

УДК 624.014.074 (075.8)
ББК 38.5
С30

Рецензенты: кафедра "Основы архитектурного проектирования" КРСУ (зав. кафедрой д-р арх., проф. Ю.Н. Смирнов); д-р техн. наук, проф. В.М. Курдюмова (КГУСТА); канд. техн. наук О.Г. Черных

Рекомендовано к изданию Ученым советом КРСУ (протокол №5 от 26.01.2010)

Допущено Министерством образования и науки Кыргызской Республики в качестве учебного пособия для студентов архитектурно-строительных вузов (приказ № 50/1 от 16.02.10 г.)

Семенов В.С.
С-30 Современные пространственные конструкции: синтез искусства, техники и науки: Учеб. пособие. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2010. – 130 с.

ISBN 978-9967-05-621-3

Пособие содержит систематизированные сведения об основных типах пространственных конструкций покрытий гражданских и промышленных зданий. На конкретных примерах показана их роль и место в современной архитектуре.

Теоретическая часть включает подробную классификацию каждого из рассматриваемых типов пространственных покрытий, а графический материал иллюстрирует различные виды их конструктивных решений. В конце пособия приведен список использованных источников и полезных интернет-ресурсов.

Предназначено для студентов архитектурно-строительных вузов и факультетов. Полезные для себя сведения найдут в пособии инженеры и архитекторы.

С 3305000000-10

УДК 624.014.074 (075.8)
ББК 38.5

ISBN 978-9967-05-621-3

© В.С. Семенов, 2010

© КРСУ, 2010

5-6

От автора

7-15

Краткие сведения из геометрии
и теории поверхностей

16-25

**1. Конструктивные
системы современных
пространственных конструкций.
Классификация, формы и
области применения**

Введение	16
1.1. Общая классификация несущих систем в строительстве	17
1.2. Классификация и формы пространственных конструкций покрытий	18
1.3. Области применения пространственных конструкций	23

26-30

**2. Жесткие оболочки и складки.
Классификация и развитие
конструктивных форм**

2.1. Панели-оболочки, плиты-настилы	27
2.2. Складки, шатры	30
2.2.1. Складки и шатры из железобетона и армоцемента	31
2.2.2. Складки и шатры из металла	34
2.3. Жесткие оболочки	37
2.3.1. Оболочки различной формы поверхности	37
2.3.2. Своды	45
2.3.3. Купола	45
Примеры осуществленных конструкций	48

51-61

**3. Системы регулярной структуры.
Классификация и развитие
конструктивных форм**

3.1. Перекрестно-ребристые покрытия	52
3.2. Системы регулярной структуры стержневые	52
3.2.1. Структурные плиты стержневые	52
3.2.2. Сетчатые своды, купола	58
3.3. Системы регулярной структуры пластинчатые	60
3.3.1. Структурные плиты пластинчатые	60
3.3.2. Своды, купола пластинчатые	61
Примеры осуществленных конструкций	62

**4. Висячие покрытия.
Классификация и развитие
конструктивных форм**

4.1. Подвесные покрытия	66
4.2. Вантовые покрытия	68
4.2.1. Однопоясные вантовые покрытия	68
4.2.2. Двухпоясные покрытия	71
4.3. Висячие оболочки	73
4.3.1. Висячие железобетонные оболочки	74
4.3.2. Мембранные покрытия	76
4.4. Покрытия с жесткими нитями	81
4.5. Комбинированные висячие покрытия	83
Примеры осуществленных конструкций	84

87-101

5. Мягкие оболочки. Классификация и развитие конструктивных форм

5.1. Пневматические конструкции_ 88

5.1.1. Пневматические
конструкции
воздухоопорного типа ____ 90

5.1.2. Пневматические
конструкции
воздухонесомого типа ____ 90

5.2. Тентовые конструкции ____ 95

5.3. Комбинированные покрытия
на основе мягких оболочек ____ 99

Примеры осуществленных конструкций 100

101-106

6. Трансформируемые пространственные покрытия. Классификация и примеры конструктивных решений

6.1. Трансформация в живой
природе и архитектуре ____ 101

6.2. Принципы классификации
трансформируемых
конструкций ____ 102

6.3. Примеры трансформируемых
покрытий в современной
архитектуре ____ 105

107-111

7. Комбинированные пространственные покрытия. Классификация и примеры конструктивных решений

7.1. Классификация
комбинированных покрытий ____ 107

7.2. Примеры
конструктивных решений ____ 108

7.2.1. Покрытие стадиона ФК
«ЗЕНИТ» ____ 108

7.2.2. Купол тысячелетия
(«Millenium Dome») ____ 111

112-116

8. Пространственные конструкции покрытий в Кыргызстане

8.1. Оболочки ____ 112

8.2. Системы регулярной
структуры ____ 113

8.3. Висячие покрытия ____ 114

8.4. Трансформируемые покрытия ____ 115

8.5. Мягкие оболочки ____ 116

117

Вместо заключения

118-119

**Использованные
источники**

120-128

Приложения:

1. Термины и их определения
2. Биографические справки

«Художественное творчество и техническое мышление больше не противостоят друг другу, а образуют два полюса, между которыми перекнут мост современной архитектуры».

