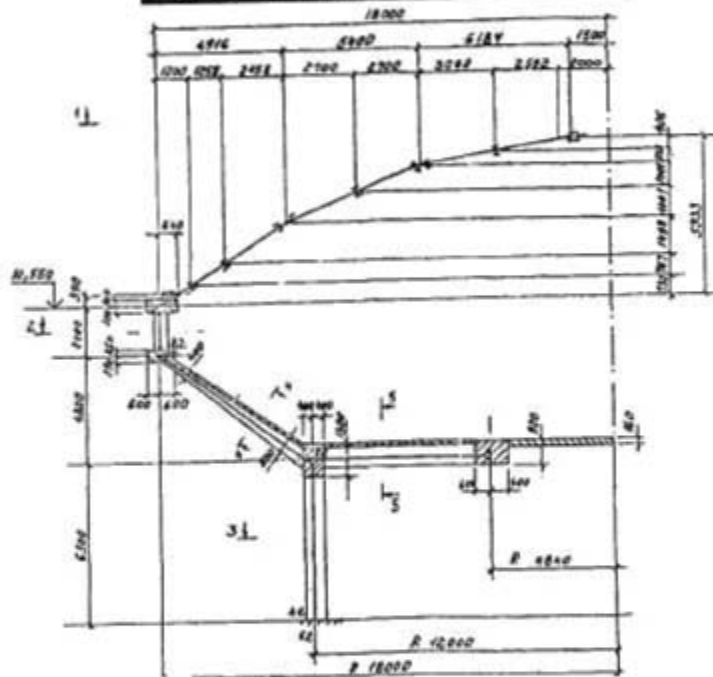
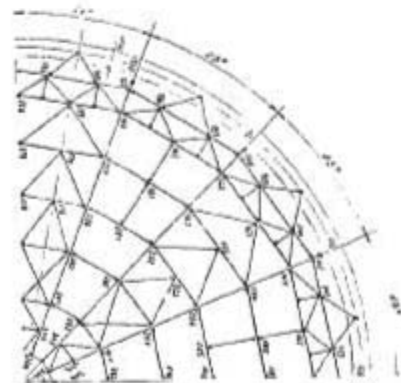


Рис. 1.17. Покрытие
актового зала
в г. Ульяновске
а - общий вид купола;
б - разрез по актовому залу;
в - схема плана несущих конструкций купола



Интересна история создания этого купола. Первоначальный проект купола, выполненный в 1974 году, представлял собой ребристую конструкцию из восьми двухшарнирных двухпоясных арок с треугольной решеткой (рис. 1.18). Нижний опорный контур купола железобетонный, верхний - стальной в виде шестнадцатигранного решетчатого барабана высотой 1360 мм, диаметром 2400 мм, пояса арок из спаренных равнобоких уголков 100x8 мм, решетка из спаренных равнобоких уголков 63x5 мм. Каждая арка массой 2508 кг состояла из 224 элементов, которые между собой крепились на сварке.

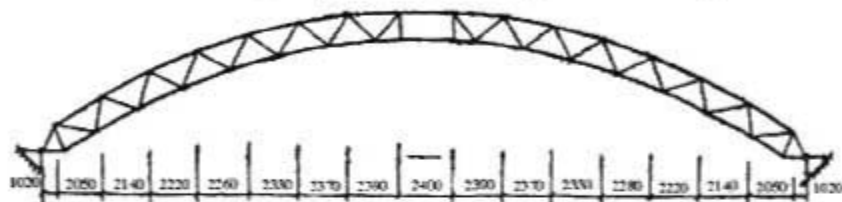
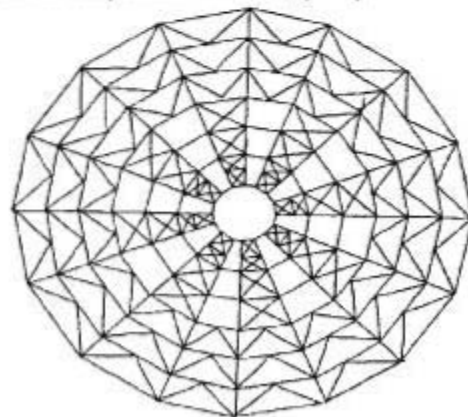


Рис. 1.18. Геометрическая схема арки ребристого купола г. Ульяновске (первоначальный проект)

Таким образом, расход металла на основные несущие конструкции покрытия был равен 20064 кг или 19,7 кг на 1 м² перекрываемой площади. С учетом верхнего опорного кольца, связей, прогонов, профилированного стального настила, масса покрытия составляла 48 кг на 1 м² площади зала.

Многоэлементность арок, большая трудоемкость их изготовления явились основной из причин последующей переработки проекта. В результате был разработан стальной ребристо-кольцевой купол с крестовыми связями через сектор, высотой подъема 6 м (рис. 1.19). Ребра купола выполнены в виде однопоясных арок ломаного очертания переменного сечения по длине. От верхнего кольца на четверть пролета идут два швеллера № 14, спаренных в виде двутавра, далее до нижнего опорного кольца сечения ребра состоит из двух швеллеров № 20, так же спаренных в виде двутавра.

Рис. 1.19. Геометрическая
схема ребристо-кольцевого
купола в г. Ульяновске
(второй вариант)



Кольцевые элементы состоят из двутавров № 30Б1 и № 20Б1, связи выполнены из спаренных уголков 70x5; 90x7. Марка стали для конструктивных элементов Вст3псб. Узловые соединения на болтах нормальной точности с последующей обваркой узлов. Расход стали на конструкцию купола в данном варианте составил 61,4 кг на 1 м² перекрываемой площади. В 1989 г. был выполнен монтаж несущих конструкций каркаса купола. Монтаж велся в такой последовательности. Конструктивные элементы ребер, колец и связей поступали с завода на строительную площадку рассыпью, здесь же производилась укрупнительная сборка, которая заключалась в том, что на уровне земли собирались монтажные секции пролетом 16 м, состоящие из двух смежных ребер, между которыми устанавливались все необходимые по проекту кольцевые элементы, крестовые и треугольные связи. Затем секции башенным краном поднимались за четыре точки и крепились к нижнему железобетонному опорному кольцу и к верхнему стальному опорному кольцу диаметром 4 м, установленному на проектной отметке на центральной временной опоре. Таким образом смонтированы все сектора каркаса с крестовыми связями. После этого выполнялся монтаж остальных кольцевых элементов и связей. Далее предполагался демонтаж центральной временной опоры, монтаж стального профилированного настила покрытия, устройство кровли и подвесного потолка. Однако монтажные работы покрытия были остановлены ввиду возникших значительных искажений формы поверхности каркаса купола, отмечаемых визуально, и непредвиденного подъема верхнего опорного кольца над центральной временной опорой на 190...230 мм. Анализ проекта и обследование возведенной конструкции, выявили ряд проектных недоработок, а также значительные нарушения технологии сборки и монтажа, отличия собранного каркаса по форме и конструкции от проектного решения.

Проектные недоработки. Для стального купола применено железобетонное нижнее опорное кольцо. Это решение неконструктивно, так как опорное кольцо работает исключительно на растягивающие усилия и использование железобетона для таких условий работы нецелесообразно. Опорное кольцо по проекту опирается на короткие (длиной 1,5 м) железобетонные стойки, жестко соединенные как с кольцом, так и с нижележащей конструкцией. Вследствие этого затрудняются свободные деформации опорного кольца, возможно его кручение. Нижележащей конструкцией, на которую опирается купол, является железобетонная монолитная чаша амфитеатра, приподнятая над уровнем земли на 4,9 м и опирающаяся на четыре спаренные монолитные колонны. Грунты основания просадочные, поэтому возможны неравномерные осадки фундамента. В такой ситуации целесообразно обеспечить свободное опирание опорного кольца на чашу амфитеатра, что позволит избежать значительных напряжений в кольце при неравномерных осадках фундаментов.

Верхнее опорное кольцо диаметром 4 м выполнено из двутавра № 14. Этого сечения достаточно для восприятия сжимающих продольных усилий, но мало для восприятия возможных при неравномерной нагрузке крутящих моментов. Конструктивные элементы ребер и колец скомпонованы из открытых сечений типа двутавр, швеллер. Применение закрытых трубчатых сечений круглого, квадратного и прямоугольного профиля позволило бы повысить жесткость и коррозионную стойкость элементов, упростить узловые соединения, сократить расход металла.

Сечения колец ориентированы нормально к горизонтальной поверхности, хотя целесообразно расположить их нормально к касательной плоскости в узле, что позволяет существенно упростить узлы опирания профнастила на кольца.

Узлы соединения ребер с кольцами сложны, предполагают обварку после монтажной сборки.

Крестовые и треугольные связи по массе составляют одну четверть от массы купола, в то же время многие из них малонапряжены и поставлены конструктивно, что говорит о несовершенстве конструктивной схемы. Более экономичной является конструктивная схема сетчатого купола.

Неоправданно мощные сечения колец. Сечения трех нижних колец практически равны по площади сечению ребер. Эту особенность можно понять, разобравшись в методике расчета и подбора сечений. При проведении проектировщиками статического расчета, который выполнялся на ЭВМ по программе «Лира», и подборе сечений принят ряд упрощений, целесообразность которых вызывает сомнение.

Статический расчет на ЭВМ велся с учетом приложения нагрузок в узлах, хотя фактически нагрузка является распределенной и передается от профнастила на элементы колец. Наличие изгибающего момента при такой передаче нагрузки учитывалось при подборе сечений элементов колец дополнительным расчетом каждого элемента как балки на двух опорах, работающей под распределенной нагрузкой. При этих условиях не учитываются совместная работа всех элементов в конструкции, а также особенности крепления колец к ребрам, что, вероятно, привело к завышению сечений элементов колец. В статическом расчете полагали, что соединение ребра с кольцами осуществляется прикрепленным шарниром при неразрезном ребре. Фактически этот узел упругоподатливый со значительной жесткостью за счет привариваемых верхней и нижней накладок, объединяющих элементы колец с ребрами.

Особенности возведения купола. Детальная геодезическая съемка всех узлов купола показала, что практически все узлы конструкции не находятся в проектном положении. При этом узлы верхних двух колец поднялись вверх до 230 мм, а узлы нижележащих колец опустились вниз на 200...330 мм, что привело к закручиванию и изгибу верхнего опорного кольца в плоскости и из плоскости. Кольцо приобрело сложную пространствен-

ную форму с отклонением от круговой формы до 100 мм. Перепад высотных отметок узлов одноименного кольца достигает 279 мм. Боковые отклонения узлов из плоскости ребра составляют до 57 мм. На поверхности купола образовались значительные выпуклости и вогнутости, отмечаемые визуально. Все опорные узлы выполнены со значительными отклонениями от проектного положения и конструкции с включением различных, не предусмотренных проектом деталей (шайб, пластин, отрезков арматуры и прокатных профилей, металлических клиньев), вследствие чего работа этих узлов под нагрузкой становится непрогнозируемой.

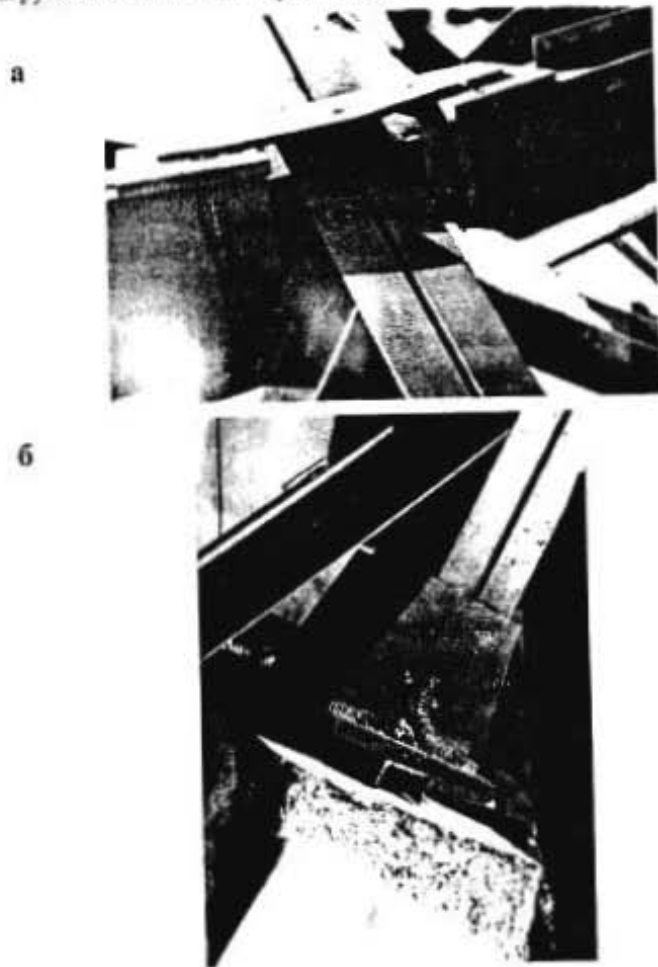


Рис. 1.20. Состояние узлов соединения ребристо-кольцевого купола со связями в г. Ульяновске (второй вариант): а – узел соединения ребра и кольца; б – опорный узел

Отверстия в опорных пластинах под анкерные болты прорезаны до 3...4 диаметров болта для обеспечения возможности рихтовки ребер. Столь же существенные отклонения от проекта характерны и для других узлов купола. В этих узлах отсутствует 34% монтажных болтов, постановка которых была невозможна из-за несовпадения отверстий. В конструкцию узлов включены пластины, накладки, не предусмотренные проектом. Сварные швы низкого качества с многочисленными непроварами.

Основные причины некачественного монтажа несущего каркаса купола следующие:

1. Отсутствие контроля геометрических параметров конструктивных элементов, поступающих с завода;
2. Отсутствие проекта производства монтажных работ;
3. Нарушение рекомендуемого проектной организацией порядка производства работ по сборке и монтажу конструктивных элементов.

В частности, сборка укрупненных секций осуществлялась без установки всех монтажных болтов. Обварка узлов проводилась до монтажа секций в проектное положение;

4. Отсутствие геодезического контроля при монтаже секций в проектное положение;
5. Применение в конструкции узлов, не предусмотренных проектом деталей и элементов.

Расчет с учетом искажений формы поверхности купола, определенных на основе геодезических измерений, выявил значительные отличия напряженного состояния конструкции в сравнении с расчетом по проектным координатам. При этом существенного увеличения прогибов не отмечено, хотя следует отметить, что расчет велся без учета геометрической нелинейности системы. Продольные усилия и изгибающие моменты увеличились в среднем в 3...4 раза, в отдельных элементах усилия возросли в 8...10 раз. Зафиксирована большая неравномерность распределения продольных усилий и изгибающих моментов в одноименных элементах ребер и колец, находящихся при одинаковых условиях нагружения, в ряде случаев даже с переменной знака усилия. Принятые в проекте сечения элементов оказались явно недостаточными для восприятия усилий, которые могут возникнуть в связи со значительными искажениями формы поверхности купола.

Проведенные исследования позволили утверждать о невозможности усиления конструкции купола и целесообразности его разборки.

Поэтому было принято решение о демонтаже возведенного каркаса купола.

Впоследствии был запроектирован и построен купол, представленный на рисунке 1.17, который эксплуатируется и поныне.

1.8. Сетчатые купола

Эволюция развития куполов шла по пути увеличения количества связей и конструктивных элементов или, другими словами, от концентрации материала в ребрах к равномерному распределению материала, а следовательно, и усилий по всей поверхности купола. Создание в конце 19 века металлических куполов Фенпла и Шведлера, скомпонованных на основе радиально-кольцевой системы, но со связями в каждой ячейке, ограниченной соседними ребрами и кольцами, ознаменовало появление нового конструктивного типа куполов, которые впоследствии были названы сетчатыми. Рассмотрим основные конструктивные решения этих куполов.

Купол Фенпла (рис. 1.21) [9] представляет собой статически определимую систему, причем только при нечетном числе сторон система геометрически неизменяема.

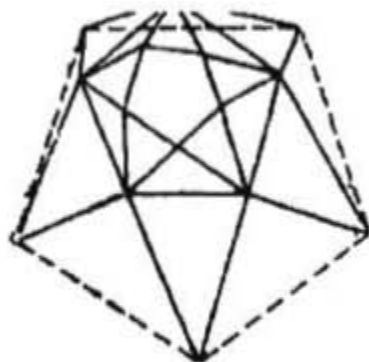


Рис. 1.21. Купол А. Фенпла

Купол Шведлера (рис.1.22) [9] представляет собой также статически определимую систему (при открытом кольце в вершине). Первый купол, диаметром 60 м был сооружен в г. Вена (Австрия) в 1874 году. В дальнейшем в течение десятков лет эта конструкция многократно тиражировалась, причем наибольшее распространение получили купола с крестовыми связями.

В дальнейшем развитие сетчатых куполов шло по пути разработки разнообразных способов членения (разрезки) поверхностей, прежде всего сферической, на конструктивные элементы (стержни или панели) для формирования несущего каркаса купола.

В основе разнообразия способов разрезки поверхности купола на конструктивные элементы лежат два направления: а) меридиональная разрезка поверхности вращения, б) применение правильных многогранников, вписанных в сферу. Купола с разрезкой на основе правильных многогранников в ряде литературных источников еще называют геодезическими или кристаллическими.

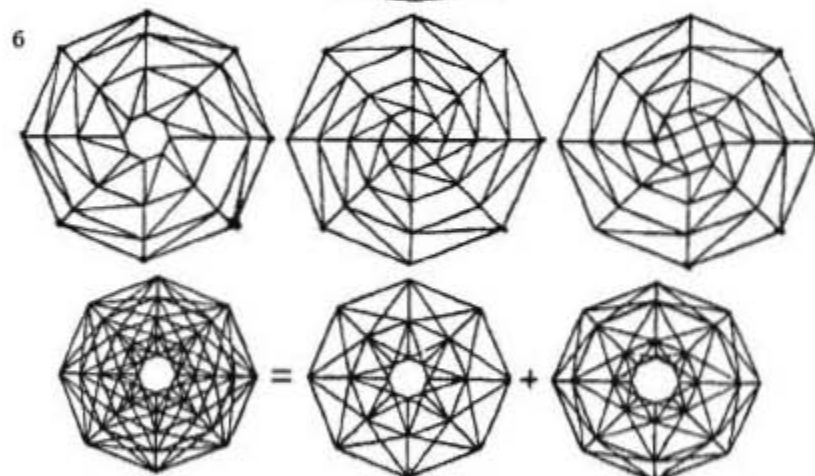
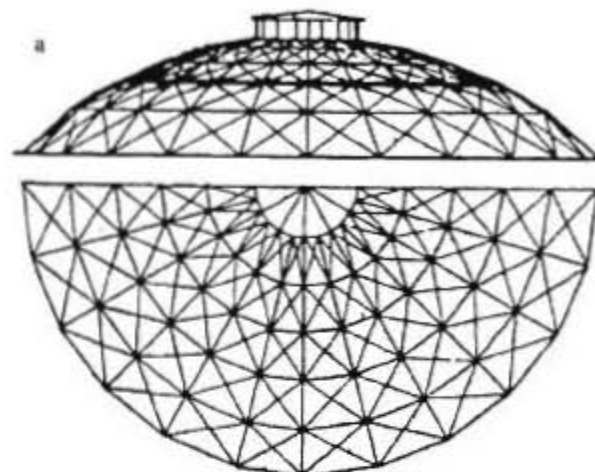


Рис. 1.22. Купол Шведлера

а – вид купола с крестовыми связями; б – возможные размещения связей

Родоначальниками геодезических и кристаллических систем являются проф. М.С. Туполев (СССР) и Р.Б. Фуллер (США). Сетчатые купола являются наиболее экономичными по расходу материала купольными конструкциями вследствие пространственной работы каркаса и равномерности распределения материала по поверхности оболочки.

Примерами возведенных сетчатых куполов являются следующие объекты.

Купол общественного центра международного молодежного лагеря «Волга» (рис. 1.23) близ Казани (автор М.С. Туполев) пролетом 42 м.



Рис. 1.23. Купол общественного центра в международном лагере «Волга»

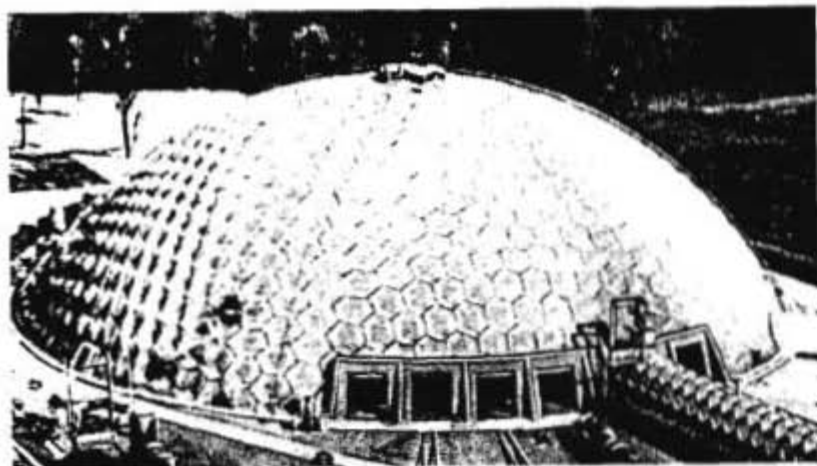


Рис. 1.24. Купол над зданием вагоностроительных мастерских в штате Иллинойс (США)

Купол над зданием вагоностроительных мастерских в штате Иллинойс (США) (рис. 1.24) диаметром 114 м, высотой подъема 36 м с треугольным сетчатым каркасом из стальных труб диаметром 150 мм, к которым крепятся шестиугольные панели из стального листа.