Юрген Едике.

«История современной архитектуры»

От автора

Практика современного строительства, особенно уникальных зданий и сооружений, требует тесного взаимодействия всех участников этого процесса (архитекторов, конструкторов, технологов) в рамках одного творческого коллектива уже на стадии формирования самой идеи будущего объекта.

В то же время существующая методика преподавания специальных строительных дисциплин будущим инженерам и архитекторам не дает навыков такого сотрудничества. И происходит это, прежде всего, вследствие изолированного изложения курсов начертательной геометрии, архитектурного проектирования, строительной механики и строительных конструкций, без той взаимосвязи, которая существует между этими дисциплинами в реальной жизни. Поэтому обучение таким навыкам, пониманию задач и позиций как своих собственных, так и специалистов смежных специальностей представляется нам необходимым условием при подготовке эрудированных специалистов.

Вот что говорил по этому поводу известный итальянский архитектор, инженер и теоретик искусства Пьер Луиджи Нерви: «... даже лучшие произведения специалистов не могут существовать вне связи со смежными отраслями знаний, ... только на основе совместной работы архитектора и инженера, при взаимном доверии и уважении могут вновь появляться сооружения, полные гармонии между конструкцией и формой, сооружения, отличающиеся той же красотой, что и многие творения прошлого»*.

К этому можно добавить и мнение профессора архитектуры Хайно Энгеля: «... Только безусловное знание принципов несущих конструкций может позволить проектировщикам – архитекторам и инженерам – участвовать в процессе создания современной среды»**.

Несомненно, что не только настоящее, но и будущее архитектуры связано с проектированием пространственных систем – наиболее выразительных, надежных и экономически эффективных ее элементов. Архитектор, разрабатывающий облик (форму и содержание) будущего здания, должен уметь из большого количества возможных вариантов выбрать (и проанализировать!) такую несущую систему, которая удовлетворяла бы не только заданной функции и архитектурной форме, но и отражала современный уровень строительной науки и техники. Для этого он должен «чувствовать» работу конструкции, обладать знаниями из различных областей науки и техники – материаловедения, сопротивления материалов, строительной механики, технологии монтажа конструкций и пр.

В свою очередь, инженер, участвующий в разработке конструктивного решения проектируемого объекта, должен ориентироваться в современных проблемах архитектурного творчества, знать законы формообразования, статики и динамики, особенности работы различных конструктивных систем, уметь их рассчитывать и анализировать полученные результаты.

При таком возрастающем значении конструкций в творческом процессе проектирования большое значение имеет свободное владение информацией обо всех видах конструктивных систем, особенностях их работы, технологии возведения. Архитектор, не чувствующий работу конструкции, или инженер, не обладающий чувством формы, сегодня не могут полностью проявить себя в творческом процессе создания новых строительных объектов.

Еще совсем недавно многие оригинальные архитектурные решения не могли быть реализованы либо по причине очень сложных расчетов, либо в связи с невозможностью их воплощения по технологическим проблемам.

Однако развитие средств автоматизированного проектирования и новые технологические решения в области возведения сложных систем открывают сегодня перед архитекторами и конструкторами практически безграничные возможности в реализации их творческих замыслов.

Основная цель настоящей книги – познакомить читателя с одним из самых выразительных приемов современной архитектуры – пространственными системами покрытий зданий. Рассматриваемая тема настолько многогранна, что подробно осветить в одной книге все ее аспекты – практически невыполнимая задача. Понимая это, автор ограничил себя изложением только общих вопросов классификации и описанием конструктивных особенностей таких систем.

При подготовке пособия использован материал лекций и практических занятий, который автор читает студентам КГУСТА и КРСУ в течение многих лет, данные научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также опыт, накопленный в этой области ведущими архитектурно-строительными фирмами разных стран за последние годы.

Если в результате изучения представленных материалов читатель увидит неразрывную связь между архитектурным (пластическим) и конструктивным (тектоническим) решением пространственных систем и постарается использовать взаимосвязь формы и конструкции в своем творчестве (курсовых, дипломных и реальных проектах), автор будет считать поставленную цель достигнутой.

Говоря о пространственных конструкциях, которые присутствуют практически во всех проектах выдающихся архитекторов современности – Нормана Фостера, Сантьяго Калатравы, Рэма Колхаса, Моше Сафди, Фрэнка Гери, Даниэля Либескинда, Ричарда Роджерса, Кисе Курокавы, Жака Херцога, Пьера де Мерона, Вернера Собека и многих других, нельзя не отметить роль цвета и света (!), подчеркивающих их форму и структурные особенности.

Для того, чтобы оценить эту роль, на обложке представлены цветные фотографии известных объектов с пространственными конструктивными системами. Фотографии заимствованы из официальных сайтов возглавляемых этими архитекторами компаний, а также из сайтов www.GreatBuildings.com и <http://classes.uleth.ca>.

Пособие предназначено для читателей, знакомых с начертательной геометрией и строительными конструкциями в объеме курсов архитектурно-строительных вузов.

Автор признателен своим коллегам: доктору-инженеру А.П. Садыкову (проектное объединение «Werner Sobek», Германия) и архитектору И.П. Спектору («Spector Design Company», США), принявшим участие в обсуждении концепции книги и любезно предоставившим свои проектные материалы, иллюстрирующие современное состояние вопроса.

В подготовке иллюстраций к настоящему пособию участвовали студенты – архитекторы и дизайнеры, которым автор выражает свою искреннюю благодарность.

И, конечно же, нельзя не отметить работу рецензентов – коллектив кафедры «Основы архитектурного проектирования» КРСУ (зав. каф., д-р архитектуры, профессор Ю.Н. Смирнов), д-ра техн. наук, профессора В.М. Курдюмовой (КГУСТА) и канд. техн. наук О.Г. Черных.

Замечания перечисленных выше специалистов учтены при подготовке рукописи к изданию.

* нерви П.Л. Строить правильно / Пер. с итал. И.Г. Пантиэлевоу. – М.: Госстройиздат, 1956. – 164 с.

* Хайно Энгель. Несущие системы / Пер с нем. Л.А. Андреевой. – М.: АСТ:Астрель, 2007. – 344 с.

«Пространство и форма являются материалом, с помощью которого выражается и осуществляется архитектура. Чтобы постигнуть пространство и форму, нужны знания геометрии, которые являются предпосылкой к формообразованию несущих конструкций, строительных сооружений, равно как и всего окружающего мира».

Хайно Энгель. «Несущие системы»

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ГЕОМЕТРИИ И ТЕОРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Кривые линии

Кривая линия – это множество точек пространства, координаты которых являются функциями одной переменной. Термин «кривая» в разных разделах математики определяется по-разному. В начертательной геометрии кривую рассматривают как траекторию, описанную движущейся точкой, как проекцию другой кривой, как линию пересечения двух поверхностей, как множество точек, обладающих каким-либо общим для всех их свойством и т.д.

Кривые линии, все точки которых принадлежат одной плоскости, называются **плоскими**, остальные – пространственными. Каждая кривая включает в себя геометрические элементы, которые составляют ее **определитель**, т.е. совокупность независимых условий, однозначно определяющих эту кривую.

Различны и способы задания кривых:

- аналитический – кривая задана математическим уравнением;
- графический – кривая задана визуально на носителе графической информации;
- табличный – кривая задана координатами последовательного ряда точек.

Уравнением кривой линии называется такое соотношение между переменными, которому удовлетворяют координаты точки, принадлежащей этой кривой.

В основу классификации кривых положена природа их уравнений. В зависимости от того, являются ли их уравнения в прямоугольной системе координат алгебраическими или трансцендентными, кривые подразделяются на **алгебраические** и **трансцендентные**.

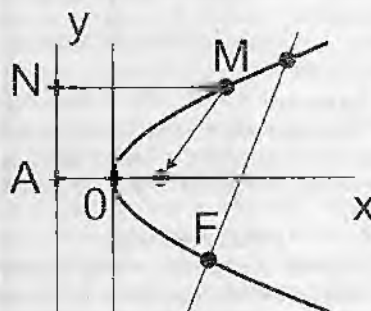
Плоская кривая линия называется **алгебраической**, если ее уравнение имеет вид $f(x,y)=0$, где функция $f(x,y)$ является степенным множителем относительно переменных x и y . В остальных случаях кривая называется трансцендентной.

Кривая линия, представленная в декартовых координатах уравнением n -й степени, называется алгебраической кривой n -го порядка. Например, прямые – это линии первого порядка, описываемые в общем случае уравнением вида.

Порядок плоской алгебраической кривой линии определяется наибольшим числом точек ее пересечения прямой линией. Любая прямая

линия может пересекать алгебраическую кривую линии n -го порядка не более чем в n точках.

Примерами алгебраических кривых второго порядка являются парабола, гипербола, эллипс.



$$MF=MN$$

Рис. 1. Парабола

1. Парабола – кривая, которую прямая пересекает в двух точках (рис. 1). При этом парабола может быть определена как:

– линия пересечения прямого кругового конуса плоскостью, не проходящей через вершину конуса и параллельная какой-либо касательной плоскости этого конуса;

– в прямоугольной системе координат Oxy с началом в вершине параболы и осью Ox , направленной по оси параболы, уравнение параболы имеет так называемый канонический вид

$$y^2=2px,$$

где p (фокальный параметр) – расстояние от фокуса до директрисы.

2. Гипербола:

A – множество точек M плоскости (рис. 2), разность (по абсолютной величине) расстояний F_1M и F_2M от которых до двух определенных точек F_1 и F_2 этой плоскости (фокусов гиперболы) постоянна:

$$F_1M - F_2M = 2a < 2c$$

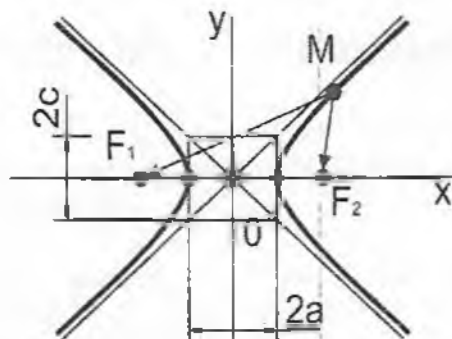
Середина O отрезка F_1F_2 (фокусного расстояния) называется центром гиперболы;

В - линия пересечения прямого кругового конуса плоскостью, не проходящая через вершину конуса и пересекающая обе его полости.