Купол над стадионом в г. Хьюстон (США) (рис. 1.25). Здание стадиона вмещает 66 000 зрителей. Стальной каркас ребристо-кольцевого купола состоит из 12 главных радиальных арочных ребер, опорного и верхнего колец, пяти промежуточных колец и пересекающихся промежуточных ребер, параллельных главным. Все элементы каркаса выполнены в виде сварных ферм одинаковой высоты – 1,5 м. Пояса ферм изготовлены из широкополочных двутавров, которые в главных ребрах имеют высоту до 36 см, решетка

ферм изготовлена из уголков. Главные ребра собраны из секций длиной от 31 до 36 м. Опорное кольцо смонтировано из 24 секций длиной около 26 м каждая и весом 32 т. Остальные элементы монтировались из секций меньшей длины – 15 м и короче. Секции соединены между собой высокопрочными болтами. По ребрам купола уложены кольцевые прогоны с шагом 2,4 м, по которым смонтирован настил купола из железобетонных панелей с древесноволокнистым наполнителем толщиной 8 см. Кровля из синтетических материалов наносилась набрызгом непосредственно из панели настила.



Рис. 1.25. Купол над стадионом в г. Хьюстон (США)

На рис. 1.26 показан вариантный проект купола над зданием высоковольтного испытательного центра, а на рис. 1.27 показан купол, который возводился над зданием высоковольтного испытательного центра в г. Истра. Конструкция купола решена в виде сплюснутого эллипсоида вращения. Диаметр по экватору – 234 м. Экватор расположен на отметке 23 м от пола, высота купола 112 м. стержни каркаса, образующие пространственную треугольную сеть, запроектированы двухветвевыми с высотой сечения 2,5 м. Пояса выполнялись из спаренных уголков. Материал поясов – сталь 0,9 г2с-12. Раскосы – из электросварных труб диаметром 60 и 83 мм толщиной стенки 1,5 мм, опорами купола являлись 83 столбчатых фундамента. К верхним поясам стержней приваривалась мембрана из рулонной стали толщиной 1,5 мм опорами купола являлись 83 столбчатых фундамента. В результате действия ряда причин (в том числе нарушения технологии монтажа, низкого качества строительно-монтажных работ, сниженной прочности стали, высокой снеговой нагрузки) в январе 1985 г. на стадии завершения произошло обрушение купола. Авария имела место ранним утром, что предотвратило человеческие жертвы.

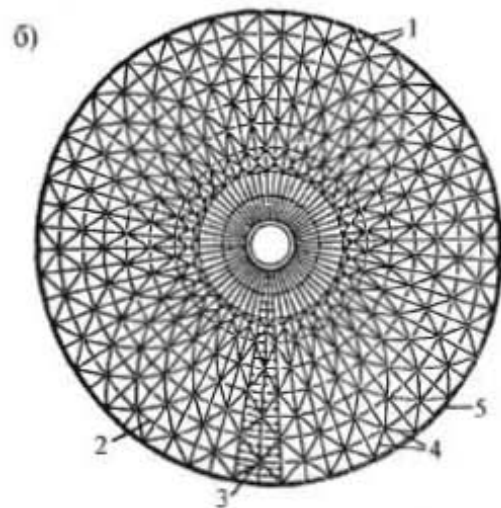
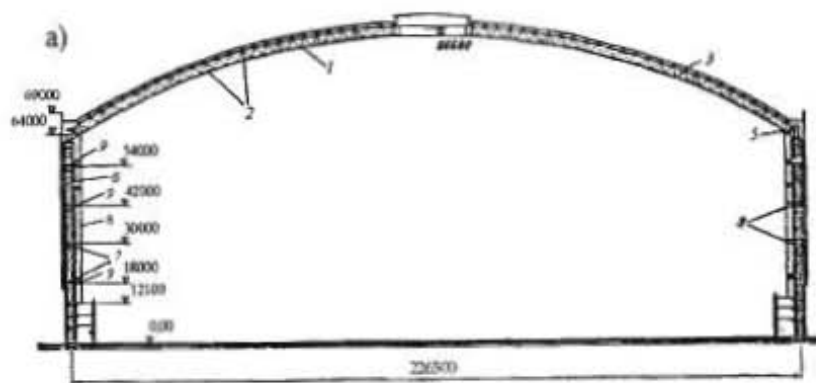


Рис. 1.26. Вариант купола над зданием высоковольтного испытательного центра: а - разрез купола; б - план купола.

По сведениям, предоставленным Минмонтажспецстроем СССР, Государственная комиссия, расследовавшая обстоятельства аварии, не установила однозначно причин обрушения. При этом указывались следующие факторы:

1. Заказчиком и проектными институтами (разработчиками проекта) на предпроектной стадии не были организованы научно-исследовательские и экспериментальные работы, не было проведено экспериментальное исследование купола на моделях с целью изучения его напряженно-деформированного состояния на стадиях монтажа и эксплуатации при разных схемах загрузки. В результате не был обеспечен при расчете купола полный и всесторонний учет воздействий, а также особенностей конструктивного решения купола и технологии монтажа (навесным методом).

2. Со стороны заказчика, завода-изготовителя, генподрядной и монтажной организаций не было обеспечено осуществление необходимого контро-

ля качества металла, точности изготовления и монтажа, а также геодезического контроля напряженно-деформированного состояния купола в процессе его возведения.

3. В районе строительства возможно влияние тектонических процессов в связи с его расположением на пересечении региональных разрывных структур древнего заложения, сохранивших тектоническую активность до настоящего времени.

Кроме того, по мнению многих ведущих специалистов в области металлических конструкций, существенную роль в аварии сыграли основные предпосылки расчета, такие как выбор геометрии купола, эллиптическая форма которого не способствовала изгибной устойчивости покрытия при действии асимметричных нагрузок.

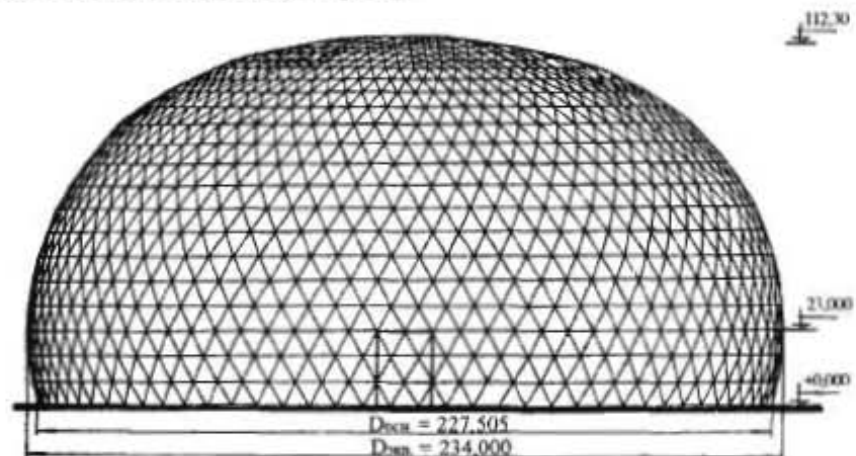


Рис. 1.27. Купол над зданием высоковольтного испытательного центра

1.9. Пластинчатые купола

Пластинчатые купола собираются из металлических пластин (панелей) которые имеют выштампованные ребра жесткости и соединяются между собой по контуру сваркой или узловыми соединениями. Примерами пластинчатых куполов являются: купол в г. Лонгвью (США) (рис. 1.28) [4] диаметром 91,5 м, стрелой подъема 25,9 м при толщине алюминиевых листов 3,18 мм и купола системы «Баку» (автор Г.Н. Павлов) (рис. 1.29) [8], которые серийно выпускались пролетом от 12 м до 20 м и собирались из металлических пластин, изогнутых в одном или двух направлениях. Окончательно пластины фиксировались сваркой закладных деталей.

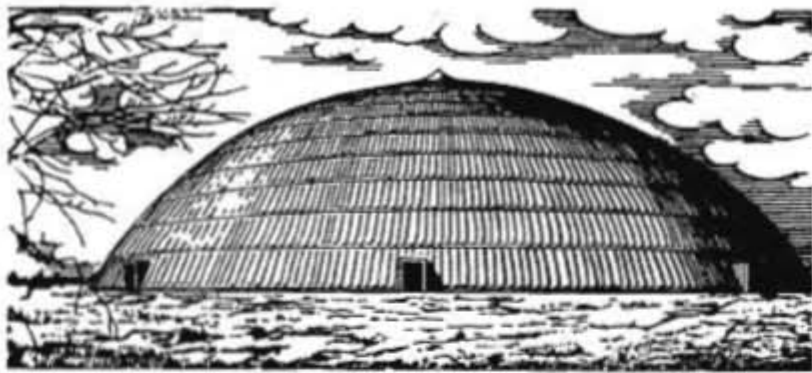


Рис. 1.28. Общий вид пластинчатого купола диаметром 91,5 м в г. Лонгвью

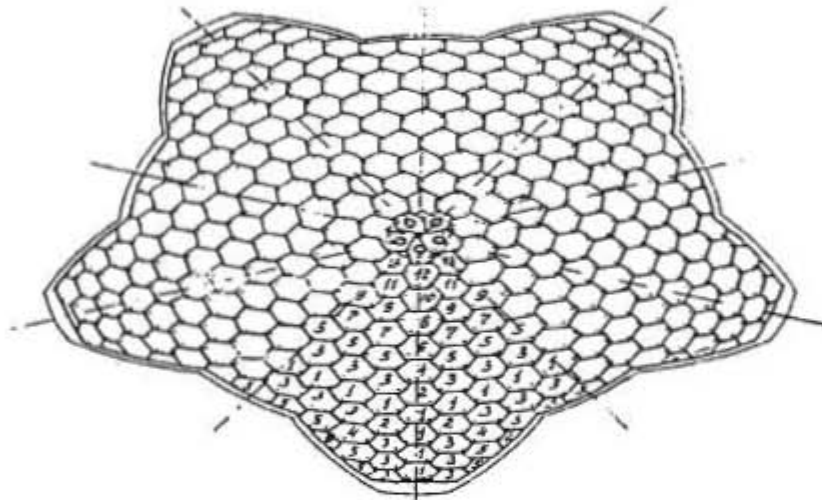


Рис. 1.29. Купол системы «Баку»

1.10. Контрольные вопросы к главе 1

1. Каковы геометрические параметры древних куполов из камня?
2. Назовите конструктивные элементы купола?
3. Какие усилия могут возникнуть в нижнем опорном кольце?
4. Назовите возможные конструктивные решения оболочки купола.
5. Назовите типологии куполов по конструкции.
6. Назовите типологии куполов по материалу.
7. Можно ли использовать пневматическую опалубку при возведении куполов?
8. Назовите характерные признаки конструкции ребристого купола.
9. Назовите характерные признаки конструкции ребристо-кольцевого купола.
10. Назовите характерные признаки конструкции ребристо-кольцевого купола со связями.
11. Назовите первые конструкции сетчатых куполов.
12. Нарисуйте возможные варианты размещения связей в куполе Швелера.
13. Приведите пример геодезического купола.
14. Приведите пример пластинчатого купола.

2. ПРИНЦИПЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КУПолов

2.1. Общие сведения

Формообразование ребристых, ребристо-кольцевых и ребристо-кольцевых со связями куполов сводится к определению формы и координат плоской арки, образованной из двух диаметральных ребер. Форма арки определяется на этапе архитектурного проектирования, расчет координат ведется по известным формулам аналитической геометрии.

Формообразование сетчатых и пластинчатых куполов является более сложным процессом. Поэтому остановимся на этом вопросе более подробно.

Выбор и расчет геометрической схемы купола является первой и очень ответственной стадией проектирования, т.к. именно от этого зависит число типоразмеров элементов, конструкция узлов сопряжений, способы изготовления и монтажа элементов и, в конечном итоге, эффективность конструкции.

В процессе формообразования поверхности купола можно выделить три этапа:

- выбор поверхности;
- выбор способа разрезки (под термином «разрезка» понимается способ нанесения на выбранную поверхность «сети геометрических линий каркаса купола»);
- расчет координат узлов.

Поверхности сетчатых оболочек в основном ограничиваются двумя классами: поверхности параллельного переноса (эллиптический параболоид, круговая поверхность переноса, гиперболический параболоид) и поверхности вращения (сфера) и т.п.

Преобладающее количество сетчатых куполов построено на сфере, поэтому дальнейшее рассмотрение вопросов формообразования сетчатых куполов будем проводить исходя из построений на сфере.

2.2. Меридиально-кольцевая система разрезки

Для оболочек вращения очень часто за основу принимаются меридиально-кольцевая система разрезки. Суть этой системы заключается в членении поверхности вращения меридиональными и параллельными плоскостями на треугольные (у полюса) и трапециевидные элементы (рис. 2.1). Число типоразмеров треугольных и трапециевидных элементов при этой системе разрезки определяется числом ярусов между параллельными сечениями и не зависит от числа меридиональных сечений, а также от формы меридиональной образующей кривой. При формообразовании сферических сетчатых оболочек на плане, близком прямоугольному, используют также сеть меридианов, образованную пересечением со сферой двух пучков плоскостей с взаимно-перпендикулярными осями. Как видно из схемы на рис. 2.1 число типоразмеров элементов при такой разрезке значительно больше, чем при меридиально-кольцевой системе.

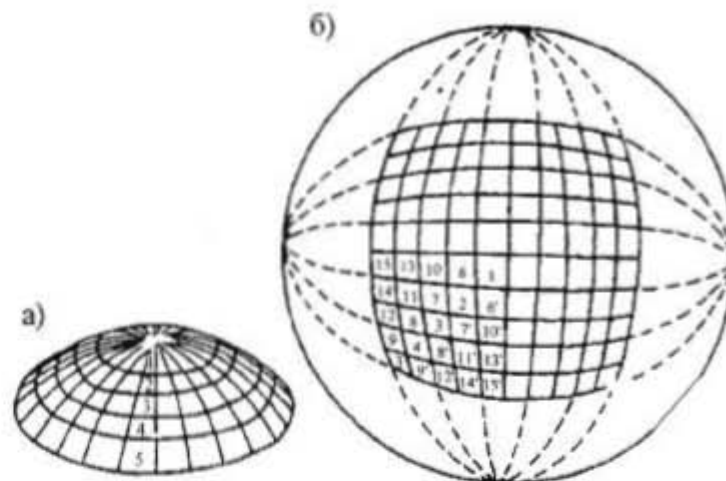


Рис. 2.1. Меридиально - кольцевая разрезка (а) и разрезка сферы двумя пучками меридиональных плоскостей с взаимноперпендикулярными осями (б)

Наибольшее распространение из сетчатых оболочек вращения получили сетчатые сферические купола на круглом и многоугольном (вписанном в круг) плане. Системы разрезок таких куполов многообразны. Можно различить два основных этапа построения этих систем. Вначале производится первичная разбивка шарового сегмента на определенное число одинаковых участков, а затем производится окончательная разрезка каждого полученного участка на более мелкие.

Первичная разбивка выполняется в основном двумя способами по меридиональной схеме и по схемам правильных многогранников

2.3. Звездчатая система

Первичная разбивка звездчатой системы меридиональная. На сферический сегмент наносится сеть меридианов. Каждый полученный участок делится четырехугольными ячейками таким образом, чтобы два противоположных узла ячейки располагались на одном меридиане, а два других - на одной параллели. Обнаруживаются две разновидности сетей, применяемых для этой системы разрезки, - правильная сеть Чебышева и сеть локсодромий. Применение правильной сети Чебышева (см. рис. 2.2, а) приводит к сгущению сетки по мере приближения к полюсу купола. Использование сети локсодромий (линий, имеющих постоянный угол наклона к меридиану) частично устраняет этот недостаток, однако значительное уменьшение длины боковых сторон треугольников также вызывает сгущение сетки (см. рис. 2.2, б).

В звездчатой системе с применением сети Чебышева длина стержней вдоль линий сети постоянна, хотя изменение углов между стержнями приводит к тому, что число узловых элементов равно числу ярусов. При локсодромной разрезке, наоборот, узловые элементы могут быть одного типоразмера, а число типоразмеров стержней, расположенных вдоль линий сети, может быть равно числу ярусов.

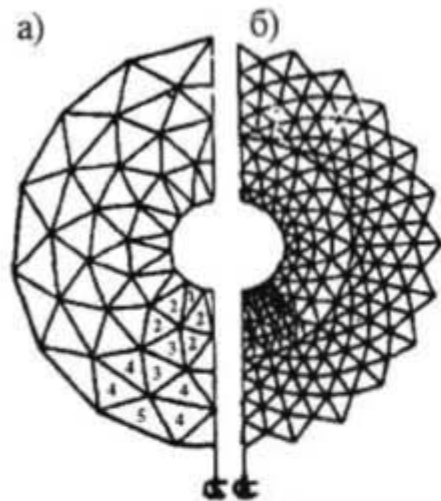


Рис. 2.2. Звездчатая система: а - на основе сети Чебышева; б - на основе сети локсодромий

2.4. Система Кайвитта

Эта система устраняет основной недостаток звездчатой системы - сгущение сетки. Первичная разбивка меридиональная. Основание каждого полученного сектора делится на определенное количество равных участков, а затем проводятся кольцевые сечения, число которых равно числу членений основания. Каждое кольцевое сечение делится на равные части, число которых в каждом последующем сечении, считая от основания сектора, уменьшается на единицу (рис. 2.3).

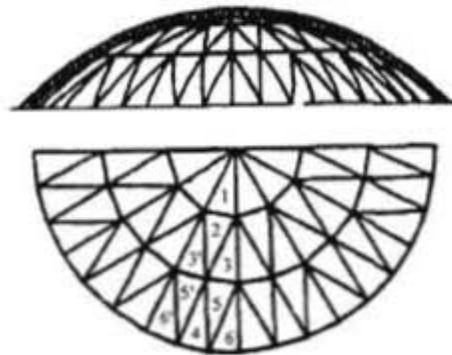


Рис. 2.3. Система Кайвитта

Полученные точки соединяются, и таким образом образуется сеть треугольников, основание которых вдоль каждого яруса, как и в звездчатой системе равны. Однако полученные треугольники в отличие от звездчатой схемы неравносторонние. Поэтому число их типоразмеров соответствует квадрату числа членений (ярусов).

2.5. Система «Ромб-1»

Сущность этой системы заключается в первичном меридиональном делении купола на сектора с последующим членением каждого сектора на ромбовидные ячейки путем нанесения правильной сети Чебышева. Если в звездчатой схеме противоположные узлы ячейки сети расположены на меридианах или, соответственно, на параллелях, в данной системе линий сети Чебышева различных направлений располагаются вдоль боковых сторон сектора.

В результате такой разбивки получается достаточно равномерная сеть из равнобедренных треугольников. Число типоразмеров последних приблизительно в два раза меньше, чем в системе Кайвитта. Система «Ромб-1» применена, в частности, при проектировании купола диаметром 65 м в Душанбе (рис. 2.4).

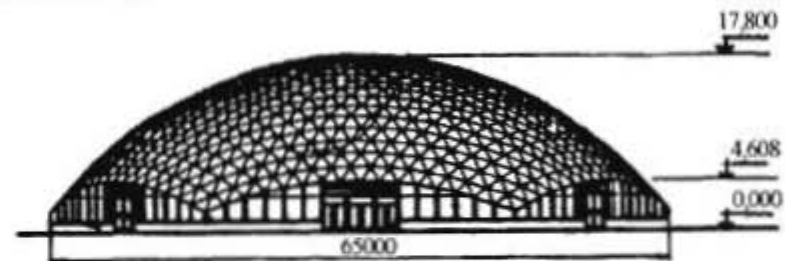


Рис. 2.4. Купол диаметром 65 м в Душанбе. Разрезка системы «Ромб-1»

В отличие от звездчатой системы и системы Кайвитта основания секторов купола не совпадают с кольцевыми сечениями и образуют пространственную (неплоскую) кривую. Поэтому формообразование крутых в плане покрытий по данной системе затруднено.

2.6. Системы, основанные на применении многогранников, вписанных в сферу

Купола на основе этой системы выкраиваются из сферы, первичная разбивка которой производится по геодезическим линиям, проведенным через вершины вписанных многогранников [11].

В качестве таких многогранников обычно используют додекаэдр (12 пятиугольных граней) и икосаэдр (20 треугольных граней).

Для сферических куполов большой высоты рационально использование симметрии правильных многогранников - икосаэдра и додекаэдра. Они имеют десять тройных осей вращения и шесть зеркально-поворотных осей десятого порядка. Предложено большое количество вариантов построения сферических сетей с использованием симметрии правильных многогранни-

ков. В практике проектирования наибольшее распространение получили два способа: 1) геодезическая сеть на основе додекаэдра (рис. 2.5, а); 2) построение 720-гранника на основе усеченного икосаэдра (рис. 2.5, б)

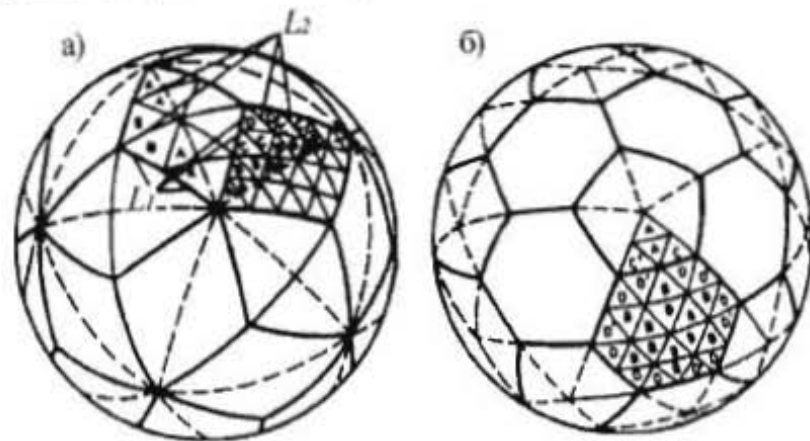


Рис. 2.5. Схема построения сферической сети на основе додекаэдра (а) и икосаэдра (б)

Первый способ заключается в том, что вершины додекаэдра и центральные точки всех его граней проектируют на описанную сферическую поверхность. Полученные точки соединяют дугами большого круга - геодезическими линиями на сфере. Получается исходная сеть, состоящая из 60 одинаковых равнобедренных сферических треугольников. Каждый треугольник разбивается на более мелкие таким образом, чтобы по оси симметрии исходного треугольника укладывалось определенное число одинаковых равнобедренных треугольников. К образовавшейся цепочке треугольников А пристраиваются слева и справа одинаковые треугольники В и т.д. Линии разбивки в пределах каждого исходного треугольника представляют собой дуги большого круга, т. е. являются геодезическими линиями на сфере. Поэтому эта схема называется геодезической. Степень членения может быть любой. В табл. 1 приведены длины сторон плоских граней для первых шести членений исходной сети при радиусе сферы, равном единице. Обозначение длин указано на рис. 2.5. С ростом степени членения число типоразмеров элементов увеличивается линейно. Общее число граней равно $60m^2$, число типоразмеров панелей, стержней и узлов равны, соответственно, $2m - 1$, $2m$, $2m$ (m - число членений граней додекаэдра). Этот способ разбивки разработан Р.Б. Фуллером.

Во втором способе основой построения является полуправильный многогранник - усеченный икосаэдр, состоящий из 12 правильных пятиугольников и 20 правильных шестиугольников. Вершины и центральные точки всех его граней проектируются на описанную сферическую поверхность. Полученные точки соединяются дугами большого круга. Получается исходная сеть, состоящая из 180 равнобедренных треугольников двух типов. Каждый из полученных треугольников разбивается на четыре более мелких также, как и по первому способу, с двумя однотипными треугольниками по высоте. В результате образуется треугольная сеть на сфере, состоящая из 720 ячеек. Этот способ предложен М.С. Туpoleвым.

Геодезическая разбивка усеченного икосаэдра имеет следующие характеристики. Общее число граней равно $180n^2$, число типоразмеров панелей, стержней и узлов равно, соответственно, $2n^2$.

$$\frac{3}{2} * n * (n + 1), \quad \frac{1}{2} * (n + 1) * (n + 2),$$

где n - число членений исходного 180-гранника.

Сравнение двух геодезических схем членения с точки зрения минимума типоразмеров стержней и панелей показывает, что в порядке увеличения степени членения наиболее рациональны схемы Д-1, И-1, Д-2, Д-3, Д-4 и т.д. (где Д - додекаэдр; И - икосаэдр; 1...4 - число членений исходной сети). Расчет геометрических параметров всех рассмотренных схем выполняется исключительно на ПЭВМ, ввиду большого объема вычислений.

2.7. Схема геометрического членения сферы по системе «Р»

Известны и другие разрезки на основе правильных многогранников (икосаэдра, октаэдра, тетраэдра), в частности, разрезка системы «Р» предложенная Павловым Г. Н. для пластинчатых куполов [7].

Принципиальная схема геометрического членения сферы по системе «Р» показана на рис. 2.6. Основным целевым критерием разбивок системы «Р» является минимум шестиугольных пирамидальных деталей. Достигается это путем расположения рядов одинаковых симметричных шестиугольных фигур по направлению линии ВЕ треугольника Шварца (рис. 2.6, а). Нетрудно убедиться, что расположение одинаковых шестиугольных фигур по направлениям линий ДЕ и ДВ дает большее число типов, чем по линии ВЕ.

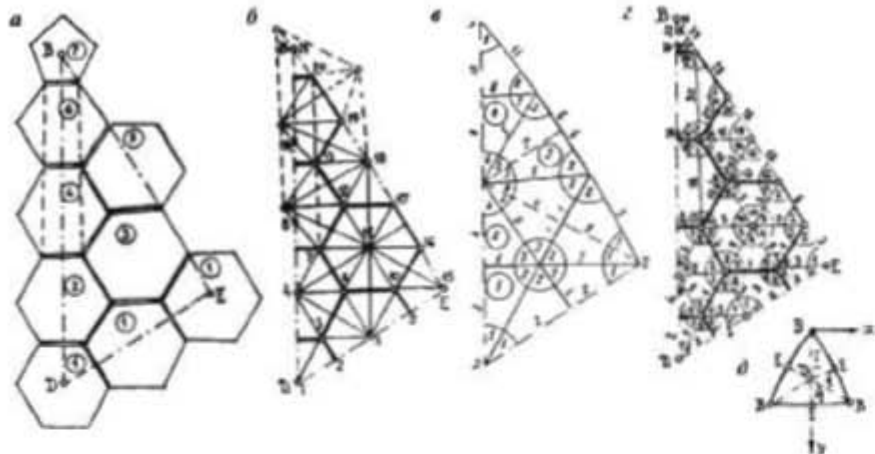


Рис. 2.6. Расчетная схема сетевых разбивок системы «Р» и представление параметров сетей на двух двойственных схемах:

a - расположение типовых элементов сети в пределах треугольника Шварца; *b* - основная расчетная схема сетей с нумерацией узловых точек; *в* - маркировка параметров сетей подсистемы «Р1»; *г* - маркировка параметров сетей подсистемы «Р2»; *д* - нумерация треугольников Шварца в пределах половины треугольника Мебиуса

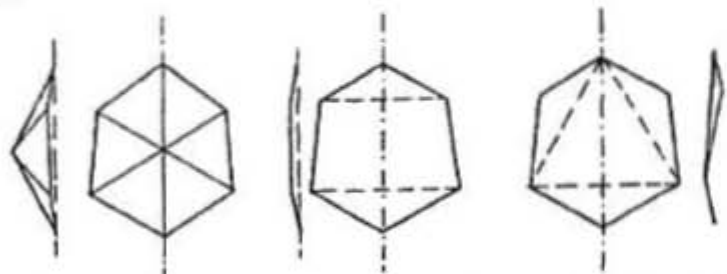


Рис. 2.6, *e* - возможное конструктивное решение сборных типовых деталей в виде пирамид и плоских листов со сгибами

Основная разбивочная схема системы «Р» образуется следующим образом: линия ВЕ делится на равное число отрезков, и на этих отрезках располагают прямоугольные сферические треугольники с острыми углами, равными углу В (на рис. 2.6, *b* заштрихованные треугольники). Линии первой стадии геометрического построения образуются путем проведения больших кругов как продолжений гипотенуз малых катетов треугольников, при этом центры шестиугольных фигур всех последующих рядов всегда находятся на продолжениях линий гипотенуз исходных треугольников. Далее центры шестиугольных фигур соединяются геодезическими линиями и че-

рез вершины при острых углах исходных треугольников проводятся большие круги перпендикулярно линии ВЕ. При делении линии ВЕ на большее число отрезков сферический треугольник Шварца разделится на ряды шестиугольных ячеек (рис. 2.6, *b* жирные линии). Они располагаются по направлению линии ВЕ, во всех рядах только одна шестиугольная деталь не повторяет конфигурацию типовых деталей ряда - ось симметрии ее расположена на линии ДВ (рис. 2.6, *a* деталь 4).

Основная схема сети системы «Р» (рис. 2.6, *b*) полностью, за исключением исходных прямоугольных треугольников и некоторых треугольников, примыкающих к линии ДЕ и ДВ, состоит из косоугольных треугольных граней. Несмотря на это, разрезы обладают свойствами весьма благоприятными для конструирования куполов и оболочек. Они отчетливо проявляются при разделении основной схемы на две двойственные друг другу сети подсистем «Р1» и «Р2» (рис. 2.6, *a, г*).

Сеть подсистемы «Р1» состоит полностью из равнобедренных треугольников, причем взаиморасположение их очень удобное для конструирования деталей оболочек и куполов. В пределах треугольника Мебиуса одинаковые детали располагаются концентрическими рядами и все узловые детали симметричны.

Разрезка подсистемы «Р2» состоит из косоугольных треугольных ячеек, но они расположены попарно симметрично, и путем объединения треугольников можно образовать на поверхности сферы сеть, состоящую из симметричных шестиугольных ячеек. Число типов последних будет минимальным по сравнению со всеми другими системами кристаллических разбивок. Следующей характерной чертой разрезов «Р2» является то, что сетевая разбивка в пределах треугольника Шварца состоит из взаимопересекающихся линий больших кругов.

В таблице 2 приведена классификация типов сетей системы «Р», где за основу взято количество треугольных ячеек на полной сфере. Икосаэдральные разбивки имеют индекс «Р», а соответственные им двойственные подсистемы разбивок «Р1» и «Р2». Октаэдральные сети обозначены индексом «РК», «РК1» и «РК2», индексы тетраэдральных сетей: «РТ», «РТ1», «РТ2».

Таблица 1.

Длина стержней геодезической схемы

Тип треугольника	Степень членения исходной сети					
	1		2		3	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
A	0,640852	0,713644	0,336089	0,389477	0,226257	0,264273
B	-	-	0,313371	0,362843	0,218773	0,255619
C	-	-	-	-	0,206038	0,231817
D	-	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-

Степень членения исходной сети

Тип треугольника	Степень членения исходной сети					
	4		5		6	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
A	0,170287	0,199457	0,136452	0,160035	0,113811	0,133576
B	0,167003	0,195678	0,134739	0,158068	0,112810	0,132427
C	0,161026	0,184914	0,131518	0,152365	0,110892	0,129064
D	0,153316	0,168672	0,127143	0,143473	0,108216	0,123717
E	-	-	0,122041	0,132151	0,104960	0,116728
F	-	-	-	-	0,101353	0,108490

Таблица 2.

Классификационная таблица разрезов системы "Г"

Число делений ст. роня ВГ+ВГ	Разрезы подсистемы Р1, РК1 и РТ1				Разрезы подсистемы Р2, РК2, РТ2										
	Типы разрезов		Количество типов элементов разрезов		Типы разрезов		Количество типов элементов разрезов								
	Подсистема "р1"	Подсистема "р1"	Сторон	Грани	Узлов	Сторон	Грани	Узлов							
1	20	8	4	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2		
2	80	32	16	2	2	2	2	4	240	96	48	4	3	1	4
3	180	72	36	3	3	3	3	6	540	216	108	6	5	2	6
4	320	128	64	4	4	4	4	8	960	384	192	8	7	3	8
5	500	200	100	5	5	5	5	10	1500	600	300	10	9	4	10
6	720	288	144	6	6	6	6	12	2160	864	432	12	11	5	12
7	980	392	196	7	7	7	7	14	2940	1176	588	14	13	6	14
8	1280	512	256	8	8	8	8	16	3840	1536	768	16	15	7	16
9	1620	648	324	9	9	9	9	18	4860	1944	972	18	17	8	18
10	2000	800	400	10	10	10	10	20	6000	2400	1200	20	19	9	20
11	2420	908	484	11	11	11	11	22	7260	2904	1452	22	21	10	22
12	2890	1152	576	12	12	12	12	24	8640	3456	1728	24	23	11	24
13	3380	1352	676	13	13	13	13	26	10140	4056	2028	26	25	12	26
14	3920	1568	784	14	14	14	14	28	11760	4704	2352	28	27	13	28
15	4500	1800	900	15	15	15	15	30	13500	5400	2700	30	29	14	30
16	5120	2048	1024	16	16	16	16	32	15360	6144	3072	32	31	15	32
17	5780	2312	1156	17	17	17	17	34	17340	6936	3468	34	33	16	34
18	6480	2592	1296	18	18	18	18	36	19440	7776	3888	36	35	17	36
19	7220	2888	1444	19	19	19	19	38	21660	8664	4332	38	37	18	38
20	8000	3200	1600	20	20	20	20	40	24000	9600	4800	40	39	19	40

1. Назовите этапы формообразования поверхности купола.
2. Назовите поверхность на основе которой преимущественно строят купола.
3. Суть меридионально-кольцевой разрезки?
4. С чего начинается построение звездчатой системы?
5. Основное преимущество системы Кайвитта перед звездчатой системой.
6. Какую форму плана имеют купола по системе «Ромб-1»?
7. На основе какого многогранника строил свои разрезки Р.Б. Фуллер?
8. На основе какого многогранника строил свои разрезки М.С. Тупалев?
9. На основе какого многогранника строил свои разрезки Г.И. Павлов?

3. УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КУПОЛОВ

3.1. Принципы конструирования узлов куполов

Экономическая эффективность конструкции купола в значительной степени определяется конструкцией узлового соединения, которое должно обеспечивать достаточную несущую способность, низкую трудоемкость изготовления и сборки, малую материалоемкость. Конструкция узлового соединения зависит от геометрической схемы каркаса купола. В процессе конструирования важно обеспечить центрацию усилий в элементах, т. к. возможно следующее взаимное расположение стержней в узле (рис. 3.1). На рис. 3.1, а показано теоретическое соединение стержней в узле. На рис. 3.1, б - возможное фактическое расположение концов стержней вследствие начальных несовершенств формы оболочки, влияния допусков при изготовлении стержней, которое приводит к возникновению моментов в узле (рис. 3.1, в) [9], неблагоприятно сказывающихся на работе конструкции в целом и узла в частности.

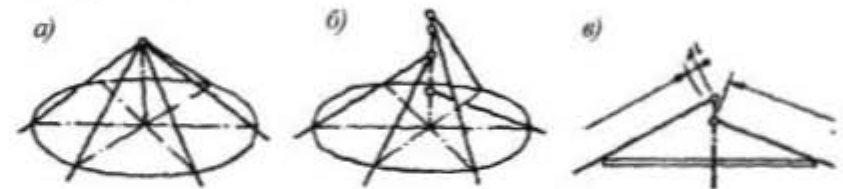


Рис. 3.1. Варианты расположения стержней в узле

Большое значение для обеспечения высоких технико-экономических показателей купола имеет рациональный профиль сечения стержней. Наиболее эффективным профилем для стержневых куполов является труба круглого сечения. При условии одинаковой гибкости сжатого стержня применение круглой трубы позволяет экономить до 15% массы металла по сравнению с парой равнобоких уголков, соединенных между собой прокладками, по аналогии с конструкцией строительных ферм. Вместо круглых труб можно использовать холодно-гнутые сварные трубы квадратного сечения. На практике при строительстве зданий с купольными покрытиями встречаются разнообразные сечения элементов из прокатных профилей: равнополочных уголков, тавров, двутавров, швеллеров. Разнообразие конструктивных решений стержней в совокупности с системами разрезки поверхностей, способами соединения и видами монтажной сборки обусловили большое число вариантов узловых соединений и непрекращающуюся работу по их усовершенствованию.

Узлы купольных конструкций можно классифицировать по следующим признакам:

- по ориентации в пространстве (концы стержней ориентированы на касательную плоскость в узле, концы стержней ориентированы на описанную вокруг центра узла поверхность вращения, концы стержней ориентированы на плоскости и пересекаются по линии, нормальной к поверхности в узле);

- по способу соединения (болтовые, сварные, контактные или контактно-фрикционные, комбинированные). При этом в болтовых, контактных и контактно-фрикционных соединениях не исключается использование сварки как способа сопряжения отдельных деталей узловой фасонки или стержневого элемента;

- по способу изготовления (построечного изготовления, заводского изготовления).

Наиболее ответственным и сложным узлом конструкции куполов всех типов является узел присоединения ребер или стержней к нижнему кольцу и опирание кольца на нижележащие конструкции. Нижнее растянутое кольцо конструируется обычно в виде сварного двутавра. В ребристых и ребристокольцевых куполах для увеличения изгибной жесткости кольца в горизонтальной плоскости двутавр располагается лежа. Сетчатые купола сами по себе имеют большую пространственную жесткость в горизонтальном направлении, поэтому при их проектировании опорное кольцо стремится развить по вертикали. Вертикальное расположение двутавра обеспечивает также максимальную жесткость на восприятие равномерно распределенных по кольцу радиальных крутящих моментов, которые вызывают в кольце изгиб относительно горизонтальной оси.

Узел должен быть правильно центрирован: оси стержней купола, смыкающихся к кольцу, и ось вертикальной опорной реакции должны пересекаться в горизонтальной плоскости, проходящей через центр тяжести кольца. Кольцо обычно шарнирно опирают на фундамент или вертикальные колонны. В большепролетных куполах желательно обеспечить свободу перемещений кольца в радиальном направлении. Это достигается использованием катковых опор или коротких качающихся стоек.

3.2. Схемы нижних опорных колец куполов

Нижнее опорное кольцо может иметь в плане очертание окружности, но чаще всего это правильный плоский многоугольник с жесткими или шарнирными сопряжениями стержней в углах. Нижнее опорное кольцо с осью в виде окружности внецентрично растянуто.

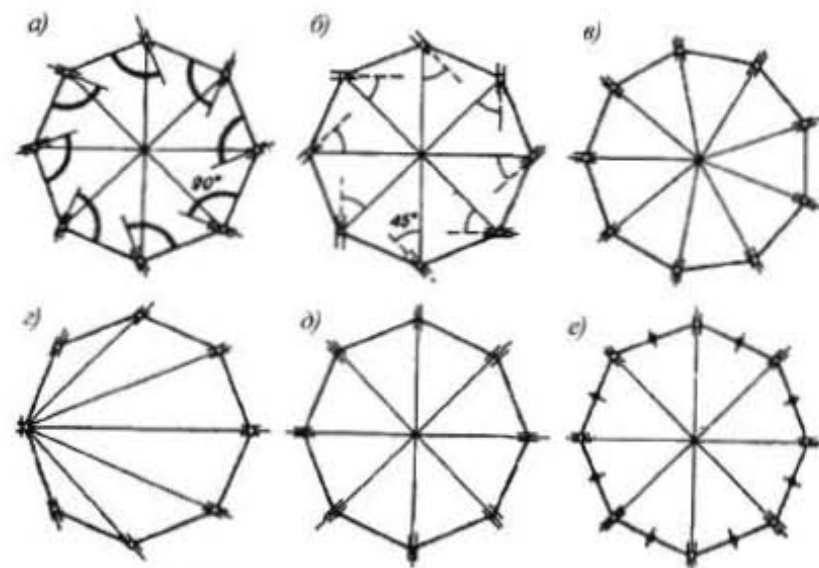


Рис. 3.2. Схемы нижних опорных колец куполов:

a - оси опорных катков, параллельных сторонам кольца; *b* - направления возможных перемещений катков составляют угол 45° с радиусами; *в* - направления возможных перемещений катков пересекаются в одной точке; *г* - направления возможных перемещений катков, пересекающиеся в точке расположения неподвижной опоры; *д* - жесткое кольцо с радиальной системой возможных перемещений опор; *е* - шарнирное кольцо с внеузловыми неподвижными опорами и радиальной системой возможных перемещений подвижных опор

С целью исключить скольжение вдоль образующей катки устраивают с ребордами, а при качающихся стержнях устраиваются связи по нормали к плоскости подвиги опор. Ориентация осей катков выполняется таким образом, чтобы кольцо было неизменяемым. Для этого достаточно любое хаотическое расположение катков, но предпочтительны упорядоченные системы [4].

На рис. 3.2, *a* изображено кольцо купола, в котором оси цилиндрических опор расположены так, что служат продолжением сторон кольца в одну сторону. Двойные линии, перпендикулярные к оси цилиндрических опор, показывают возможные перемещения этих опор; таким образом, опоры могут перемещаться только по перпендикулярам к соответствующим стержням кольца. При большом числе сторон четного опорного кольца эта схема приближается к изменяемой.

На рис. 3.2, *б* изображено кольцо, в котором возможное перемещение катков ориентировано под углом 45° к радиусам.

Такая система далека от изменяемой как в кольцах с четным, так и в кольцах с нечетным большим числом сторон.

На рис. 3.2, в показано кольцо с подвижными цилиндрическими опорами, если движение их происходит по радиальному направлению. Такая система в случае четного числа сторон при шарнирном сопряжении стержней кольца в узлах теоретически является изменяемой системой, так как оси опорных катков пересекаются в одной точке. При большом числе опор трудно обеспечить точное направление движения всех цилиндрических катков к центру купола, а при некотором даже небольшом отклонении направлений движения нескольких катков от центра система становится неизменяемой. Но если кольцо имеет нечетное число сторон, то эта система ориентации катков обеспечивает его неизменяемость.

На рис. 3.2, г показано кольцо, у которого одна опора неподвижная, остальные подвижные с движением по направлению лучей, соединяющих неподвижную опору с подвижными.

При изменении температуры происходит передвижение опорных узлов, при котором многоугольник сохраняет подобие, но при этом возникают дополнительные усилия в неподвижной опоре и опорном кольце от сил трения скольжения в перемещающихся подвижных опорах.

На рис. 3.2, д показано жесткое многоугольное кольцо с опорами в углах, имеющими подвижность в радиальном направлении и закрепление в тангенциальном. Ребра обычно соединяются в узлах с кольцом жестко. В таком случае в кольце, помимо нормальных усилий, появляются изгиб и кручение. Возникающие при этом усилия изгиба и кручения сравнительно невелики и практически не требуют увеличения сечения кольца. Этот тип кольца получил широкое распространение.

На рис. 3.2, е показано опорное кольцо, в котором количество опор удвоено против обычного. Неподвижные опоры расположены в серединах сторон кольца и подвержены только горизонтальным воздействиям. Подвижные опоры расположены обычным образом в углах кольца и воспринимают вертикальные воздействия. Получаются локально работающие участки кольца, изолированные друг от друга неподвижными опорами. Подвижные опоры решены по маятниковой схеме.

Такое кольцо целесообразно при значительных несимметричных нагрузках, действующих на купол. Наконец, ребра купола могут опираться (шарнирно или с заделкой) на неподвижные опоры; в этом случае роль опорного кольца выполняет нижележащая конструкция.

В анализе кинематической схемы и при определении усилий в элементах кольца для ряда приведенных выше схем в узлах предполагается устройство идеальных шарниров. В действительности узловые соединения конструируются жесткими и шарниры отсутствуют. Это приводит к тому,

что в плоскости кольца возникают изгибающие моменты вследствие изменения углов между стержнями опорного кольца.

Перемещение узлов опорного кольца из-за температурных изменений, ассимметричных или неосесимметричных нагрузок сопровождается всегда преодолением сил трения качения, а иногда и сил трения скольжения, что зависит от схемы движения и конструкции подвижных опор. От усилий сил трения, скольжения и качения к кольцу в узле дополнительно оказывается приложенная сила и пара в плоскости кольца.