В прямоугольной системе координат Oxy с началом в центре гиперболы, на оси Ox которой лежат фокусы гиперболы, уравнение гиперболы имеет так называемый канонический вид:

$$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1, \quad b^2 = c^2 - a^2,$$

где a и b - длины полуосей гиперболы.



$$MF_1 - MF_2 = 2a$$

Рис. 2. Гипербола

3. Эллипс:

А - множество точек M плоскости (рис. 3), сумма расстояний MF_1 и MF_2 которых до двух определенных точек F_1 и F_2 (фокусов эллипса) постоянна:

$$MF_1 + MF_2 = 2a.$$

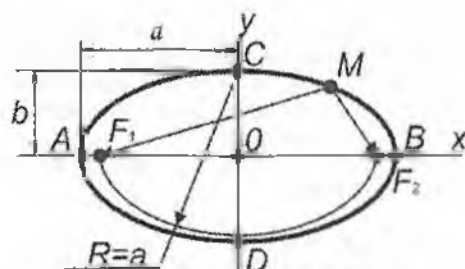
Середина O отрезка F_1F_2 (фокусного расстояния) называется центром эллипса;

В - линия пересечения прямого кругового конуса плоскостью, не проходящая через вершину конуса и пересекающая все прямолинейные образующие одной полости этого конуса.

В прямоугольной системе координат Oxy с началом в центре эллипса, на оси Ox которой лежат фокусы эллипса, уравнение эллипса имеет следующий вид:

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1,$$

где a и b - длины большой и малой полуосей эллипса. При $a=b$ фокусы F_1 и F_2 совпадают и указанное уравнение определяет окружность, которая рассматривается как частный случай эллипса.



$$MF_1 + MF_2 = 2a$$

Рис. 3. Эллипс

Рассмотренные плоские кривые линии, получаемые при пересечении поверхности прямого кругового конуса плоскостями, различно расположенными по отношению к оси конуса,

называют **кривыми конических сечений**.

Трансцендентные кривые в отличие от алгебраических могут иметь бесконечное количество точек пересечения их прямой, точек перегиба, вершин и т.п.

Ярким примером трансцендентной кривой является **синусоида** - плоская кривая линия (рис. 4), получающаяся в результате двойного равномерного движения точки - поступательного и возвратно-поступательного - в направлении, перпендикулярном первому.

Синусоида - график функции $y = \sin x$, непрерывная кривая линия с периодом $T=2\pi$.

Наряду с этим у трансцендентных кривых могут быть характерные точки, которых не существует у алгебраических кривых: точки прекращения, угловые точки (точки излома), асимптотические точки. Простейшими примерами трансцендентных кривых служат графики логарифмической, показательной тригонометрической функций, а также все спирали, циклоиды и т.п.

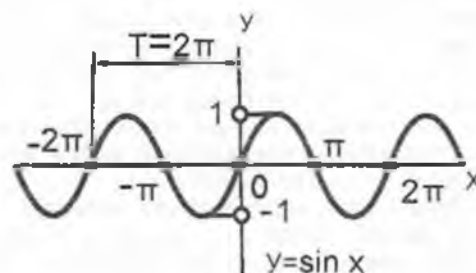


Рис. 4. Синусоида

Кривая линия как траектория движущейся точки должна быть непрерывной. Движущаяся точка в любом положении должна иметь определенное направление движения. Это направление указывает прямая (касательная), проходящая через рассматриваемую точку.

Длина отрезка кривой линии определяется в общем случае как сумма длин отрезков вписанной в нее ломаной линии, с заданной точностью передающей форму кривой.

Особый интерес представляют окружность и цилиндрическая винтовая линия, каждая из которых является эталоном соответственно плоских и пространственных кривых линий.

Плоская кривая a построена в плоскости α (рис. 5). Через точку A проведены секущие хорды AE и AD . Если точку E приближать к точке A , секущая AE поворачивается вокруг точки A . Когда точка E совпадет с точкой A ($A=E$), секущая AE достигнет своего предельного положения t . В этом предельном положении секущая называется полукасательной к кривой a в точке A . Секущая AD в предельном положении $A=D$ также представлена полукасательной t .

Кривая линия в точке A имеет две полукасательные прямые, которые совпадают и определяют одну касательную к кривой линии в точке A - кривая в этой точке называется плавной.

Кривая, плавная во всех ее точках, называется **плавной кривой линией**.

Нормалью n в точке A кривой линии называется перпендикуляр к касательной в этой точке.

На кривой линии могут быть точки, где разнонаправленные полукасательные не принадлежат одной прямой, а составляют между собой угол. Так, на кривой *a* в точке *B* угол δ между полукасательными не равен 180° . Точка *B* в этом случае называется точкой излома, или выпадающей точкой.