У растянутого значительными силами опорного кольца дополнительная нормальная сила от действия усилий трения (растягивающая - при понижении температуры, сжимающая - при повышении) не вызовет существенного изменения основного напряженного состояния. Что касается изгибающих моментов, то их воздействие оказывается существенным, поскольку стержни кольца являются маложесткими в работе на изгиб в горизонтальной плоскости.

При подборе сечений кольца эти усилия должны быть учтены. Нужно стремиться к такому расположению катков, при котором не происходило бы изменения углов между стержнями кольца при полярно-симметричных воздействиях и по возможности не возникали бы изгибающие моменты от сил трения - скольжения.

На основании анализа рассмотренных систем устройства опорного кольца можно прийти к выводу, что с точки зрения неизменяемости лучшим вариантом расположения опор является система, основанная на принципе осевой симметрии — «лучевая» система (рис. 3.2, г). Ее неизменяемость становится более надежной, чем в центрально-симметричных системах, с увеличением числа сторон кольца, что соответствует куполам больших диаметров.

3.3. Узлы ребристо-кольцевых куполов

Узлы ребристых, ребристо-кольцевых, ребристо-кольцевых со связями куполов преимущественно построечного изготовления, отличаются массивностью, в основном на болтах, сварке или комбинированные. Для этих узлов трудно обеспечить центрацию усилий.

На рис. 3.4 представлены узлы ребристо-кольцевого купола диаметром 90 м, высотой подъема $1/7,2$ диаметра, со связями и ребрами в виде двухплоскостной трехшарнирной решетчатой арки [4].

На рис. 3.3, 3.5 представлены узлы ребристо-кольцевого купола со связями диаметром 36 м, высотой подъема $1/6$ диаметра и ребрами в виде сплошностенчатой трехшарнирной арки.

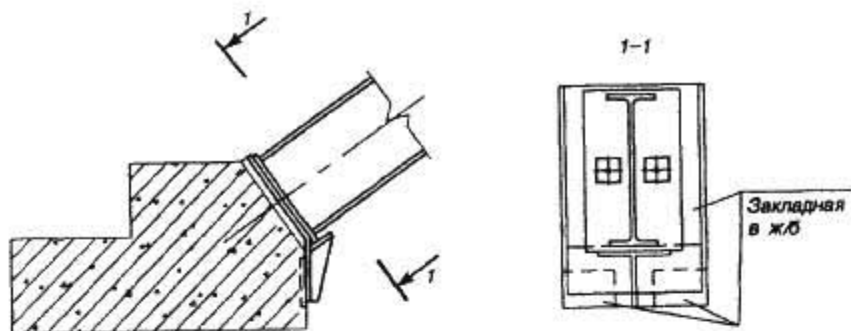


Рис. 3.3. Опорный узел ребристо-кольцевого купола со связями

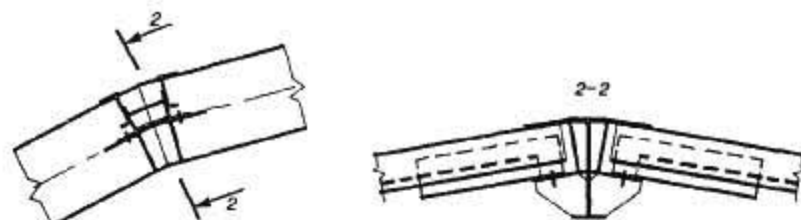


Рис. 3.5. Узел соединения ребра и кольца ребристо-кольцевого купола со связями

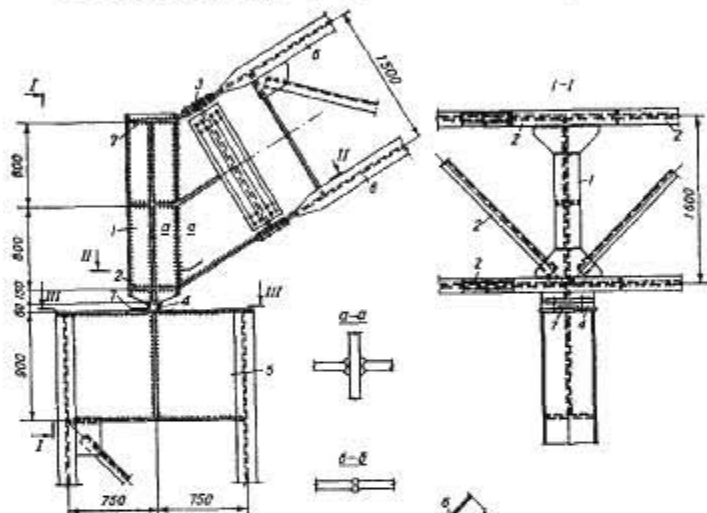
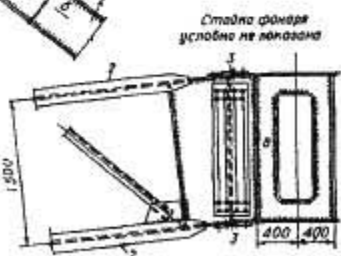
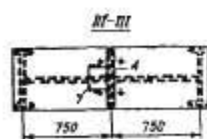
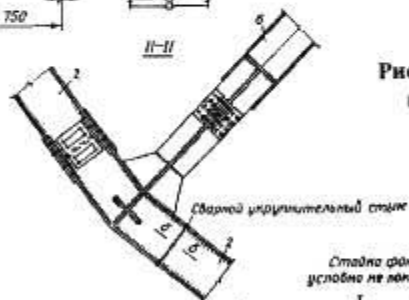


Рис. 3.4. Узлы ребристо-кольцевого купола



3.4. Узлы сетчатых куполов

Узлы сетчатых куполов существенно отличаются от узлов ребристых куполов, что связано как с особенностями формообразования этих конструкций, так и с условиями работы под нагрузкой. В однослойных сетчатых куполах следует применять узлы, обеспечивающие повышенную жесткость соединения в направлении нормали к поверхности, т.к. иначе возможно прощелкивание узлов под нагрузкой.

При проектировании сетчатых куполов часто используются узловое соединения, которые первоначально были разработаны для плоских перекрестно-стержневых структурных конструкций. В этих конструкциях длины всех элементов одинаковы, узловые детали однотипны. Количество типоразмеров конструктивных элементов определяется градацией сечений в зависимости от требуемой несущей способности. В сетчатых же куполах стержни каркаса незначительно отличаются по длине, имеют малый разброс расчетных усилий и поэтому могут быть запроектированы одного сечения. Однако стержни сетчатых оболочек в каждом из узлов имеют различную пространственную ориентацию. Использование при конструировании сетчатых куполов узлов типа «MERO» (рис. 3.6) [11], «Тридетик» (рис. 3.7) приводит к необходимости индивидуального изготовления большого количества типоразмеров узловых элементов, что возможно лишь с применением специализированного оборудования на основе металлообрабатывающих станков с программным управлением.

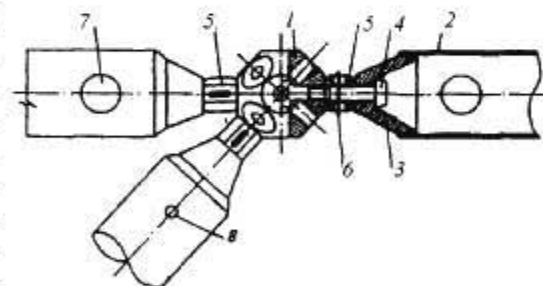


Рис. 3.6. Узловое соединение системы «MERO» (ФРГ):

1 - узловый сферический многогранник; 2 - трубчатый стержневой элемент; 3 - конический вкладыш; 4 - болт; 5 - поводковая втулка; 6 - поводковый палец; 7 - монтажное отверстие; 8 - сливное отверстие

В связи с этим при проектировании сетчатых куполов стремятся применять такие решения узловых соединений, которые обеспечивают возможность их использования не только при конкретных геометрических размерах, но и при отклонении этих размеров на определенную величину.

Этим требованиям безусловно удовлетворяет узел типа «Октаплатт» (рис. 3.8) с полым шаром, к которому приваривают торцы крупных труб.



Рис. 3.7. Комбинированное узловое сопряжение стержневых структурных плит «Триодетик»

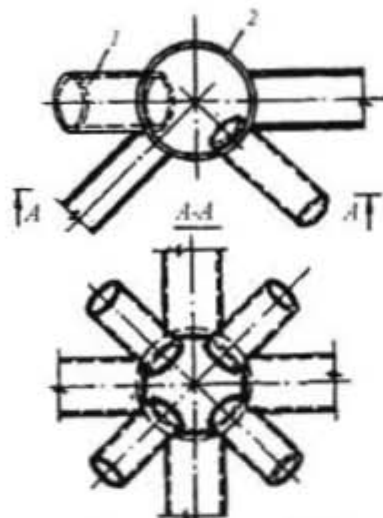


Рис. 3.8. Узел «Октаплатт» (ФРГ): 1 – стержни поясов; 2 – полый шар

Однако это соединение требует сборки конструкции на сплошных лежах, а главное, очень высокой точности изготовления и большого объема сварочных работ. Сварное узловое соединение типа «SDC» (рис. 3.9) в этом отношении предпочтительнее, так как допускает регулирование поясных элементов по длине.

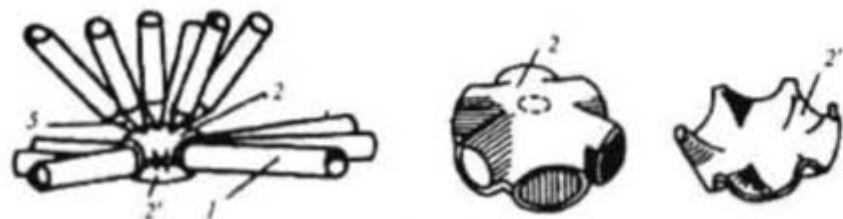


Рис. 3.9. Узел «SDC» (Франция):

1 – стержни пояса; 2 – нижняя узловая деталь; 2' – верхняя узловая деталь; 3 – раскосы

Достигается это тем, что узловой элемент, состоящий из двух половин, имеет патрубки, внутрь которых свободно вкладываются концы стержней. Для создания сетчатых оболочек может быть также использовано узловое соединение на ванной сварке типа «ЦНИИСК» (рис. 3.10).

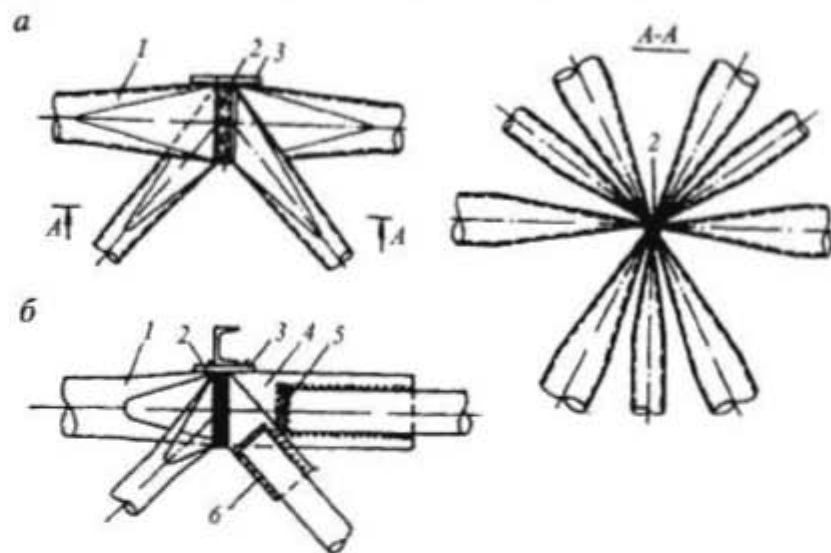


Рис. 3.10. Узловое соединение системы «ЦНИИСК» (СССР):

а – со сплюснутыми трубчатыми стержнями; б – комбинированное; 1 – трубчатый стержень; 2 – наплавленный металл; 3 – опорный лист; 4 – узловая фасонка; 5 – заглушка; 6 – ребро

Хорошим решением узла для сетчатых сферических куполов является узловое соединение типа «ИФИ» (рис. 3.11) [11].

В этом узловом соединении каждый стержень имеет сплюснутые концы, к которым приварены клиновидные наконечники. При сборке наконечники образуют в узле составной цилиндр, фиксируемый с помощью двух штампованных крышек и стяжного болта. Такое конструктивное решение обеспечивает соединение различного числа стержней независимо от их взаимного расположения. Недостатком является изготовление всех элементов конструкции с точностью, принятой в машиностроении, которая в 5...10 раз превышает обычную точность изготовления строительных металлоконструкций.

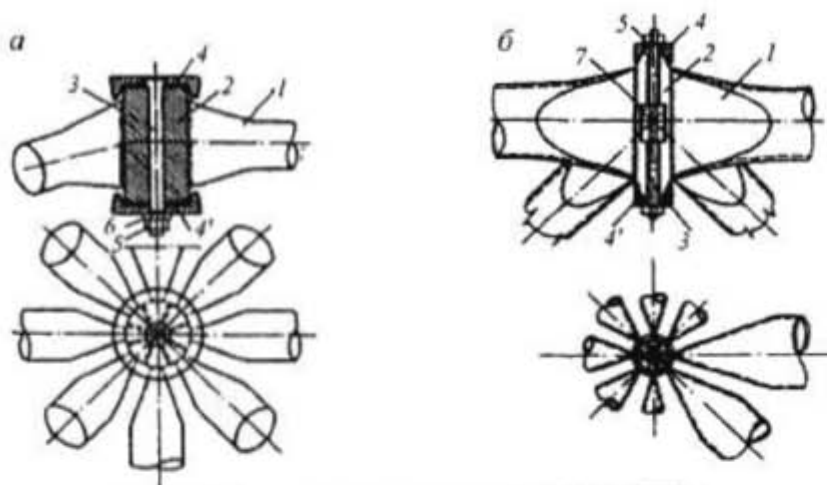


Рис. 3.11. Узловое соединение системы «НФИ» (ГДР):
 а - основной вариант; б - вариант с дополнительным вкладышем; 1 - трубчатый стержень; 2 - клиновидный наконечник; 3 - стяжной болт; 4, 4' - тарельчатая шайба; 5 - гайка; 6 - шайба; 7 - трубчатый вкладыш

3.5. Контрольные вопросы к главе 3

1. К каким последствиям приводит расцентровка стержней в узле?
2. По каким признакам можно классифицировать узлы куполов?
3. Как обычно опирается нижнее опорное кольцо на нижележащую опору?
4. Какова должна быть ориентация в плоскости осей катков нижнего опорного кольца?
5. Какова особенность узлов ребристых и ребристо-кольцевых куполов?
6. Какова основная деталь узла типа «МЕРО»?
7. Какова основная деталь узла типа «Октаплат»?
8. Какой способ соединения стержней в узле типа «ЦНИИСК»?
9. Основной недостаток узлов типа «ИФИ»?

4. РАСЧЕТ КУПОЛОВ

4.1. Ребристые купола

Ребристый купол при расчете на вертикальную, симметричную относительно оси купола нагрузку может быть расчленен на отдельные плоские арки, каждая из которых воспринимает нагрузку с приходящейся на нее грузовой площади. Если распор купола воспринимается опорным кольцом, то кольцо может быть заменено условной затяжкой, находящейся в плоскости каждой пары ребер, образующих плоскую арку [3].

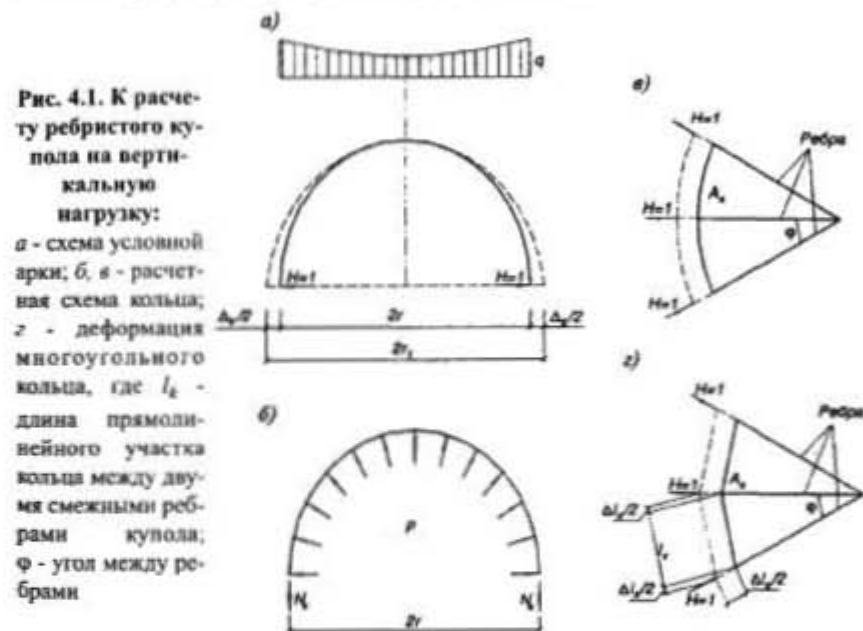


Рис. 4.1. К расчету ребристого купола на вертикальную нагрузку:

а - схема условной арки; б, в - расчетная схема кольца; z - деформация многоугольного кольца, где l_k - длина прямолинейного участка кольца между двумя смежными ребрами купола; φ - угол между ребрами

Площадь сечения условной затяжки принимается такой, чтобы ее упругие деформации были равны упругим деформациям кольца в диаметральной направлении от горизонтальных реакций всех ребер (рис. 4.1).

При частом расположении ребер купола действие их распоров на кольцо можно привести к равномерно распределенной нагрузке (см. рис. 4.1, б):

$$\rho = (nH) / (2\pi r); \quad (4.1)$$

где n - количество ребер в куполе; H - распор одного ребра (арки); r - радиус опорного кольца купола.

Тогда растягивающее усилие в кольце от единичных распоров

$$N_k = \rho r = n / (2\pi). \quad (4.2)$$

Увеличение длины кольца в результате растяжения

$$\Delta l_k = (N_k 2\pi r) / (E_k A_k) = (nr) / (E_k A_k). \quad (4.3)$$

Увеличение диаметра кольца Δk получаем из равенства $2\pi r + \Delta l_k = 2\pi r_1$, откуда

$$\Delta k = 2r_1 - 2r = (\Delta l_k) / \pi = (nr) / (\pi E_k A_k). \quad (4.4)$$

Удлинение условной затяжки от единичного распора арки (см. рис. 4.2, а)

$$\Delta z = 2r / (E_r A_r), \quad (4.5)$$

где $E_r A_r$ - жесткость сечения условной затяжки.

Приравняв удлинения условной затяжки к увеличению диаметра кольца

$$2r_1 / (E_r A_r) = (nr) / (\pi E_k A_k),$$

определяем площадь сечения условной затяжки

$$A_r = (2\pi A_k E_k) / (n E_r). \quad (4.6)$$

Если кольцо имеет вид многоугольника, то аналогичными выкладками можно получить площадь сечения условной затяжки, эквивалентной кольцу по упругим деформациям (см. рис. 4.1, з),

$$A_r = \frac{4r_1 E_k A_k}{l_k E_r} \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2}. \quad (4.7)$$

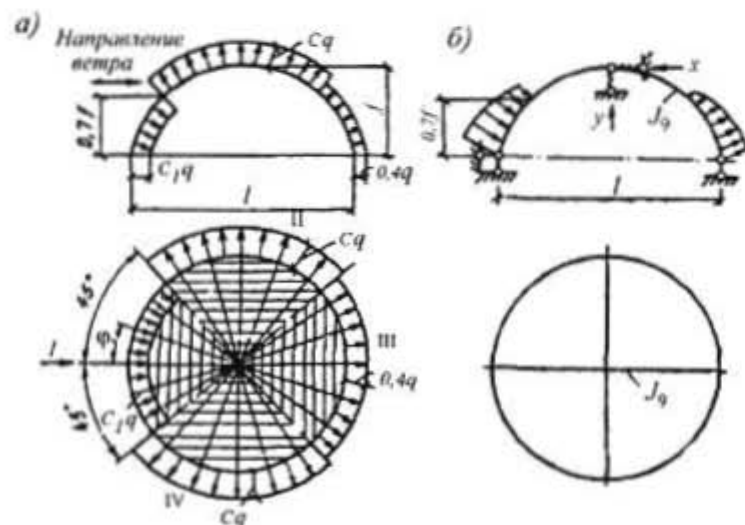


Рис. 4.2. К расчету ребристого купола на ветровую нагрузку: а - схема ветровой нагрузки; б - расчетная схема

Верхнее кольцо, работающее на сжатие, должно быть проверено на прочность

$$\sigma = N_k / A_{кв} = \rho_n r_n / A_{кв} \leq R \quad (4.8)$$

и на устойчивость

$$N_{кв} = \rho_n r_n \leq N_{кр} = (3EI_{кв}) / r_n^2, \quad (4.9)$$

где r_n , $A_{кв}$ - соответственно, радиус и площадь сечения верхнего кольца; $\rho_n = (nH) / (2\pi r_n)$ - действия распоров, приведенные к равномерному давлению; $I_{кв}$ - момент инерции сечения верхнего кольца относительно вертикальной оси.

При расчете купола на горизонтальную ветровую или несимметричную вертикальную нагрузку конструкцию расчленяют на диаметрально расположенные арки. Арка, получающая от нагрузки наибольшее горизонтальное смещение, испытывает упругий отпор арок, расположенных под углом к ней. Если для простоты расчета предположить, что горизонтальные сечения купола смещаются в горизонтальном направлении одно относительно другого без поперечных деформаций, то упругий отпор можно считать приложенным в ключе арки.

Схема воздействия нормальной составляющей ветровой нагрузки на купол изображена на рис. 4.2, а [4].

Таблица 4.1

Значения аэродинамических коэффициентов c и c_1

f/l	0,5	0,4	0,3	0,2
c	1,2	1,1	1	0,9
c_1	0,7	0,6	0,4	0,3

Аэродинамические коэффициенты даны в таблице 4.1. Купол разбивается на четыре квадранта: в первом и третьем квадрантах равнодействующая ветрового давления действуют в одном направлении и вызывают горизонтальное смещение; во втором и четвертом квадрантах ветер действует в противоположных направлениях и горизонтальных смещений купола не вызывает.

Наибольшее смещение получает расчетная арка, расположенная в плоскости равнодействующей ветрового давления в первом и третьем квадрантах.

Все арки, расположенные в первом и третьем квадрантах, можно рассматривать как одну эквивалентную арку с моментом инерции

$$I_3 = I \sum_m \cos \varphi_i, \quad (4.10)$$

где I - момент инерции одной арки; φ_i - угол наклона i -й арки к направлению равнодействующей ветровой нагрузки (см. рис. 4.2).

Сумма Σ относится ко всем аркам первого и третьего квадрантов (m - число арок). Эквивалентную арку рассчитывают на ветровое давление, приложенное только к части арки (две трети ее длины), примыкающей к опорам (см. рис. 4.2, б). Средняя часть арки по длине испытывает симметричный отсос, не влияющий на горизонтальное смещение. Арки, расположенные во втором и четвертом квадрантах, оказывают упругое противодействие перемещениям в ключе рассматриваемой эквивалентной арки.

Горизонтальная и вертикальная податливость ключевого сопряжения соответственно:

$$\Delta_x = \int \frac{M_x^2 dx}{I \sum \cos \varphi}; \quad (4.11)$$

$$\Delta_y = \int \frac{M_y^2 dx}{\sum I} = \int \frac{M_y^2 dx}{nl}, \quad (4.12)$$

где M_x, M_y - изгибающие моменты в арках от сил $x = 1$ и $y = 1$ (см. рис. 4.2); суммы Σ относятся к аркам второго и четвертого квадрантов (n - число арок).

Считая эквивалентную арку для простоты трехшарнирной, получим по методу сил систему уравнений для определения неизвестных реакций X и Y :

$$\left. \begin{aligned} \delta_{xx} X + \delta_{xy} Y + \delta_{px} &= \Delta_x X; \\ \delta_{yx} X + \delta_{yy} Y + \delta_{py} &= \Delta_y Y, \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

где $\delta_{xy} = \delta_{yx} = 0$; δ_{px} и δ_{py} - перемещения арки от ветровой нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{xx} &= \int \frac{M_x^2 dx}{EI} = \int \frac{M_x^2 dx}{EI \sum \cos \varphi}; \\ \delta_{yy} &= \int \frac{M_y^2 dx}{E \sum I} = \int \frac{M_y^2 dx}{mEI}; \\ \delta_{px} &= \int \frac{M_p M_x dx}{EI} = \int \frac{M_p M_x dx}{EI \sum \cos \varphi}; \\ \delta_{py} &= \int \frac{M_p M_y dx}{E \sum I} = \int \frac{M_p M_y dx}{mEI}; \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

Найдя X и Y из уравнений (4.13), легко можно определить опорные реакции в трехшарнирной статически определимой арке. Усилия, полученные для эквивалентной арки, распределяются по аркам первого и третьего

квадрантов пропорционально их приведенным жесткостям. В наиболее нагруженной арке, расположенной по направлению действия ветра, усилие может быть получено делением усилия в эквивалентной арке на величину $\sum \cos \varphi$.

4.2. Ребристо-кольцевые купола и ребристо-кольцевые со связями

В ребристо-кольцевых куполах кольцевые прогоны с ребрами составляют одну жесткую пространственную систему. В этом случае кольцевые прогоны не только работают на изгиб от реакции промежуточных ребер, но и воспринимают растягивающие или сжимающие кольцевые усилия.

Сечения купола, находящиеся в плоскостях кольцевых прогонов, не имеют свободных горизонтальных перемещений, так как они связаны между собой жесткими кольцами. Вес ребер в ребристо-кольцевой конструкции купола уменьшается благодаря включению в работу кольцевых прогонов. Наиболее простое конструктивное решение получается, когда ребра и кольцевые прогоны сделаны из прокатных профилей. В этом случае сопряжения ребер с прогонами можно конструировать по типу шарнирных сопряжений в балочных системах.

Кольцевые прогоны в ребристо-кольцевом куполе работают так же, как опорное кольцо в ребристом куполе, и могут быть заменены условными затяжками (рис. 4.3) [3]. Таким образом, при симметричной относительно оси купола нагрузке расчет купола можно вести, расчлняя его на плоские арки с затяжками на уровне кольцевых прогонов (см. рис. 4.1). Площадь сечений условных затяжек определяется по формулам (4.6) или (4.7).

Неизвестные усилия в затяжках проще всего определять методом сил, решая систему уравнений с N неизвестными, где N - число условных затяжек. При горизонтальных нагрузках ребристо-кольцевой купол рассчитывают так же, как и ребристый, условно считая, что сечения купола смещаются одно относительно другого без поперечных деформаций.

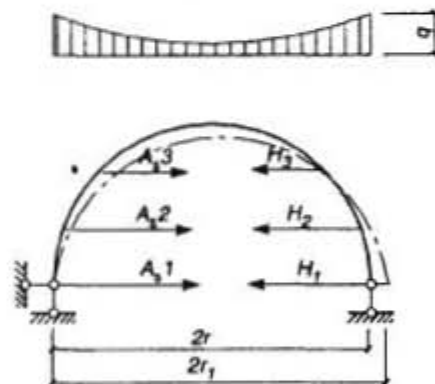


Рис. 4.3. К расчету ребристо-кольцевого купола на вертикальную нагрузку

4.3. Сетчатые и пластинчатые купола

Сетчатые купола обычно рассчитывают на прочность по упругой теории с последующей проверкой устойчивости конструкции. Пренебрегая перераспределением усилий в элементах конструкции вследствие неупругих деформаций, можно, пользуясь данными, полученными из упругого расчета, проверить прочность конструкции и подобрать сечения элементов.

Известно два основных подхода к расчету сетчатых куполов:

1. Сетчатый купол рассматривается как сплошная осесимметричная оболочка на основании того, что имеет сходство со сплошной оболочкой и работает как довольно толстая оболочка из сравнительно эластичного материала. На основании этого заменяют сетчатую конструкцию сплошной оболочкой, проводят расчет по безмоментной теории и затем осуществляют обратный переход к усилиям в дискретной системе. При этом определяются жесткостные свойства эквивалентной сплошной оболочки, имеющей ту же прочность на растяжение, изгиб и кручение, что и заданная сетчатая система. Перемещения точек сплошной оболочки совпадают с перемещениями узлов сетчатой оболочки. Преобразования полученных напряжений в сплошной оболочке в усилия в стержневой сетчатой системе основываются на условиях статического равновесия.

2. Сетчатый купол рассматривается как дискретная стержневая система и рассчитывается известными методами строительной механики стержневых систем. Этот подход реализуется с помощью ПЭВМ и использования программ статического расчета пространственных систем, таких как «Лира», «Спринг», «Парсек» и др.

Второй подход получил большее распространение в связи с широким использованием универсальных программ статического расчета на ПЭВМ.

Расчет купола по любому варианту начинается со сбора нагрузок. При определении расчетных значений нагрузки необходимо учитывать следующие коэффициенты перегрузки (см. табл. 4.2).

Снеговая нагрузка на 1 кв.м площади пола определяется по формуле:

$$p = p_0 c_1 c_2 \quad (4.15)$$

При расчете пластинчатых куполов используют те же программы и предпосылки что и для сетчатых куполов, но при этом расчетную схему компонуют из плоских (пластинчатых) конечных элементов. Значение C_1 по данным, рекомендуемым ЦНИИСКом, принимается по следующей зависимости (см. рис. 4.4, а):

$$C_1 = (2 + 5 \sin \psi) \sin \psi \operatorname{tg} \varphi \quad (4.16)$$

Эта зависимость учитывает перераспределение снега на покрытии под воздействием преобладающих зимних ветров. При значениях φ от 180 до

204° и от 336 до 360° формула дает отрицательные значения C_1 , абсолютная величина которых не превосходит 0,12; чтобы исключить эту условность, можно в указанных пределах изменения φ принять $C_1 = 0$.

Коэффициент C_2 равен единице при угле φ от 0 до 25° и $C_2 = 0$ при $\varphi = 60^\circ$ значение C_2 принимается по интерполяции.

Таблица 4.2

Численные значения коэффициентов перегрузки

Виды нагрузок	Коэффициенты перегрузки
Собственный вес куполов железобетонных, металлических и деревянных	1,1
Вес тепло- и гидроизоляции	1,2
Давления подвесных кранов, тельферов и другого подъемно-транспортного оборудования	1,2
Собственный вес площадок и временной нагрузки на них:	
при нормативной нагрузке до 2 кПа	1,4
то же, от 2 до 5 кПа	1,3
то же, 5 кПа и более	1,2
Снеговая нагрузка:	
при диаметре купола ≤ 50 м	1,4
то же, при диаметре купола > 50 м	1,6
Ветровая нагрузка	1,3

Значения p_0 принимаются в соответствии со СНиП. Кроме того, следует рассмотреть в расчете схему одностороннего загрузения купола, полагая левее диаметра CD коэффициент C_1 , равным 0, правее его вычисляют по формуле (4.16).

Нормативное значение ветровой нагрузки определяется в соответствии со СНиП по формуле

$$q_n^c = q_0 \cdot k \cdot c \quad (4.17)$$

где q_0 - скоростной напор; k - коэффициент, учитывающий изменение скоростного напора по высоте; c - аэродинамический коэффициент.

Схемы распределения ветровой нагрузки и значения аэродинамических коэффициентов можно взять такие же как при расчете ребристого купола (см. рис. 4.2, табл. 4.1).

Рассмотрим подробнее обсуждаемые методы расчета.

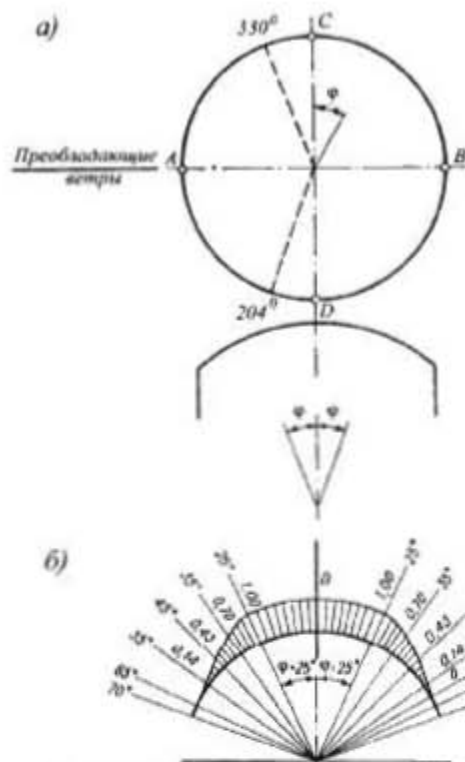


Рис. 4.4. Коэффициенты распределения снеговой нагрузки:
 α - к определению значения C_1 , β - значения коэффициента C_2

4.4. Расчет купола по безмоментной теории, как сплошной осесимметричной оболочки

Напряженное состояние купола может рассматриваться как безмоментное при выполнении следующих условий [2]:

1. К срединной поверхности купола приложена только непрерывно распределенная нагрузка, эта нагрузка может быть распределена равномерно или неравномерно, однако в последнем случае изменение интенсивности нагрузки должно быть плавным, не скачкообразным. Сосредоточенные нагрузки и нагрузки прерывные нарушают безмоментное напряженное состояние и вызывают появление моментов, по крайней мере, на участках, близких к местам приложения этих нагрузок.

2. Толщина стенки купола может быть постоянной или переменной, однако в последнем случае изменение толщины должно быть плавным, не скачкообразным.

3. Кривизна меридиана может быть постоянной или переменной, однако в последнем случае изменение кривизны должно быть плавным, не скачкообразным.

4. Устройство опор под опорным кольцом купола должно обеспечивать свободные радиальные и угловые перемещения опорного кольца.

Эти условия не всегда в полном объеме выполняются, однако как показывает практика, безмоментная теория для куполов умеренных прелетов дает приемлемые результаты.

Статический расчет куполов-оболочек производят по безмоментной теории, согласно которой для сферической оболочки при действии на нее осесимметричной нагрузки основное уравнение напряженного состояния имеет вид:

$$T_1 + T_2 = qR, \quad (4.18)$$

где T_1 - меридиональное усилие на единицу длины кольцевого сечения, T_2 - кольцевое усилие на единицу длины дуги меридиана; q - равномерно распределенное нормальное к поверхности купола давление, направленное к центру сферы; R - радиус сферического купола.

4.5. Определение усилий от собственного веса

Постоянная нагрузка от собственного веса g считается равномерно распределенной по всей поверхности купола (рис. 4.5, а). Для определения меридионального усилия T_1 рассмотрим равновесие верхней части купола, отсеченной горизонтальной плоскостью, проходящей на расстоянии r от центра сферы (рис. 4.5, а). На отсеченный сферический сегмент действует нагрузка от собственного веса вышележащей части купола

$$2\pi Rfg = 2\pi R(r - R \cos \varphi)g; \quad (4.19)$$

которая уравнивается проекцией на вертикальную ось меридиональных усилий T_1 , действующих по периметру кольцевого сечения радиусом $r = R \sin \varphi$,

$$T_1 2\pi r \sin \varphi = T_1 2\pi R \sin^2 \varphi; \quad (4.20)$$

отсюда меридиональное усилие на единицу длины кольца равно

$$T_1 = -\frac{gR(1 - \cos \varphi)}{\sin^2 \varphi} = -g \frac{R}{1 + \cos \varphi}. \quad (4.21)$$

Для тонкостенного купола-оболочки при числе меридианных ребер « m » и расстоянии между ними по длине дуги рассматриваемого горизонтального сечения « a » усилие в одном ребре в данном горизонтальном сечении определяется:

$$T_{1\text{реб}} = T_1 \cdot a. \quad (4.22)$$

Кольцевое усилие T_2 найдем из основного уравнения безмоментной сферической оболочки (4.18), выражая давление q через вертикальную нагрузку g , а T_1 через значение уравнения (4.21) $q = +g \cos \varphi$,

$$-q \frac{R}{1 + \cos \varphi} + T_2 = -g \cos \varphi R, \quad (4.23)$$

откуда кольцевое усилие на единицу длины меридиана

$$T_2 = -Rg \left(\cos \varphi - \frac{1}{1 + \cos \varphi} \right). \quad (4.24)$$

При угле $\varphi = 51^{\circ}49'$ кольцевое усилие меняет свой знак, переходя от сжимающего к растягивающему.

Усилия T_1 и T_2 , определенные по формулам (4.21) и (4.24), справедливы для сплошного замкнутого купола. Если в куполе имеется фонарное отверстие и масса фонаря более чем в 1,5 раза отличается от массы вырезанной части купола, то необходимо учесть нагрузку P_K (рис. 4.5, а), линейно распределенную по краю сечения фонарного выреза:

$$T_1 = -P_K (\sin \varphi_1 / \sin^2 \varphi); \quad (4.25)$$

$$T_2 = P_K (\sin \varphi_1 / \sin^2 \varphi). \quad (4.26)$$

Растягивающие усилия в опорном кольце от собственного веса купола можно определить по формуле

$$N_K = Q\varphi_0 / 2\pi g \varphi_0, \quad (4.27)$$

где $Q\varphi_0$ - масса купола.

$$Q\varphi_0 = 2\pi R^2 g (1 - \cos \varphi_0) \quad (4.28)$$

Для случая кольцевой нагрузки по фонарному вырезу:

$$N_K = P_K R \sin \varphi_1 \operatorname{ctg} \varphi_0. \quad (4.29)$$

4.6. Определение усилий от снеговой нагрузки

Интенсивность снеговой нагрузки по поверхности купола обычно принимают по закону косинуса $P = P_0 \cos \varphi$, где P_0 - равномерно распределенная нагрузка по проекции поверхности на горизонтальную плоскость [2].

Меридиональное усилие на единицу длины кольца в любом сечении имеет постоянное значение

$$T_1 = -\frac{\pi r^2 P_0}{2\pi r \sin \varphi} = -\frac{P_0 R}{2}, \quad (4.30)$$

Усилие на одно меридианное ребро составит

$$T_{1\text{реб}} = -\frac{P_0 R}{2} a. \quad (4.31)$$

Кольцевое усилие на единицу длины меридиана определится с учетом нормальной составляющей нагрузки в уровне кольцевого сечения $q = P_0 \cos^2 \varphi$ из уравнения (4.18)

$$T_2 = -qR + P_0 \frac{R}{2} = -\frac{1}{2} P_0 \cos 2\varphi. \quad (4.32)$$

Кольцевое усилие меняет знак при $\varphi = 45^\circ$. Усилие растяжения в опорном кольце

$$N_k = (P_0 R^2 / 4) \sin 2\varphi_0. \quad (4.33)$$

При действии на купол несимметричной нагрузки в оболочке, кроме меридиональных и кольцевых усилий, возникают сдвигающие усилия S . Расчет сферического купола на одностороннюю снеговую нагрузку, исходя из нормальной к поверхности купола нагрузки,

$$P = 0,4 P_0 (1 + \sin \varphi \sin \psi). \quad (4.34)$$

где P_0 - нагрузка на единицу площади горизонтальной поверхности; ψ - угол широты в плане нижнего круга сферического купола, отсчитываемый от диаметра, перпендикулярного направлению ветра, при котором получается одностороннее загрузеие (рис. 4.5, е):

$$T_1 = 0,4 P_0 R \left[\frac{1}{2} + \frac{\cos \varphi}{3 \sin^3 \varphi} (2 + \cos \varphi)(1 - \cos \varphi)^2 \sin \psi \right]; \quad (4.35)$$

$$T_2 = 0,4 P_0 R \left\{ \frac{1}{2} + \left[\sin \varphi - \frac{\cos \varphi}{3 \sin^3 \varphi} (2 + \cos \varphi)(1 - \cos \varphi)^2 \right] \sin \psi \right\}; \quad (4.36)$$

$$S = \frac{0,4 P_0 R}{3} \cdot \frac{(2 + \cos \varphi)(1 - \cos \varphi)^2}{\sin^3 \varphi} \cos \psi.$$

Определение усилий от ветровой нагрузки производят приближенно заменой действительной эпюры ветрового давления (рис. 4.5, з) суммой двух эпюр - симметричной (рис. 4.5, д)

$$q_B^{сим} = q_a^0 \cos^2 \varphi ,$$

где q_a^0 - расчетная нагрузка от давления ветра на вертикальную плоскость на уровне основания купола, и кососимметричной (рис. 4.5, ж) $q_a^{кос} = q_a^0 \sin \varphi \sin \Psi$.

Усилия от симметричной эпюры:

$$T_1^{сим} = -q_a^0 \frac{R}{3} \cdot \frac{1 + \cos \varphi + \cos^2 \varphi}{1 + \cos \varphi} ; \quad (4.37)$$

$$T_2^{сим} = -q_a^0 R \left[\cos^2 \varphi - \frac{1 + \cos \varphi + \cos^2 \varphi}{3(1 + \cos \varphi)} \right] ; \quad (4.38)$$

Усилия от кососимметричной эпюры ветрового давления:

$$T_1 = q_a^0 R \frac{\cos \varphi}{\sin^3 \varphi} \left(\frac{2}{3} - \cos \varphi + \frac{1}{3} \cos^3 \varphi \right) \sin \Psi ; \quad (4.39)$$

$$T_2 = q_a^0 R \left[\sin \varphi - \frac{\cos \varphi}{\sin^3 \varphi} \left(\frac{2}{3} - \cos \varphi + \frac{1}{3} \cos^3 \varphi \right) \right] \sin \varphi . \quad (4.40)$$

Кососимметричная нагрузка дает сдвигающие усилия, которые можно определить из табл. 4.3. [2].

Купольные покрытия обладают хорошей обтекаемостью. Поэтому при $f/l < 1/4$ достаточно учесть только симметричный отсос. Для купола с $f/l > 1/4$ следует принимать во внимание и кососимметричную ветровую нагрузку.