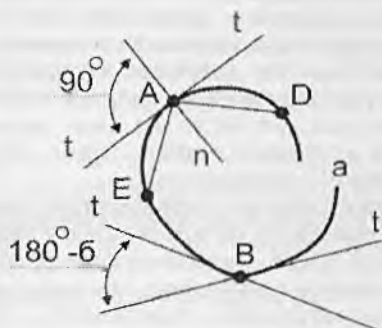


Рис. 5. Касательная и нормаль к кривой

Плоскую кривую линию можно рассматривать как траекторию движения точки в плоскости (рис. 6); точка движется по касательной к кривой линии, обкатывая эту кривую без скольжения.

Движение точки вдоль кривой *a* связано с непрерывным изменением двух величин: расстояния *S*, на которое удалена точка от начального положения, и угла α поворота касательной относительно начального положения.

Если с увеличением пути *S* непрерывно увеличивается и α , кривая называется простой.

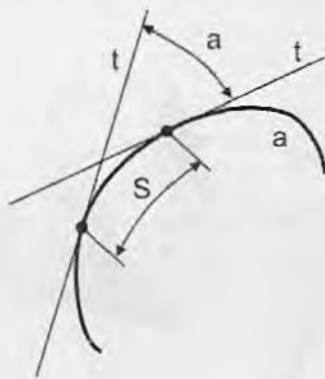


Рис. 6. Угол смежности

Угол α (угол смежности) между касательными в двух бесконечно близких точках кривой, отнесенный к длине дуги между этими точками, определяет степень искривленности кривой линии, т.е. определяет **кривизну** кривой:

$$k = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \alpha}{\Delta S}$$

— предел отношения угла смежности касательных к соответствующей дуге.

Кривизна прямой в любой ее точке равна нулю.

Кривизна произвольной кривой линии в различных точках различна, в отдельных точках она может быть равна нулю. Такие точки называются точками спрямления.

Кривизна в каждой из точек плоской кривой *a* определяется с помощью соприкасающейся в этой точке окружности (рис. 7).

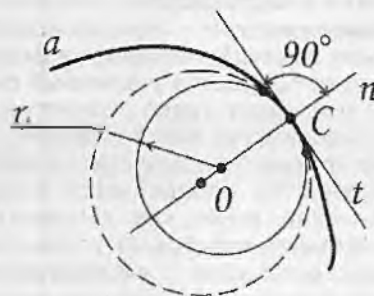


Рис. 7. К определению кривизны кривой

Соприкасающейся окружностью или кругом кривизны в данной точке называется предельное положение окружности, когда она проходит через данную точку и две другие бесконечно близкие к ней точки.

Центр соприкасающейся окружности называется центром кривизны кривой в данной точке, а радиус такой окружности — радиусом кривизны кривой линии в данной точке.

Иными словами, кривизна кривой в данной точке — это величина, обратная радиусу соприкасающейся в этой точке окружности (рис. 8):

$$k_a = \frac{1}{R_a}$$

Прямую можно представить как плоскую кривую, у которой радиус кривизны равен бесконечности:

$$R_a = \infty$$

Отсюда, кривизна прямой равна нулю:

$$k_a = \frac{1}{R_a} = \frac{1}{\infty} = 0.$$

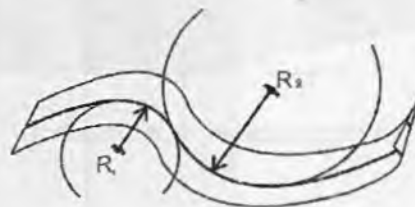


Рис. 8. Радиусы кривизны

Множество центров кривизны кривой является кривая линия — ее называют **эволютой** данной кривой, а кривая по отношению к своей эволюте называется **эвольвентой**.

Поверхности

Поверхности составляют широкое многообразие нелинейных фигур трехмерного пространства. Инженерная, в том числе строительная деятельность человека часто связана с конструированием, расчетом, а также изготовлением таких поверхностей.

«Поверхность» – одно из основных геометрических понятий, которому в разных отделах геометрии придается различный смысл.

1. В школьном курсе геометрии рассматриваются плоскости, многогранники, а также некоторые кривые поверхности. Каждая из кривых поверхностей определяется специальным способом, чаще всего как множество точек, удовлетворяющих некоторым условиям. Например, поверхность шара – множество точек, отстоящих на определенном расстоянии от данной точки. Понятие «Поверхность» лишь поясняется, а не определяется. Например, говорят, что поверхность есть граница тела или след движущейся линии.

2. Математически строгое определение поверхности основывается на понятиях топологии. При этом основным является понятие простой поверхности, которую можно представить как кусок плоскости, подвергнутый непрерывным деформациям (растяжениям, сжатиям и изгибаниям).

Все поверхности можно разделить на две большие группы: многогранные и кривые поверхности.

Многогранной поверхностью в трехмерном пространстве называется поверхность,

образованная частями (отсеками) пересекающихся (соприкасающихся) плоскостей.