Таблица 4.3

Сдвигающие усилия в сферическом куполе при кососимметричной ветровой нагрузке

φ , град	Сдвигающие усилия S
10	$0,5 q_B^0 R (0,0356 \cos \psi - 0,0048 \cos 3\psi)$
30	$0,5 q_B^0 R (0,1165 \cos \psi - 0,0571 \cos 3\psi)$
50	$0,5 q_B^0 R (0,2134 \cos \psi - 0,1897 \cos 3\psi)$
70	$0,5 q_B^0 R (0,3506 \cos \psi - 0,4906 \cos 3\psi)$
90	$0,5 q_B^0 R (0,5657 \cos \psi - 1,3254 \cos 3\psi)$

Усилия сжатия в верхнем кольце купола

$$N_k = T_1 r_k \cos \varphi_k ; \quad (4.41)$$

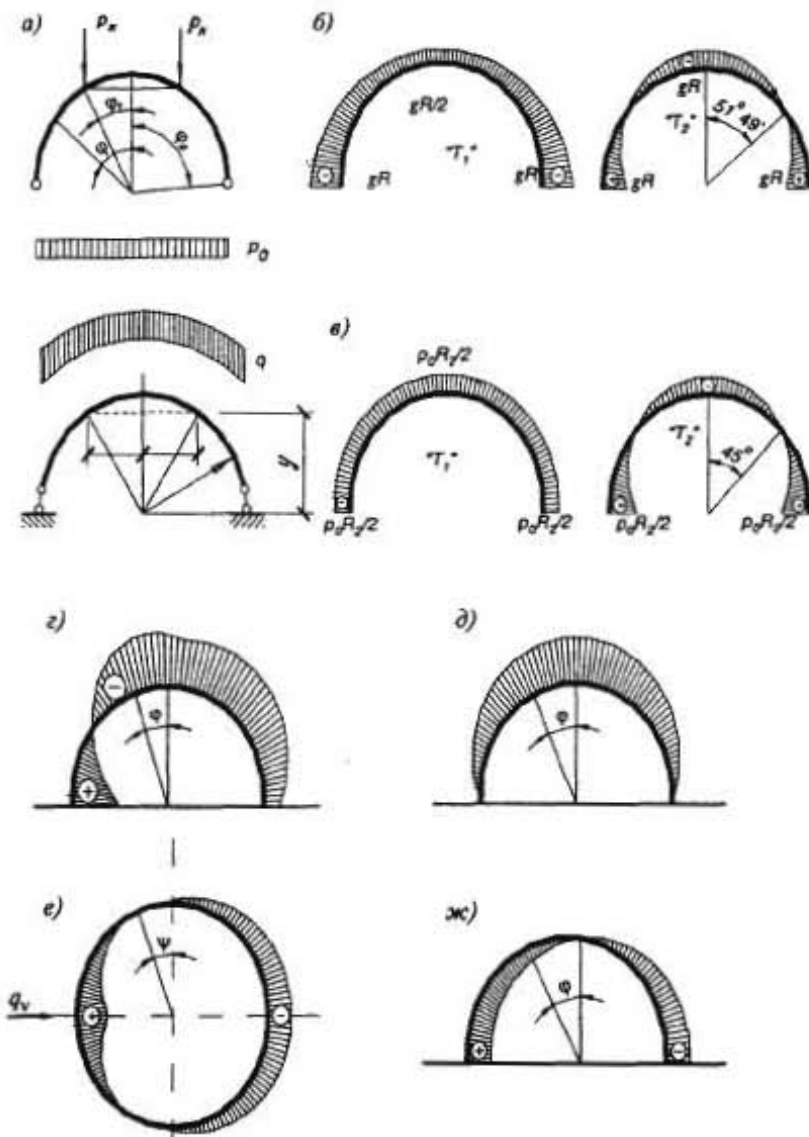


Рис. 4.5. Нагрузки и усилия в куполе-оболочке:

а - расчетная схема; б - эпюры меридиональных и кольцевых усилий от собственного веса купола; в - то же, от снеговой нагрузки; г, е, - эпюры ветрового давления на купол в поперечном сечении и в плане; д, ж - симметричная и кососимметричная эпюры ветрового давления на купол

проверка кольца на устойчивость:

$$\sigma_c = \frac{N_{sp}}{F_{sp}} = \frac{3E_k J_k}{r_k^2 F_k} \leq R_c, \quad (4.42)$$

где F_k, E_k, J_k, r_k - площадь поперечного сечения, модуль упругости материала, момент инерции и радиус кривизны кольца относительно вертикальной оси.

Критическое напряжение потери устойчивости сферической оболочки проверяют по формуле [4]

$$\sigma_{sp} = \frac{E\delta}{R\sqrt{3(1-\mu^2)}} \leq \sum \sigma_c, \quad (4.43)$$

где δ - толщина оболочки; E, μ - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала; $\sum \sigma_c$ - суммарное сжимающее напряжение от всех видов загрузки; R - радиус кривизны сферической оболочки.

Для сетчатых куполов рекомендуются следующие формулы перехода к сплошному аналогу:

$$E' = \frac{EA}{3iL}; E'' = \frac{4EJ}{3KL^2}; h' = 2\sqrt{3}i; h'' = \sqrt{3}Ka; \mu' = \mu'' = 1/3; \quad (4.44)$$

где (*) ; (**) относятся, соответственно, к однослойным и двухслойным куполам; E - модуль упругости; h - толщина оболочки; EJ - изгибная жесткость; μ - коэффициент Пуассона; A - площадь поперечного сечения стержня; i - радиус инерции стержня; L - длина стержня; a - шаг стержней; K - коэффициент, который определяется из условия, что KL соответствует высоте двухслойной оболочки.

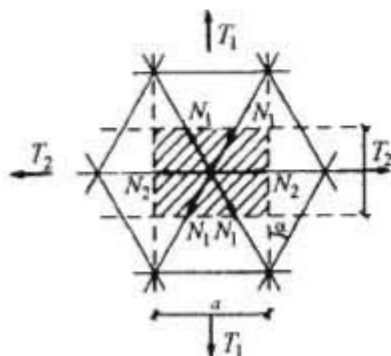


Рис. 4.6. К расчету сетчатого купола

Усилия в стержнях купола определяют умножением усилий T_1 и T_2 на соответствующие расстояния между стержнями в рассматриваемом сечении купола и проектирование их на направления стержней (рис. 4.6).

Усилие в стержне меридионального направления

$$N_1 = (T_1 a) / (2 \cos a). \quad (4.45)$$

Усилие в кольцевом стержне

$$N_2 = T_2 b. \quad (4.46)$$

Помимо осевых усилий N_1 и N_2 в стержнях могут возникать изгибающие моменты от местной нагрузки.

Чтобы избежать потери устойчивости в вертикальной плоскости, момент инерции стержней должен удовлетворять условию:

$$I \geq (T_1 R a) / (0.5 E) \sqrt{(T_1 R) (0.5 E)}. \quad (4.47)$$

4.7. Определение краевых усилий в месте сопряжения купола с опорным кольцом

В зависимости от толщины оболочки разделяются: на тонкостенные и толстые. Оболочки, для которых справедливо условие $\delta/r_1 = \delta/r_2 \leq 1/20$, считаются тонкими. Здесь δ - толщина оболочки и r_1, r_2 - радиусы кривизны.

Для купольных покрытий наиболее распространены тонкостенные оболочки; в дальнейшем рассматриваются тонкостенные купола-оболочки, для которых справедлива безмоментная теория на всем участке, кроме сравнительно узкой зоны в месте примыкания оболочки к опорному кольцу, где деформациям статически определимой оболочки препятствуют опорные закрепления. В этих местах возникают краевые поперечные силы и изгибающие моменты (краевой эффект). Эти усилия могут быть определены обычными методами строительной механики (рис. 4.7) [4]:

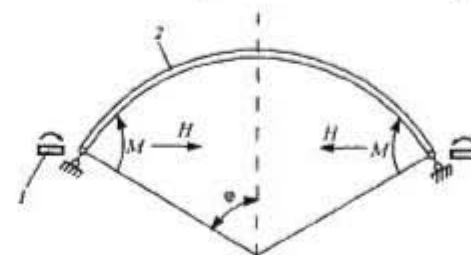


Рис. 4.7. Расчетная схема купола для определения усилий краевого эффекта: 1 - опорное кольцо; 2 - оболочка купола

Ниже приводится решение такой задачи методом сил; значение величин перемещений приведено в табл. 4.4.

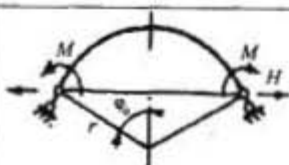
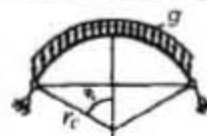
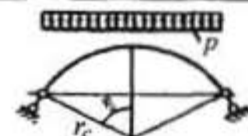
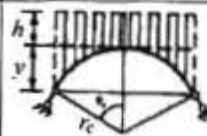
$$\left. \begin{aligned} a_{11}M + a_{12}H + a_{10} &= 0 \\ a_{21}M + a_{22}H + a_{20} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (4.48)$$

здесь $a_{11} - Ei_n$ - кратный взаимный угол поворота в рассматриваемом сечении от $M = 1$ по направлению этого момента; $a_{12} - Ei_n$ - то же, от $H = 1$. Ес-

ли этот угол совпадает по направлению с углом поворота, вызванным $M = 1$ (т. е. a_{11}), то он принимается со знаком плюс, если нет - то со знаком минус; $a_{21} - E I_n$ - кратное взаимное перемещение от $M = 1$; $a_{21} = a_{12}$ (правило знаков то же); $a_{22} - E I_n$ - кратное взаимное перемещение от $H = 1$ по направлению силы H ; $a_{10} - E I_n$ - кратный взаимный угол поворота в этом же сечении, вызванный внешней нагрузкой (знак принимается положительным, если угол поворота совпадает по направлению с a_{11}); $a_{20} - E I_n$ - кратное взаимное перемещение, вызванное внешней нагрузкой (знак принимается положительным, если перемещение совпадает по направлению с H).

Таблица 4.4

Значения $E I_n$ кратных перемещений $a_{11}, a_{12}, a_{22}, a_{10}, a_{20}$ для расчета оболочек методом сил

Форма оболочки	Основная система	Единичные перемещения
Сфера		При постоянном сечении оболочки $a_{11} = A$ $a_{12} = (A^2/2) \sin \varphi_0$ $a_{22} = (A^3/2) \sin^2 \varphi_0$
Перемещение от нагрузки		
собственный вес при постоянном сечении g , Па	вертикальная распределенная на горизонтальную проекцию p , Па	постоянное давление жидкости с объемным весом, γ
 $a_{10} = \frac{g A^4}{2 r_c} \sin \varphi_0$ $a_{20} = \frac{g A^4}{4} \times$ $\times \left(\cos \varphi_0 - \frac{1}{1 + \cos \varphi_0} \right) \sin \varphi_0$	 $a_{10} = \frac{3 p A^4}{8 r_c} \sin 2 \varphi_0$ $a_{20} = \frac{p A^4}{8} \sin \varphi_0 \cos 2 \varphi_0$	 $a_{10} = \gamma \frac{A^4}{4} \sin \varphi_0$ $a_{20} = \frac{A^4}{4 r_c} N_{20} \sin \varphi_0$

Учет краевого эффекта для сферической оболочки;

$$a_{11} = A + (I_n r_c^2 \sin^2 \varphi_0) I_x; \quad (4.49)$$

$$a_{12} = (A^2 / 2) \sin \varphi_0; \quad (4.50)$$

$$a_{22} = (A^3 / 2) \sin^2 \varphi_0 + (I_n r_c^2) F_k \sin^2 \varphi_0. \quad (4.51)$$

Постоянная нагрузка - собственный вес:

$$a_{10} = \left[A^4 \frac{q}{2 r_c} \right] \sin \varphi_0; \quad (4.52)$$

$$a_{20} = (A^4 q / 4) [\cos \varphi_0 - 1 / (1 + \cos \varphi_0)] \sin \varphi_0 + (I_n / F_k) \eta r_c^3 (1 - \cos \varphi_0) \cos \varphi_0. \quad (4.53)$$

Снеговая нагрузка:

$$a_{10} = 3 A^4 p \sin 2 \varphi_0 / 8 r_c; \quad (4.54)$$

$$a_{20} = (A^4 p / 8) \sin \varphi_0 \cos 2 \varphi_0 + [(I_n p r_c^3) / 4 F_k] \sin 2 \varphi_0 \sin \varphi_0. \quad (4.55)$$

В случае, когда кольцо опирается на специальную кольцевую балку, угол поворота кольца равен нулю и в формуле (4.49) второй член пропадает.

В случае шарнирного опирания купола на кольцо в уравнении (4.48) $M = 0, a_{12} = 0, a_{10} = 0$, и уравнение приобретает вид

$$a_{22} H + a_{20} = 0; \quad (4.56)$$

откуда

$$H = -a_{20} / a_{22}. \quad (4.57)$$

Значение величины коэффициента A для гладких куполов определяется по формуле:

$$A = 0,76 \sqrt{\delta r_c}. \quad (4.58)$$

В общем случае любой оболочки вращения опорное кольцо воспринимает усилия, передаваемые на него меридиональными усилиями оболочки - горизонтальными проекциями усилий N_1 , т. е. распор:

$$q_{расп} = N_1 \cos \varphi_0. \quad (4.59)$$

В кольце возникает растягивающее усилие:

$$H = q_{расп} z_c \sin \varphi_0 = N_1 z_c \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 = N_1 z_c (\sin 2 \varphi_0 / 2). \quad (4.60)$$

Перемещение кольца от усилия H , увеличенное в $E_s J$ раз:

$$a_{20} = (I_n / F_k) H r_c \sin \varphi_0 = (I_n / 2F_k) N_1 r_c^2 \sin 2\varphi_0 \sin \varphi_0 ; \quad (4.61)$$

В табл. 4.4 приведены значения перемещения кольца a_{20} для различных загружений сферического купола.

Значение величин a_{11} , a_{12} , a_{22} для кольца, приведенные в табл. 4.4, остаются верными для любой оболочки вращения.

Определив из уравнения (4.48) значения моментов и кольцевых усилий, можно найти их значения по длине меридиана оболочки по формулам:

$$M_\lambda = M\eta_1 + (M + AH \sin \varphi)\eta_2 ; \quad (4.62)$$

$$N_{2\lambda} = N_2 + (2r / A^2) [M\eta_2 - (M + AH \sin \varphi)\eta_1] ; \quad (4.63)$$

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

где N_2 - кольцевое усилие в безмоментной оболочке; $M\lambda$ и $N\lambda$ - соответственно интенсивности момента и кольцевого усилия в произвольной точке оболочки; M и H - краевые значения момента и распора, полученные из уравнения (4.48); $\lambda = s/A$ (отсчет s - длина дуги - или λ ведется от края, к которому приложены M и H); r - радиус кривизны срединной поверхности - длина нормали к поверхности до оси вращения, для сферической оболочки $r = r_c$.

Значение функций η_1 и η_2 приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

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	—	—	—

4.8. Расчет купола как дискретной стержневой системы

Расчет выполняется по пространственным расчетным схемам с учетом реального нагружения на ПЭВМ. При этом существует возможность учесть все виды нагрузок: постоянные, технологические, снеговые, ветровые, сейсмические и др. - возможен расчет на температурные воздействия.

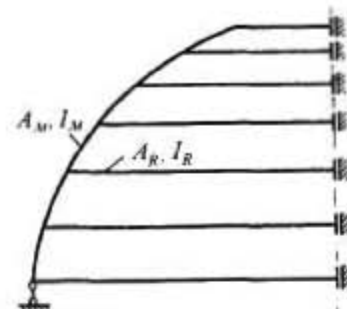


Рис. 4.8. Плоская расчетная схема звездчатого купола

На ранних стадиях проектирования сетчатых куполов для предварительной оценки усилий возможно использование приближенных методов. В частности расчет сетчатого купола со звездчатой схемой на осесимметричные нагрузки также может быть выполнен по плоской расчетной схеме (рис. 4.8) [10].

Приведенные площади и моменты инерции условных меридиональных ребер:

$$A_m = 2A_k \cos^3 \gamma ; I_m = 2I_k \cos^3 \gamma , \quad (4.64)$$

где γ - угол между осью стержня и плоскостью меридиана; A_k, I_k - площадь и момент инерции сечения наклонного стержня пространственной схемы.

Максимальные усилия в стержнях сетчатого сферического купола с треугольными ячейками могут быть определены по формуле:

$$N = k_1 \cdot q \cdot R \cdot l , \quad (4.65)$$

где k_1 - коэффициент, определенный по таблице 4.6 в зависимости от угловой координаты стержня φ , отсчитываемой от вертикальной оси; q - интенсивность расчетной нагрузки; R - радиус кривизны купола; l - длина стержня.

Таблица 4.6

φ , град	Нагрузка					
	постоянная		снеговая		Ветровая	
	Сжатие	Растяжение	Сжатие	Растяжение	Сжатие	Растяжение
0	-0,288	-	-0,288	-	-0,247	+0,94
15	-0,31	-	-0,308	-	-0,271	+0,94
30	-0,368	-	-0,36	-	-0,285	+0,94
45	-0,472	0,06	-0,433	+0,146	-0,294	+0,94
60	-0,625	+0,337	-0,577	+0,558	-0,304	+0,94
75	-0,56	+0,69	-0,33	+0,56	-0,63	+0,71
90	-0,62	+1,15	-0,31	+0,48	-0,53	+0,74

Переход от усилий в стержнях условной плоской расчетной схемы к усилиям в стержнях реальной пространственной схемы осуществляется по формулам:

для наклонных стержней

$$N_h = N_m / (2 \cos \gamma); M_h = M_m / (2 \cos \gamma), \quad (4.66)$$

для кольцевых стержней

$$N_k = N_z / [2 \sin(\pi/n)]; \quad (4.67)$$

$$M_k = M_R / [2 \sin(\pi/n)]. \quad (4.68)$$

При рабочем проектировании куполов всех типов обязательной является проверка степени геометрической нелинейности несущей конструкции, выполняемая путем расчета конструкции по пространственной схеме с учетом упругих перемещений узлов на действие наиболее неблагоприятного сочетания нагрузок. Усилия в элементах каркаса, полученные его расчетом по деформированной схеме, будут превышать усилия линейного расчета. Необходимо стремиться к тому, чтобы это превышение было меньше 10...15%.

Основным конструктивным приемом, повышающим жесткость конструкции, является высота сечения элементов. Высота сечения ребер ребристо-кольцевых куполов не должна быть меньше 1/50 радиуса кривизны. Для сетчатых куполов это отношение может быть уменьшено до 1/200...1/250.

На начальных стадиях проектирования степень геометрической нелинейности конструкции сетчатого сферического купола может быть оценена соотношением суммарной расчетной нагрузки и верхней критической, вычисляемой по формуле [6]:

$$P_{kp} = 4,9 p \frac{EA}{lR^2} * i, \quad (4.69)$$

где E - модуль упругости материала; A - площадь сечения стержня (для двухсетчатых куполов суммарная площадь двух поясов); i - радиус инерции в радиальной плоскости; l - средняя длина стержня; R - радиус кривизны поверхности; p - параметр, учитывающий снижение критической нагрузки за счет возможных отклонений формы поверхности от номинальной, который определяется по графику рис. 4.9 в зависимости от параметра начального отклонения, ξ_0 , вычисляемого для куполов с жесткими углами по формуле:

$$\xi_0 = 0,15\delta / \beta i, \quad (4.70)$$

где δ - допуск при изготовлении отдельных стержней; $\beta = l/(2R)$ - угол наклона стержней к касательной плоскости в узле.

Формула (4.69) выведена в предположении упругой работы материала конструкции и поэтому не может быть непосредственно использована при проверке общей устойчивости относительно толстостенных стержневых оболочек.

Верхняя критическая нагрузка сетчатого купола, вычисленная по формуле (4.69), должна, как правило, в 5...10 раз превышать осредненную расчетную нагрузку.

Для сетчатого купола с жесткими узлами в радиальной плоскости приближенная методика подбора сечений стержней, обеспечивающая общую устойчивость конструкции, заключается в следующем.

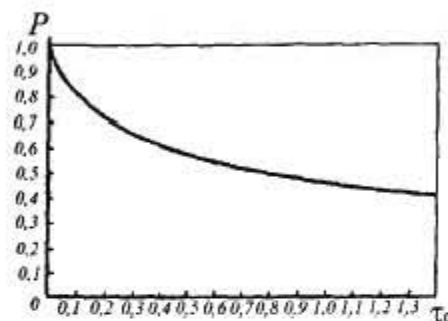


Рис. 4.9. Зависимость параметра верхней критической нагрузки от глубины начальной погиби

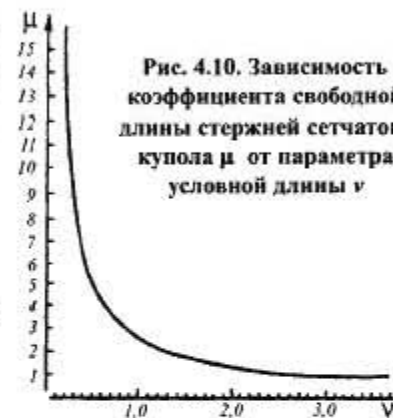


Рис. 4.10. Зависимость коэффициента свободной длины стержней сетчатого купола μ от параметра условной длины ν

Расчетная длина сжатого стержня каркаса

$$l_{ef} = \mu l, \quad (4.71)$$

где l - геометрическая длина, равная расстоянию между узлами; μ - коэффициент свободной длины, определяемый по графику рис. 4.10 в зависимости от параметра условной длины стержня

$$\nu = l / \sqrt{Ri}. \quad (4.72)$$

Проверка несущей способности внецентренно сжатого стержня может быть выполнена в соответствии со СНиП на расчетные усилия, полученные из линейного расчета.

При $\nu > 3$ коэффициент свободной длины равен единице. Это означает, что при соответствующих соотношениях кривизны поверхности, изгибной жесткости стержня и его длины каждый узел является не упругоподатливой, а абсолютно жесткой опорой. Такие купола могут быть запроектированы с шарнирными узлами.

Потеря устойчивости шарнирно-стержневых сегчатых куполов заключается в продавливании к центру кривизны одного из наиболее нагруженных узлов. Критическая узловая нагрузка

$$P_{cr} = 2EA\beta^3 p, \quad (4.73)$$

где E и A - модуль упругости и площадь сечения стержня; $\beta = l/(2R)$ - угол наклона стержней к касательной плоскости в узле; p - параметр снижения критической нагрузки, учитывающей неравномерность нагружения узлов и начальные отклонения от исходной сферической поверхности.

Параметр p есть максимальное значение функции

$$P_0 = \frac{\xi(1-\xi_0-\xi)(2-2\xi_0-\xi)}{1(1-m)+2(2m+1)(\xi_0+\xi)} \quad (4.74)$$

при изменении ξ , в интервале $0 \leq \xi \leq 1$,

где $\xi = \alpha/\beta$ - безразмерный параметр прогиба узла; $\xi_0 = \alpha_0/\beta$ - безразмерный параметр начального прогиба узла; $m = P_2/P_1$ - параметр неравномерности нагружения соседних узлов, α - угол поворота стержня в радиальной плоскости в процессе деформирования; α_0 - начальный угол поворота стержня по отношению к номинальному положению; P_1 - нагрузка на рассматриваемый узел; P_2 - нагрузка на соседний узел.

Начальные неправильности формы, заключающиеся в отклонении отдельных узлов от исходной сферической поверхности, возникают в результате неточности изготовления отдельных стержней. Расчетное значение параметра ξ_0 для куполов с шарнирными углами можно вычислить по формуле

$$\xi_0 = 0,65 \frac{\delta}{\beta^2 l}, \quad (4.75)$$

где δ - допуск при изготовлении отдельных стержней; l - длина стержня.

Коэффициенты неравномерности нагружения для постоянной и ветровой нагрузок близки к единице. Коэффициент неравномерности для снеговой нагрузки может быть принят 0,5.

Параметр P и соответствующее значение ζ_{cr} могут быть определены по графику рис. 4.11 [6].

Сплошные кривые на этом графике представляют собой линии равных значений параметра p в зависимости от ζ_0 и m , а пунктирные кривые - линии равных значений параметра прогиба ζ_{cr} , соответствующего верхней

критической нагрузке. Например, для $\zeta_0 = 0,14$ и $m = 0,24$, $p = 0,165$ и $\zeta_{cr} = 0,31$.

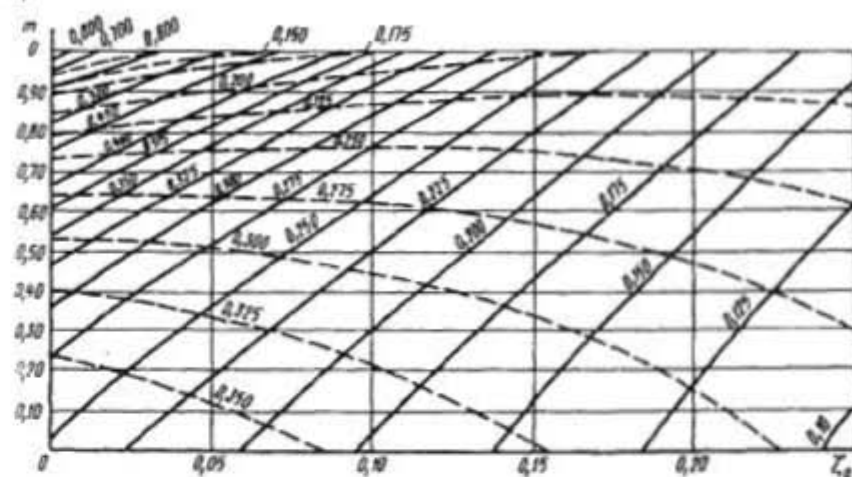


Рис. 4.11. Зависимость коэффициента снижения критической нагрузки от параметров начального отклонения узлов ζ_0 и неравномерности нагрузки m

Максимальная узловая нагрузка должна быть меньше критической, вычисленной по формуле (4.72):

$$P < P_{cr}. \quad (4.76)$$

Однако это условие является необходимым, но не достаточным. Любые угловые перемещения стержней ($\alpha > 0$) приводят к увеличению усилий в них, что необходимо учитывать при проверке несущей способности. Коэффициент возрастания продольной силы может быть вычислен по формуле:

$$k = 1/(1-\xi_0-\xi). \quad (4.77)$$

Значение ζ определяется из решения уравнения (4.74) при $p = P/P_{cr}$, где P - расчетная узловая нагрузка. Проверка устойчивости каждого стержня должна выполняться на расчетные усилия, полученные в упругой стадии, умноженные на коэффициент k . Как уже отмечалось выше, не следует допускать значений коэффициента нелинейного возрастания усилий более 1,1...1,15. Рекомендуется также принимать гибкость стержней не более $\lambda = 80...90$, в противном случае необходимо дополнительно учитывать влияние снижения их продольной жесткости на величину критической нагрузки.

4.9. Контрольные вопросы к главе 4

1. Какова расчетная схема ребристого купола?
2. Какова расчетная схема ребристо-кольцевого купола?
3. Можно ли рассчитывать сетчатый купол как сплошную оболочку?
4. Можно ли рассчитывать сетчатый купол как стержневую систему?
5. Применяется ли безмоментная теория расчета оболочек при расчете сетчатого купола?
6. Проверяется ли нижнее опорное кольцо на устойчивость?
7. Что такое краевой эффект в оболочке?
8. Возможно ли использовать плоскую расчетную схему при расчете сетчатого купола?
9. Каковы должны быть соотношения между высотой сечения стержня и радиусом кривизны оболочки для сетчатого купола?

5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КУПОЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ)

5.1. Способы создания предварительного напряжения в куполах

Одним из эффективных способов повышения экономичности металлических конструкций является предварительное напряжение.

Предварительное напряжение применяют с целью снизить расход металла и стоимость металлических конструкций. В ряде случаев предварительное напряжение позволяет также регулировать деформации, повышать жесткость и устойчивость металлических конструкций и сооружений. К предварительно напряженным относят такие металлические конструкции из стали или алюминиевых сплавов, в которых искусственным путем в процессе изготовления или монтажа (а при усилении существующих конструкций и во время эксплуатации) создаются собственные (начальные) напряжения, преимущественно противоположные по знаку напряжениям от расчетной нагрузки, или перераспределяются усилия с целью более рационального использования несущей способности конструкции.

Смысл и эффект предварительного напряжения конструкции во многих случаях заключается в расширении ее упругой стадии работы [12].

Действительно, если в стержне или другой более сложной конструкции создать предварительное напряжение σ_0 обратного знака напряжениям от эксплуатационной нагрузки, то приложение внешних нагрузок сначала погасит предварительное напряжение, затем разовьются основные напряжения, которые могут безопасно возрастать до величины расчетного сопротивления материала. Таким образом, область упругой работы материала в опасном сечении расширится на величину $\sigma_0 F$ для центрально сжатого и растянутого стержня (рис. 5.1) или на величину $\sigma_0 W$ для изгибаемой балки, подвергнутой обратному выгибу.

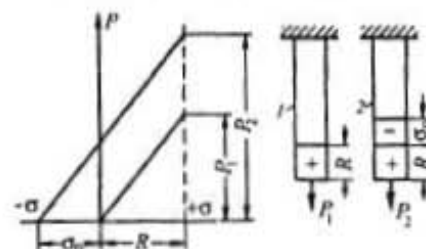


Рис. 5.1. Расширение упругой области работы материала растянутого стержня, предварительно подвергнутого сжатию: 1 - стержень без предварительного напряжения; 2 - предварительно напряженный стержень; $P_1 = FR$; $P_2 = F(\sigma_0 + R)$; $P_2 > P_1$

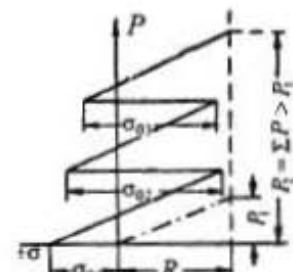


Рис. 5.2. Работа стержня при многоступенчатом напряжении: P - ступени нагрузки; σ_{01} , σ_{02} , σ_{03} - ступени предварительного напряжения

Еще больший эффект может дать многоступенчатое напряжение (рис. 5.2), при котором предварительное напряжение и загрузка конструкции осуществляются в несколько циклов. Например, сначала создается первая ступень предварительного напряжения, затем прикладывается первая ступень нагрузки, при которой напряжения в опасном сечении приближаются к расчетному сопротивлению материала, после этого в этой же последовательности повторяются второй и последующие циклы «напряжение – нагрузка». В результате нескольких циклов суммарная нагрузка, которую может выдержать конструкция, окажется в несколько раз больше той, которую выдержит та же конструкция без предварительного напряжения. Следует иметь в виду, что многоступенчатое напряжение возможно только при преобладании постоянной нагрузки над временной при условии, что постоянная нагрузка может расчленяться на части, равные ступеням нагрузки. При многоступенчатом напряжении временная нагрузка составляет только последнюю ступень нагрузки.

К настоящему времени определились проверенные практикой три направления в развитии металлических предварительно напряженных решетчатых конструкций: первое – конструкции, напрягаемые с помощью отдельных высокопрочных стальных стержней – затяжек; второе – конструкции, выполненные полностью из стальных канатов (сюда примыкают и комбинированные вантовые конструкции с балками жесткости), и третье – конструкции без использования высокопрочной стали, напряжение которых достигается различными приемами (подтяжкой консолей, регулированием уровня опор, напряжением обшивки и т.д.).

Для купольных конструкций наиболее подходящим является способ напряжения с помощью высокопрочных затяжек. В ребристых, ребристо-кольцевых куполах затяжки соединяют опорные части одноименных арок, что позволяет передать значительную часть распора на затяжки и тем самым существенно облегчить опорное кольцо купола. Для включения затяжек в работу производится их предварительное натяжение с упором на опорный узел ребра (опорное кольцо). Возможно дальнейшее предварительное натяжение затяжек с целью создания разгружающего напряженного состояния в ребрах по отношению к эксплуатационной нагрузке. Целесообразное усилие предварительного напряжения определяется статическим расчетом арки с затяжкой.

В сетчатых куполах также возможно применение высокопрочных затяжек с целью создания предварительного напряжения.

Известно предварительное напряжение отдельных ячеек сетчатых куполов (рис. 5.3). По первому варианту конструктивного решения (рис. 5.3, а) система двух поясная, по второму варианту (рис. 5.3, б) – одно-поясная.

Пространственная жесткость ячейки во втором варианте создается с помощью центральной распорки. При такой конструкции оболочки используется принцип концентрации материала, где основные сжимающие усилия

воспринимаются контурными стержнями, составляющими одну треть от всех стержней, а радиальные затяжки играют вспомогательную роль восприятия усилий от неравномерного нагружения. Применение в затяжках стяжных муфт для изменения их длины дает возможность унификации конструктивных элементов, сводя количество типоразмеров до двух – трех.

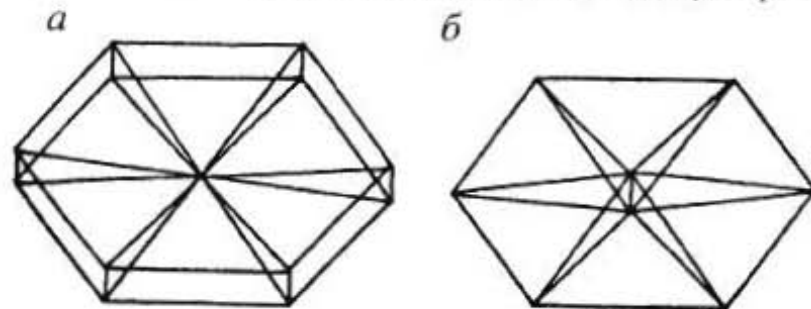


Рис. 5.3. Предварительно напряженные ячейки сетчатого купола
а – двух поясная система; б – однопоясная система

Возможно предварительное напряжение сетчатого купола с помощью пространственной шпренгельной системы, состоящей из высокопрочных затяжек и стоек-распорок между жестким каркасом купола и затяжками (рис. 5.4).

Формообразование сферической верхней сетки выполняется по известным методам разрезки сферической поверхности, рассмотренным в главе 3.

Пространственная шпренгельная система состоит из разреженной гибкой нижней сетки и стоек-распорок между сетками. Нижняя сетка выполняется из высокопрочных ($R_{тн} = 120-180$ МПа) стальных затяжек-канатов или арматурных стержней и служит для создания предварительного напряжения и восприятия части распора при действии эксплуатационных нагрузок. Форма нижней сетки может быть плоской, когда стойки-распорки отсутствуют или обратно выпуклой (вогнутой) по отношению к верхней сетке. Некоторые схемы разрезки нижней сетки представлены на рис. 5.5.

Кривизна нижней сетки определяется длиной стоек-распорок. Нижняя сетка всегда растянута, что позволяет полностью использовать высокую прочность затяжек. Схема нижней сетки выбирается таким образом, чтобы число затяжек было минимальным, но в то же время было обеспечено равномерное обжатие опорного контура во время предварительного напряжения и размещение необходимого количества стоек-распорок.

Стойки-распорки стабилизируют форму нижней сетки, повышают жесткость всей конструкции, создают дополнительный разгружающий эффект при предварительном напряжении. Стойки располагаются в опорных узлах нижней сетки. Количество стоек определяется схемой нижней сетки,

оптимальным разгружающим эффектом при предварительном напряжении и условиями обеспечения и повышения устойчивости определенных областей верхней сетки при эксплуатационных нагрузках.

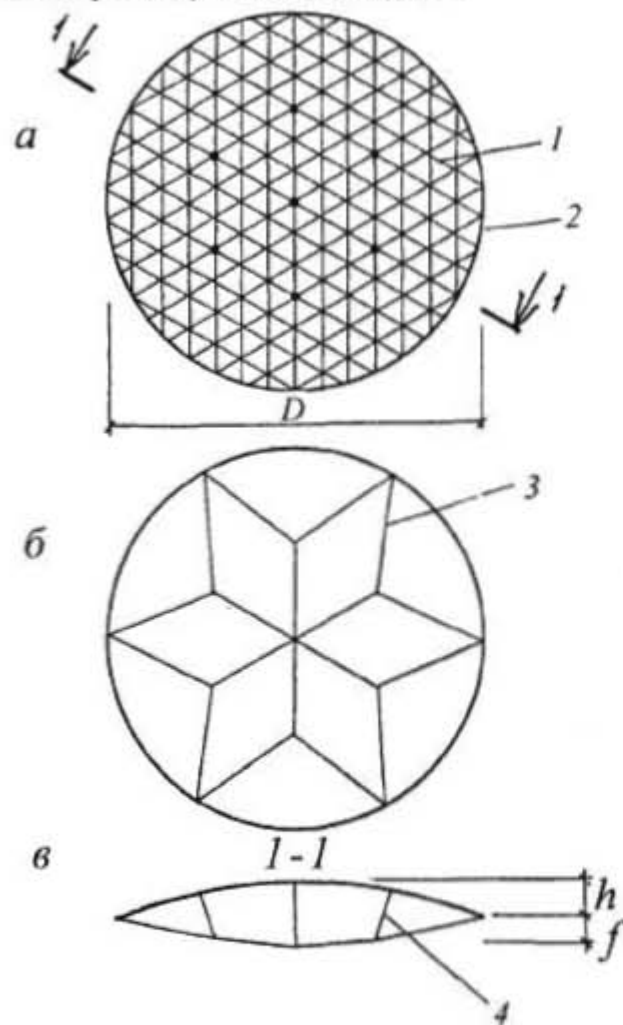


Рис. 5.4. Схема предварительно напряженного сетчатого купола:
 а - жесткий сетчатый каркас (верхняя сетка); б - нижняя сетка; в - диаметральный разрез; 1 - стержень верхней сетки; 2 - стержень опорного контура; 3 - затяжка; 4 - стойка-распорка

Из конструктивных соображений желательно иметь минимальное количество стоек. При необходимости количество стоек может быть увеличе-

но без изменения схемы нижней сетки, если использовать пучок из трех и более стоек, сходящихся в одном узле нижней сетки.

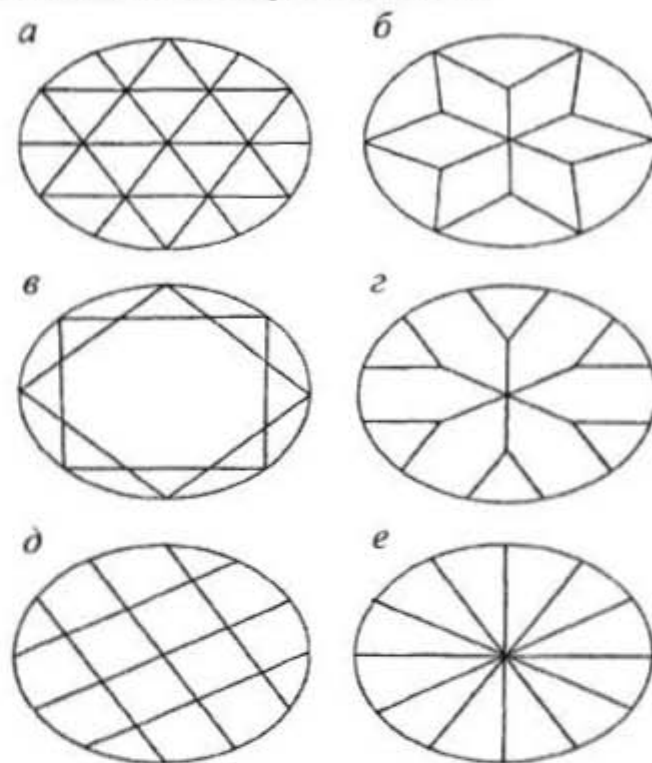


Рис. 5.5. Разрезки нижней сетки

Предварительное напряжение осуществляется с помощью специальных устройств, позволяющих натягивать затяжки на заданное усилие. При этом узлы пересечения затяжек нижней сетки выполняются таким образом, что обеспечивается свободное проскальзывание канатов в процессе предварительного напряжения.

Возможны несколько приемов предварительного напряжения нижней сетки механическим способом:

- натяжение концов затяжек с помощью тянущих или толкающих домкратов с упором на жесткий опорный контур верхней сетки. При этом можно объединить все домкраты единой маслосистемой и одновременно натягивать все затяжки на одинаковую величину, полностью механизировав весь процесс предварительного напряжения;
- предварительное напряжение раздвиганием телескопических стоек шпренгельной системы;
- натяжением затяжек фаркопфами или другими стяжными устройствами.

Возможны и комбинации перечисленных способов в процессе предварительного напряжения.

Напряжение контролируется тремя способами: по усилию натяжения затяжек, удлинению затяжек, общими и местными деформациями жесткой части конструкции.

5.2. Особенности расчета предварительно-напряженного сетчатого купола

Особенности статического расчета рассматриваемой конструкции состоят в моделировании предварительного напряжения и определении рационального его значения.

В качестве расчетной схемы целесообразно использовать дискретную стержневую систему купола, а усилия предварительного напряжения в затяжках моделировать температурным воздействием на напрягаемые стержни, что эквивалентно в натуре натяжению затяжек с упором на жесткий каркас купола.

Аналитическое определение необходимой температуры для создания заданного усилия в одиночной затяжке простейшей конструкции, состоящей из нескольких стержней, не составляет труда. Для многостержневых плоских систем и пространственных конструкций такую задачу необходимо решать с использованием ЭВМ. При этом возможно применять уже известные программы статического расчета строительных конструкций, имеющие блок расчета на температурные воздействия.

Рассмотрим процесс определения необходимой температуры охлаждения на примере пространственной стержневой конструкции произвольного вида, имеющей n затяжек. В каждой из затяжек необходимо создать заданное усилие предварительного напряжения. Для первой из затяжек можно написать следующее уравнение

$$r_{11}x_{11} + r_{12}x_{12} + \dots + r_{1n}x_n = R_1, \quad (5.1)$$

где r_{11} – усилие в первой затяжке от единичного изменения температуры в этой же затяжке; r_{1n} – усилие в первой затяжке от единичного изменения температуры в n -й затяжке; R_1 – заданное усилие предварительного напряжения в первой затяжке; x_n – величина температурного воздействия на n -ую затяжку, для получения заданного усилия предварительного напряжения в этой же затяжке.

Для каждой из следующих затяжек составляем уравнение по типу уравнения (5.1), которые образуют систему линейных уравнений:

$$\begin{array}{l} \sum_{i=1}^n r_{1i}x_i = R_1 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^n r_{ni}x_i = R_n \end{array} \quad (5.2)$$

Решая систему, находим значения необходимых температурных воздействий для получения заданных усилий предварительного напряжения в каждой из рассматриваемых затяжек. Значения усилий r_{in} в системе (5.2) определяют из расчета конструкции на ЭВМ на единичные температурные воздействия.

Таким образом, в одном машинном расчете можно одновременно рассчитать конструкцию на различные загрузки эксплуатационными нагрузками, предварительное напряжение и их совместные комбинации.

Особенностью расчета на устойчивость является необходимость учета влияния предварительного напряжения как на стадии напряжения, так и при эксплуатации. Наличие шпренгельной системы приводит к дополнительным искажениям формы поверхности при преднапряжении K_c , что неблагоприятно, в то же время наличие стоек-распорок сокращает область выпучивания при потере устойчивости, что способствует увеличению верхней критической нагрузки и учитывается коэффициентом K_r .

Критическая узловая нагрузка на купол при жестких узлах определяется по формуле 4.69.

Параметр P определяется по графику рис. 4.9. В диапазоне малых значений $\zeta_0 \leq 0,3$ он может быть вычислен по формуле

$$P = 1 - 0,925\zeta_0^{0,448}; \quad (5.3)$$

где ζ_0 определяется по формуле 4.70.

В преднапряженных сетчатых куполах жесткие узлы более предпочтительны, т.к. в этом случае влияние искажений формы от предварительного напряжения меньше. Поэтому расчет на устойчивость предварительно напряженного купола ведется из предположения жестких узлов. Влияние предварительного напряжения учитывается дополнением формулы (4.69) коэффициентом K_n , тогда формула примет вид

$$q_{up} = 4,9P_2K_2EA \frac{i}{lR^2}, \quad (5.4)$$

где

$$K_2 = K_r K_\zeta = \left(1 + \frac{x^2 + x^3}{1,8}\right) (1 - 0,925\zeta_2^{0,52}). \quad (5.5)$$

при значениях $X \leq 0,6$; $\zeta_2 \leq 0,2$.

Коэффициент K_r учитывает влияние сокращения области выпучивания на повышение верхней критической нагрузки:

$$K_r = \frac{\sigma_a}{\sigma_1}, \quad (5.6)$$

где σ_1 – верхняя критическая нагрузка в неподкрепленной оболочке при $\zeta_0 = 0$; σ_a – верхняя критическая нагрузка в подкрепленной шпренгелем оболочке при различных значениях параметра X и $\zeta_0 = \zeta_2 = 0$.

При значениях $X > 0,6$ коэффициент K_r определяется по формуле (5.6), при этом значение σ_a берется по графику на рис. 5.6, а значение $\sigma_1 = 0,635$.