Если каждое ребро многогранной поверхности принадлежит равно двум ее граням, то такая поверхность называется **замкнутой** или **поверхностью без границы**. Например, поверхность куба является замкнутой многогранной поверхностью, но если из нее удалить одну грань, то оставшаяся часть будет незамкнутой многогранной поверхностью.

Многогранная поверхность называется **пирамидальной**, если все ее ребра пересекаются в одной точке – вершине (рис. 9, а). Пирамидальная поверхность имеет две неограниченные плоскости. Многогранная поверхность называется **призматической**, если все ее ребра параллельны между собой (рис. 9, в).

Многогранником называется геометрическое тело, ограниченное со всех сторон многогранной поверхностью. Отсеки образующих поверхность плоскостей называются **гранями**, а линии их пересечения – **ребрами**. Точки пересечения ребер называются **вершинами**. Простейшими многогранниками являются пирамиды и призмы (рис. 9, г). Среди других видов многогранников следует выделить – **призматойды** и **правильные многогранники** (тела Платона). Призматойдом называется многогранник, у которого верхнее и нижнее основания – многоугольники, расположенные в параллельных плоскостях, а боковые грани представляют собой треугольники или трапеции (рис. 9, д).

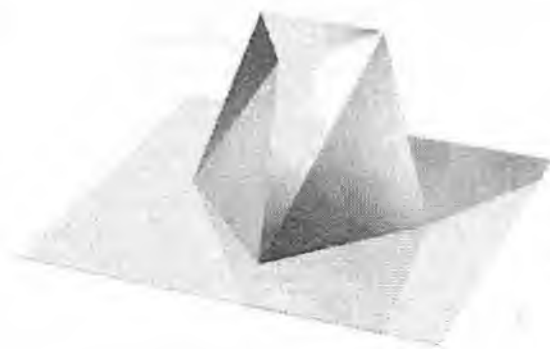
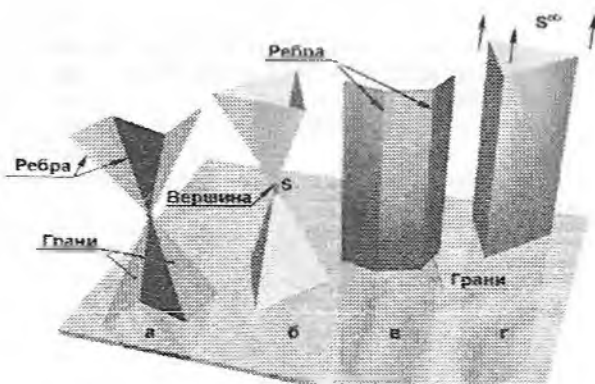


Рис. 9. Многогранная поверхность (а, б, в), призма (г) и многогранник (призматойд)

Наиболее распространенные правильные многогранники – призмы и пирамиды.

Существует пять правильных многогранников:

- Тетраэдр (четырегранник) – ограничен четырьмя равносторонними и равными треугольниками.
- Гексаэдр (четырегранник, или куб) – ограничен шестью равными квадратами.
- Октаэдр (восьмигранник) – ограничен

восемью равносторонними и равными треугольниками.

• Додекаэдр (двенадцатигранник) – ограничен двенадцатью равносторонними и равными пятиугольниками.

• Икосаэдр (двадцатигранник) – ограничен двадцатью равносторонними и равными треугольниками.

Вокруг всех правильных многогранников можно описать сферу.

Совокупность всех ребер и вершин многогранника называется его сеткой. Построение проекций многогранника сводится к построению проекций его сетки.

Призму, ребра которой перпендикулярны основанию, называют прямой. Если в основании прямой призмы - прямоугольник, призму называют параллелепипедом.

Многогранную поверхность называют **выпуклой** если она лежит на границе некоторого выпуклого тела в трехмерном пространстве.

Многогранные формы с древнейших времен преобладают в архитектуре и строительстве. В русском зодчестве разные периоды истории оставили многочисленные примеры совершенных произведений, где композиция сооружения представляет собой выразительное сочетание гранных форм (шатровые деревянные и каменные церкви, крепостные сооружения и др.). Многогранные формы широко применяются и в современной архитектуре.

Криволинейные поверхности

Задание поверхности

Математически криволинейная поверхность может быть задана как непрерывное множество точек, между координатами которых установлена зависимость, определяемая уравнением одного из типов:

$$z = f(x, y); \quad F(x, y, z) = 0.$$

Если функция задана многочленом n -й степени, то поверхность относится к **алгебраической** и считается поверхностью n -го порядка. Если функция трансцендентная, то и поверхность называется **трансцендентной**.

Примером задания алгебраической поверхности может служить представление параболоида вращения (рис. 10, а) следующим

уравнением (тип I):

$$z = a \cdot (x^2 + y^2).$$

Однако не всякая поверхность может быть задана таким уравнением. В ряде случаев одной комбинации значений x и y соответствует не одна, а две точки на поверхности (рис. 10, б). В подобных случаях поверхность задают неявной функцией (второй тип) или используют уравнение первого типа, но только для части поверхности.