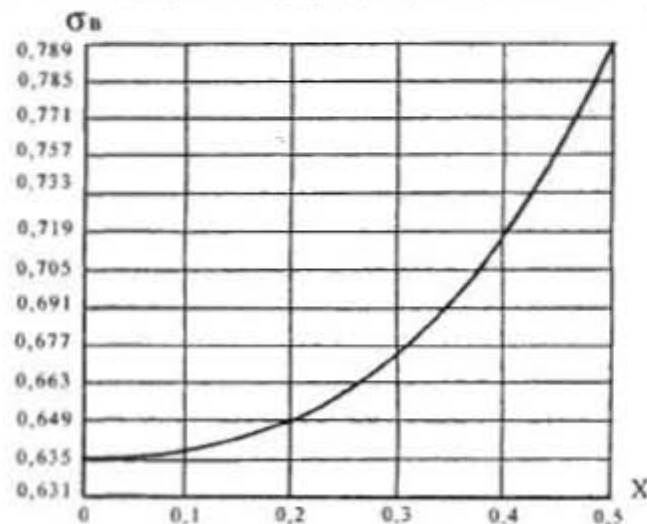


Рис. 5.6. Изменение верхней критической нагрузки σ_a в зависимости от параметра сокращения области выпучивания X

Коэффициент учитывает влияние искажения сферической формы поверхности купола, при наличии подкрепляющей системы, на снижение верхней критической нагрузки

$$K_\zeta = \frac{\sigma_{a2}}{\sigma_{a3}}, \quad (5.7)$$

где σ_{a2} – верхняя критическая нагрузка в подкрепленной оболочке при $\zeta_2 \neq 0$; $\zeta_0 = 0$; σ_{a3} – верхняя критическая нагрузка в подкрепленной оболочке при $\zeta_2 = 0$; $\zeta_0 = 0$.

При значениях $\zeta_2 > 0,2$ коэффициент K_ζ определяется по графику на рис. 5.7.

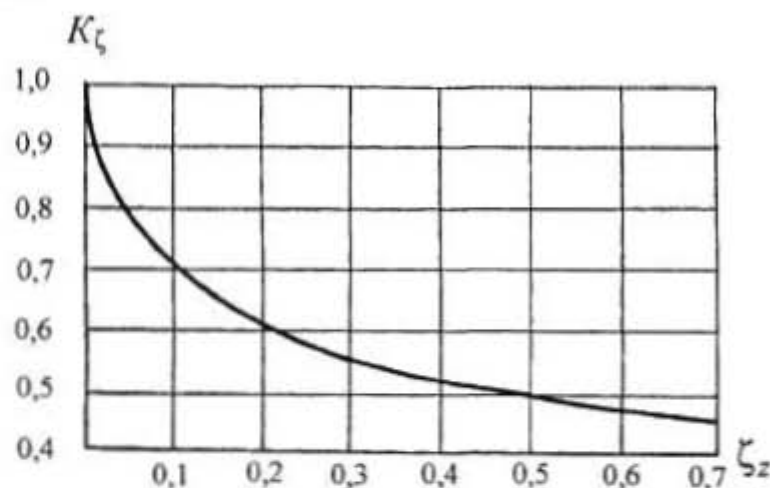


Рис. 5.7. Определение параметра K_ζ

Безразмерный параметр сокращения области выпучивания X определяется по формуле

$$X = 1 - \frac{r_a}{r_1}, \quad (5.8)$$

где r_1 – радиус выпучивания для неподкрепленной оболочки; r_a – радиус выпучивания в подкрепленной стойками – распорками оболочке.

Параметр r_1 определяется по формуле

$$r_1 = \sqrt{KRh}; \quad (5.9)$$

где K – безразмерный параметр, равный 8.87332; R – радиус кривизны оболочки; h – толщина оболочки, см. формулу (4.44) в главе 4.

Параметр r_b в подкрепленной оболочке определяется в зависимости от расстановки стоек-распорок и их количества см. рис. 5.8.

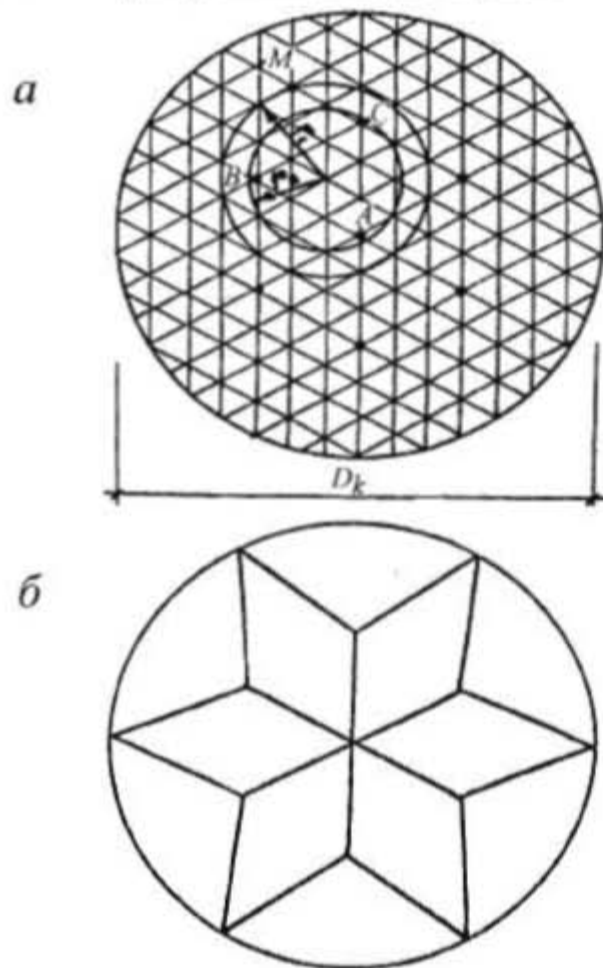


Рис. 5.8. Образование области выпучивания в пологом сетчатом куполе, подкрепленном пространственной шпрингельной системой: *a* – схема верхней сетки; *b* – схема нижней сетки, r_1 – радиус выпучивания в неподкрепленном куполе, r_2 – радиус выпучивания в подкрепленном куполе.

Параметр ζ_z определяет искажения формы поверхности от предварительного напряжения и определяется по формуле:

$$\zeta_z = \frac{\Delta f_z}{l} \frac{(2 - \beta^2)}{2\beta}, \quad (5.10)$$

где Δf_z – максимальная разность перемещений соседних узлов в зоне выпучивания при предварительном напряжении. Определяется по результатам статического расчета купола на предварительное напряжение; l – длина стержня; $\beta = l/2R$ – угол наклона стержней к касательной плоскости в угле.

Максимальная нагрузка q на купол должна быть меньше $q_{кр}$, вычисленной по формуле (5.4).

5.3. Контрольные вопросы к главе 5

1. Расширяет ли область упругой работы стержня предварительное напряжение?
2. Возможно ли предварительное напряжение отдельной ячейки сетчатого купола?
3. Для чего нужна нижняя сетка в предварительно напряженном сетчатом куполе?
4. Каким приемом можно моделировать усилие предварительного напряжения при статическом расчете купола?
5. Наличие стоек-распорок увеличивает или сокращает область выпучивания при потере устойчивости предварительно-напряженного купола?

6. ПРИМЕР РАСЧЕТА СЕТЧАТОГО КУПОЛА

Требуется подобрать сечение стержней сферического сетчатого купола диаметром 6 м с высотой подъема $f = 0,75$ м (рис. 6.1). Разрезка поверхностей типа «Ромб». Средняя длина стержня $l = 780$ мм; узлы сопряжения – шарнирные; нагрузка равномерно распределенная интенсивностью $q = 2,4$ кН/м² [5].

Определим радиус кривизны купола (рис. 6.1)

$$R = (D^2 + 4f^2) / 8f = (6^2 + 4 \cdot 0,75^2) / 8 \cdot 0,75 = 6,375 \text{ м.}$$

Максимальные усилия в стержнях купола могут быть определены по формуле (4.65)

$$N = K_1 q R l,$$

где $k = 0,36$ – коэффициент, зависящий от угловой координаты φ стержня, определяемый по табл. 4.6, при $\varphi_1 = 280$:

$$N = 0,36 \cdot 2,4 \cdot 6,375 \cdot 0,78 = 4,295 \text{ кН.}$$

Сечение стержня будем подбирать по устойчивости как центрально – сжатого элемента, а затем проверять устойчивость узла сетчатого купола под нагрузкой (предотвращение прощелкивания узла).

Для расчета последнего предварительно определим следующие параметры:

$\beta = l / 2R = 0,78 / 2 \cdot 6,375 = 0,0612$ – угол наклона стержня к касательной плоскости в узле;

$\xi_p = 0,65(\delta / \beta^2 l) = 0,65(0,0005 / 0,0612^2 \cdot 0,78) = 0,17$ – безразмерный параметр.

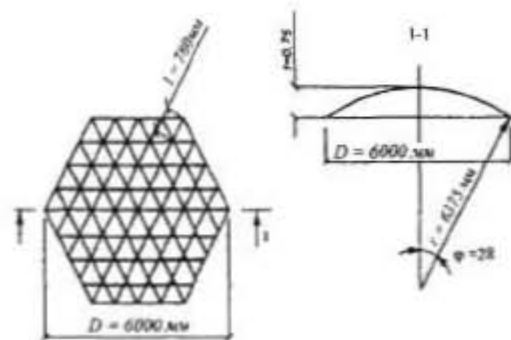


Рис. 6.1 Сетчатый сферический купол

Начальные перемещения узла, определяемые по формуле (4.75), происходят из-за наличия допусков в изготовлении отдельных стержней $\delta = 0,0005$ м.

Усилия в стержне N_{ef} с учетом его возрастания в процессе деформирования стержневой системы определяется расчетом по следующей формуле:

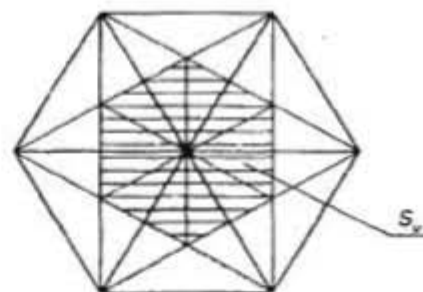


Рис. 6.2 Грузовая площадь узла

$$N_{ef} = Nk,$$

где k – коэффициент возрастания продольной силы, определяемый по формуле (4.77),

$$k = 1 / (1 - \xi_0 - \xi) = 1 / (1 - 0,17 - 0,31) = 1,92,$$

где $\xi = 0,31$ определено из рис. 4.11 полагая, что $\xi = \xi_{кр}$, тогда $N_{ef} = 1,92 \cdot 4,295 = 8,246$ кН.

Подберем трубчатое сечение стального стержня с расчетным сопротивлением $R_y = 210$ МПа из условия устойчивости. Для этого зададимся гибкостью $\lambda = 80$, которой соответствует $\varphi = 0,734$. Коэффициент условий работы для таких конструкций принимают $\gamma_c = 0,7$. Имея эти данные, определим требуемую площадь

$$A \geq N_{ef} / \gamma_c R_y \varphi \text{ см}^2$$

$$A = \frac{8,246 \text{ кН}}{210 \text{ МПа} \cdot 0,734 \cdot 0,7} = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 0,8 \text{ см}^2$$

Принимаем стальную круглую трубу $d = 40$ мм с толщиной стенки $t = 2$ мм. В этом случае площадь поперечного сечения $A = 2,386$ см².

Теперь проверим расчет на устойчивость узла. Для этого предварительно определим грузовую площадь узла S_u (рис. 6.2).

При этом считаем, что все стороны одинаковой длины и, следовательно, треугольники сетчатой поверхности равносторонние. Грузовая площадь S_u равна площади двух треугольников, образованных стержнями решетки,

$$S_u = 2 \cdot 0,433 l^2 = 2 \cdot 0,433 \cdot 0,78^2 = 0,528 \text{ м}^2.$$

Тогда узловая нагрузка

$$P_y = S_u q = 0,528 \cdot 2,4 = 1,26 \text{ кН.}$$

Критическую нагрузку на узел определяем по формуле (4.73)

$$P_{кр} = 2EA\beta^3 p = 2 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 2,386 \cdot 0,0612^3 \cdot 0,125 = 2,87 \text{ кН,}$$

где $P = 0,125$ находим по графику на рис. 4.11.

Устойчивость узла обеспечена, поскольку $P_y = 1,26 \text{ кН} \leq P_{кр} = 2,87 \text{ кН}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Период последнего десятилетия XX века трудно назвать результативным и плодотворным в сфере развития и применения современных пространственных конструкций, что повлекло за собой сокращение объема научных исследований, уменьшение издания учебно-методической литературы. Тем не менее наметившееся в настоящее время прогрессивные тенденции в экономике позитивно влияют на возрождение строительной отрасли, а процесс внедрения в архитектуру и строительстве пространственных конструкций будет объективно нарастать. Все это требует специалистов, владеющих методами проектирования и строительства пространственных конструкций. В настоящее время практически отсутствует учебная литература, посвященная вопросам изучения столь эффективных пространственных конструкций, как купола, что негативно сказывается на их применении в строительстве. Рассматриваемое учебное пособие призвано восполнить существенный информационный пробел и обеспечить формирование знаний у студентов архитектурно-строительных специальностей по современным направлениям развития строительных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гохарь - Хармандарян. Большепролетные купольные здания. М.: Стройиздат, 1972.
2. Виноградов Г.Г. Расчет строительных пространственных конструкций. Л.: Стройиздат, 1990.
3. Липницкий М.Е. Купола. Л.: Стройиздат, 1973.
4. Липницкий М.Е. Купольные покрытия для строительства в условиях сурового климата. Л.: Стройиздат, 1987.
5. Металлические конструкции. Т.2. Стальные конструкции зданий: учебное пособие для строительных вузов. В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов и др., под редакцией В.В. Горева. М.: Высшая школа, 1997.
6. Металлические конструкции. Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1980.
7. Павлов Г.Н. Вычисление геометрических параметров и проектирование геодезических куполов и оболочек на основе сетевых разбинок системы "Р". Нижний Новгород, 1994.
8. Pavlov G.N. "Geodesic Domes Bounded by Symmetrical mainly Hexagonal Elements" The International journal of space structures. Volume 9, No. 2, 1994.
9. Рюле Г. Пространственные покрытия. Т.2 М.: Стройиздат, 1974.
10. Справочник. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмасса). М.: Высшая школа, 1991.
11. Трущев А.Г. Пространственные металлические конструкции. М.: Стройиздат, 1983.
12. Сперанский Б.А. Решетчатые металлические предварительно напряженные конструкции. М.: Стройиздат, 1970.

Предметно-адресный указатель

- Алюминиевая утепленная панель, 13
- Безмоментная теория, 60, 62, 63, 69, 70
- Верхнее опорное кольцо, 7, 8, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 21, 22, 23, 28
- Ветровая нагрузка, 56, 57, 58, 61, 65, 66, 73, 76
- Диаметр купола, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 26, 28
- Дискретная стержневая система, 60, 73, 84
- Доказатель, 37, 38, 39
- Железобетонные фундаменты, 10
- Затяжка, 15, 16, 80, 81, 82, 83, 84
- Звездчатая система, 35, 36, 37, 44
- Икосаздр, 37, 38, 39
- ИФИ, 53, 54
- Колонны в г. Шарлотта (США), 16
- Кольцевые прогоны (элементы), 12, 16, 22, 29, 59
- Контрфорсы, 10, 11
- Крестовые связи, 16, 21, 22, 23, 26, 27
- Купол
 - пластичный, в г. Лонгвью (США), 31, 32, 34, 39
 - гладкий, 8, 9, 71
 - зонтчатый, 8, 9, 10, 11
 - конический (конусный), 11
 - купол-оболочка, 8, 9, 10, 63, 69
 - монолитный, 9
 - над зданием вагоностроительных мастерских в штате Иллинойс (США), 28
 - над зданием высоковольтного испытательного центра, 30, 31
 - над зданием рынка в Бресте, 17
 - над зданием рынка в Волоколамске, 14, 15
 - над зданием цирка в Екатеринбургe, 14
 - над общественным центром международного молодежного лагеря "Волга", 27, 28
 - над спортивным центром в г. Жилина (Чехословакия), 15
 - над стадионом в г. Хьюстон (США), 28, 29
 - пирамидальный, 11
 - пластинчатый, 8, 31, 32, 33, 34, 39, 60
 - подъемный, 9
 - пологий, 9, 88
 - ребристо-кольцевой, 8, 16, 18, 34, 49, 50, 51, 54, 59, 74, 78, 80
 - ребристо-кольцевой со связями, 8, 18, 24, 34, 49, 50, 51
 - ребристый, 8, 11, 12, 21, 33, 34, 46, 49, 51, 54, 55, 59, 61, 78
 - сборно-монолитный, 9
 - сборный, 9
 - сетчатый, 5, 6, 8, 13, 23, 26, 27, 33, 34, 35, 46, 51, 52, 53, 60, 68, 73, 74, 75, 76, 78, 80, 81, 82, 84, 85, 88, 89, 90
 - системы "Баку", 31, 32
 - системы А. Фенля, 26
 - стрельчатый, 8, 9
 - сферический, 8, 18, 35, 37, 53, 63, 65, 66, 72, 73, 74
 - Шведлера, 26, 27
 - эллиптический, 8
- Масса купола, 11, 64
- Мембранное покрытие, 12

Меридиональная разрезка, 10, 26, 34
 Меридионально-кольцевая система разрезки, 34, 44
 "МЕРО", 51, 54
 Местный изгиб, 16
 Метод торкретирования, 10
 Монолитная оболочка на пневматической опалубке, 9
 Монтажная стойка, 13
 Нижнее опорное кольцо, 7, 8, 13, 17, 22, 46, 54
 Оболочка купола, 8, 69
 "Октаплат", 52
 Отсос, 66, 58
 Пенопласт, 10
 Покрытие актового зала в г. Ульяновске, 18, 20
 Покрытие купола, 13
 Покрытие цирка в Москве, 13
 Полуарки, 12, 15, 17
 Правильный многогранник, 26, 35, 37, 39
 Правильная сеть Чебышева, 35, 36, 37
 Прочность, 57, 60, 81
 Распор купола, 7, 12, 17, 55
 Ребра складчатой формы, 13
 Ребро купола, 14, 15, 17, 18, 21, 29, 48, 51
 Рубленое стекловолокно, 10, 11
 Сеть локсодромий, 35, 36
 Сечение стержня, 45, 68, 74, 75, 76, 78
 Система Кайвитта, 36, 37, 44
 Система "Р", 39, 40, 41
 Система "Ромб-1", 37, 44
 Снеговая нагрузка, 60, 64, 67, 71, 76
 Спортивный комплекс в г. Атланта (США), 12, 13
 Стадион в г. Сан-Паулу (Бразилия), 17
 Стальные полуарки эллиптического очертания, 17
 "SDC", 52
 Треугольник "Мебиуса", 40
 Треугольник "Шварца", 39, 40, 41
 "Триолетик", 51, 52
 Узловое соединение, 6, 22, 23, 31, 45, 48, 51, 52, 53, 54
 Условная затяжка, 55, 56, 59
 Устойчивость, 57, 60, 68, 69, 75, 76, 77, 78, 79, 82, 85, 89, 90, 91
 Устойчивость ребер, 12
 Форма гиперболического параболоида, 10, 34
 Формообразование, 37, 81
 ЦНИИСК, 53, 54
 Шпренгельная система, 81
 Эллипсоид, 17, 29

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

XXI ВЕКА

Ежемесячный информационный научно-технический журнал

Подписка на журнал:

В ПОЧТОВОМ ОТДЕЛЕНИИ

По каталогу "Газеты. Журналы."
 Агентства Роспечать
индексы 79198, 80852
 По каталогу "Издания органов НТИ"
 Агентства Роспечать
индекс 67040
 По Объединенному каталогу
 "Пресса России"
индексы 26128, 27709

ЧЕРЕЗ РЕДАКЦИЮ:

В этом случае возможна подписка
 с любого номера и на любой срок.
 Для оформления подписки
 необходимо прислать в редакцию
 копию квитанции об оплате
 и информацию с указанием ФИО,
 названия фирмы, своего почтового
 адреса и срока подписки.

По вопросам подписки
 обращаться к **Веденяпину
 Владимиру Ивановичу**
т./ф.: 231-44-55(многокан.)

ЧЕРЕЗ ПОДПИСНЫЕ АГЕНТСТВА:

Россия
 ООО "Интер Почта"
(095) 921-11-42, 921-11-38
 ЗАО "АиФ-Эскорт"
(095) 319-82-15, 319-82-16
Украина
 Подписное агентство "ИНДЕКС"
 (Днепропетровск, Запорожье, Киев)
(0562) 36-12-77, 93-87-26
 ООО "Бизнес Пресса" (Киев)
(044) 220-46-16, 248-74-60

ЧЕРЕЗ ИНТЕРНЕТ:

Посетите нашу страницу
www.stroymat21.ru

ПРИЕМ СТАТЕЙ И РЕКЛАМЫ ПО ТЕЛ.:

(095) 231-44-55
E-MAIL: INFO@STROYMAT21.RU

ОПЛАТИТЬ СТОИМОСТЬ ПОДПИСКИ МОЖНО:

1. Почтовым переводом на наш расчетный счет;
2. Через любое отделение Сбербанка на наш р/с;
3. Через свой банк, заказав в редакции счет по факсу;
4. За наличный расчет в редакции.

Реквизиты для перечисления средств за подписку:

ООО "РИА Композит", ИНН 7708164440,
 р/с 40702810138220104778
 в Мещанском ОПС №7811 г. Москва
 Сбербанк России, г. Москва,
 к/с 3010181040000000225, БИК 044525225.
 В графе "назначение платежа" указать:
 подписка на журнал "Строительные материалы,
 оборудование, технологии XXI века".

Адрес редакции:

129337, Москва, Ярославское ш., 26, МГСУ, учебный корпус, 2-й этаж. Т./ф.: (095)231-44-55
Http://www.stroymat21.ru; E-mail: 21vek@stroymat21.ru

Учебное пособие

Виталий Иванович Тур

**КУПОЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ:
формообразование, расчет, конструирование,
повышение эффективности**

Компьютерная верстка: *Е.В. Орлов, Е.М. Лютова*
Дизайн обложки: *Н.С. Кузнецова*
Редактор: *Е.В. Козлова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Сдано в набор 14.01.04.
Подписано к печати 27.02.04. Формат 60x90/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. 6 п.л. Тираж 2000. Заказ № 1041.
Отпечатано с готовых диалозитивов в ГУП МО «Мытищинская типография».
141009, г. Мытищи, ул. Колонцова, д. 17/2. Тел. 586-34-00.

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе 26, оф. 511
тел., факс: 183-57-42
e-mail: iasy@mgsu.ru