Например, уравнение поверхности сферы, изображенной на рис. 10. б, имеет вид:

$$x = x(\alpha, \beta); \quad y = y(\alpha, \beta); \quad z = z(\alpha, \beta).$$

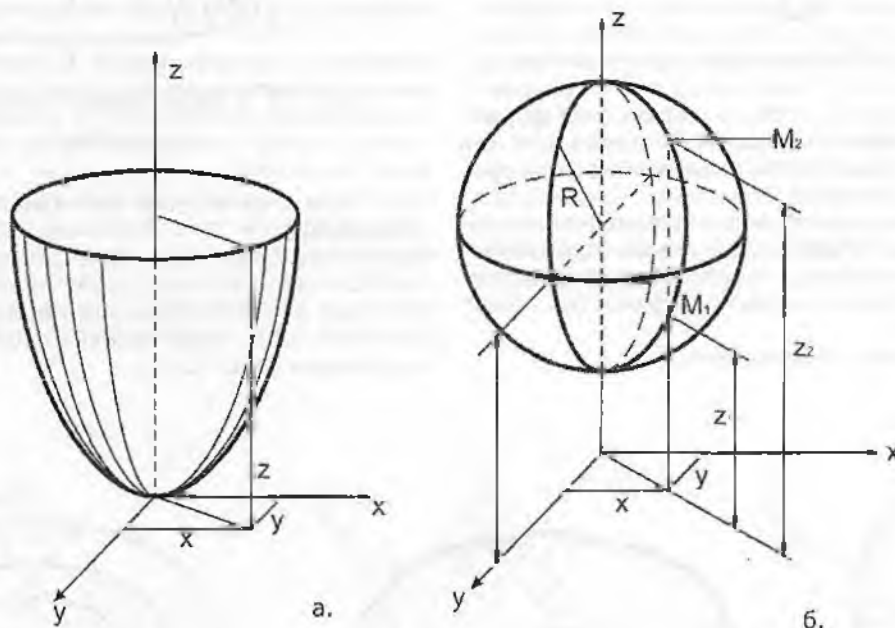


Рис. 10. Параболоид и сфера

Поверхность может быть задана и в параметрической форме:

$$x^2 + y^2 + (z - c)^2 = R^2.$$

Произвольно расположенная секущая плоскость пересекает поверхность по кривой

того же порядка (иногда распадающейся или мнимой), какой имеет исследуемая поверхность. Порядок поверхности может быть определен также числом точек ее пересечения с произвольной прямой, не принадлежащей целиком поверхности, считая все точки (действительные и мнимые).

В геометрии фигуры задаются графически, поэтому целесообразно поверхность рассматривать как совокупность всех последовательных положений $L_1, L_2, \dots$ некоторой перемещающейся в пространстве по определенному закону линии L (рис. 11).

В процессе образования поверхности линия L может оставаться неизменной или менять свою форму - изгибаться или деформироваться. Подвижную линию принято называть образующей, неподвижные - направляющими. Такой способ образования поверхности принято называть кинематическим.

По виду образующей различают поверхности **линейчатые** и **нелинейчатые**, образующая первых - прямая линия, вторых - кривая.

Линейчатые поверхности в свою очередь разделяют на так называемые **развертывающиеся**, которые можно без складок и разрывов развернуть на плоскость, и **неразвертывающиеся**.

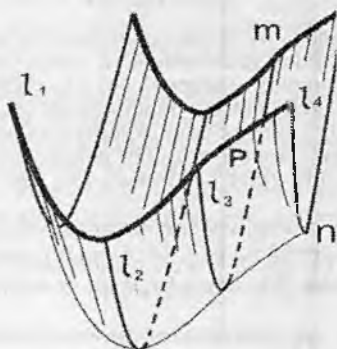


Рис. 11. Образование поверхности

Значительный класс поверхностей формируется движением окружности постоянного или переменного радиуса. Это так называемые циклические поверхности.

Если же группировать поверхности по закону движения образующей линии (производящей эти поверхности), то большинство встречающихся в строительстве поверхностей можно разделить на:

- поверхности вращения;

- винтовые поверхности;
- поверхности с плоскостью параллелизма;
- поверхности переноса.

Особое место занимают нелинейные поверхности, образование которых не подчинено никакому определенному закону. Оптимальную форму таких поверхностей определяют теми физическими условиями, в которых они работают и устанавливают их форму экспериментально (поверхности лопастей турбин, обшивка каркасов морских судов и самолетов).

Поверхности вращения - это поверхности, образуемые при вращении плоской кривой m (образующей) вокруг прямой i (оси вращения), проходящей через плоскость кривой (рис. 12).

Наиболее распространенные поверхности вращения с криволинейными образующими: сфера, эллипсоид, тор, параболоид и гиперболоид. Сфера образуется вращением окружности вокруг её диаметра (см. рис. 10,б).

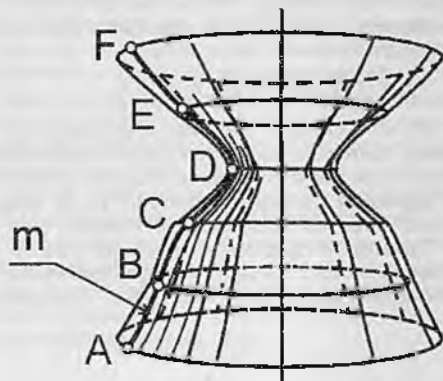


Рис. 12. Образование поверхности вращения

При сжатии или растяжении сферы она преобразуется в **эллипсоиды**, которые могут быть получены вращением эллипса вокруг одной из осей; если вращение происходит вокруг большой оси, то эллипсоид называется **вытянутым** (рис. 13,а), если вокруг малой - **сжатым** или **сфероидом** (рис. 13,б).

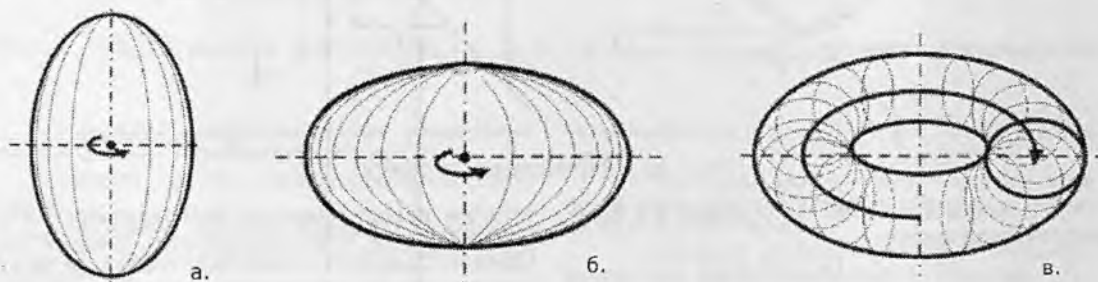


Рис. 13. Поверхности вращения: эллипсоиды (а, б) и тор (в)

Тор – поверхность тора формируется при вращении окружности вокруг оси, не проходящей через центр окружности (рис. 13,в).

Параболоид вращения – образуется при вращении параболы вокруг своей оси (см. рис. 14,а).

Гиперболоид вращения – различают одно- (рис. 14,б) и двухполостной (рис. 14,в) гиперболоиды вращения. Первый получается при вращении вокруг мнимой оси, а второй – вращением гиперболы вокруг действительной оси.

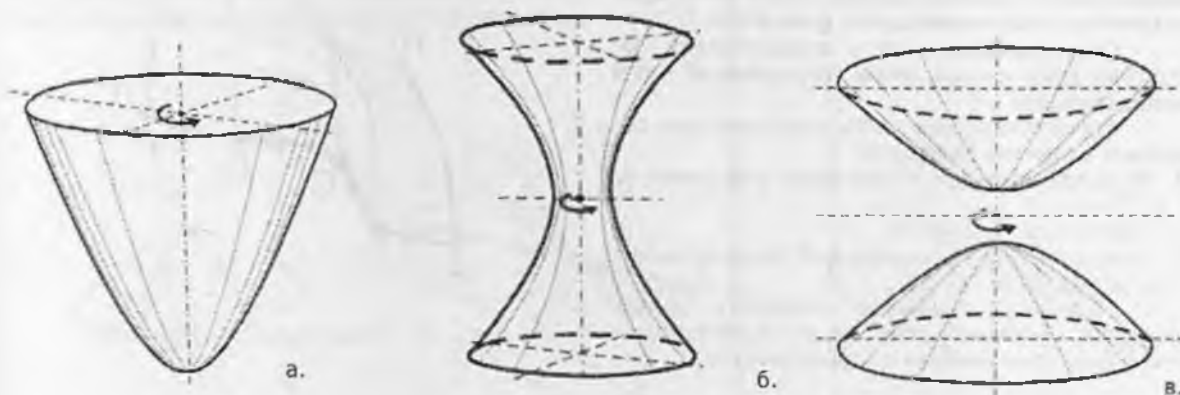


Рис. 14. Поверхности вращения: параболоид, одно- и двухполостной гиперболоиды

Винтовые поверхности образуются винтовым движением некоторой линии – образующей. Под винтовым движением понимается совокупность двух движений: поступательного параллельно некоторой оси, и вращательного, вокруг той же оси. При этом поступательное и угловое перемещение находятся в определенной зависимости.

Линейчатые поверхности с плоскостью параллелизма (поверхности каталана)

Поверхность с плоскостью параллелизма представляет собой множество прямых линий l (образующих), параллельных некоторой плоскости α (плоскости параллелизма) и пересекающих две данные направляющие m, n (рис. 15).

В зависимости от формы направляющих образуются три частных вида поверхностей.

Гиперболический параболоид. Гиперболическим параболоидом (гипаром) или косой плос-

костью называется поверхность, образованная движением прямолинейной образующей, параллельной плоскости параллелизма, по двум направляющим линиям – скрещивающимся прямым (рис. 15,а).

Цилиндроид. Цилиндром называется поверхность, образованная движением прямолинейной образующей по двум направляющим кривым линиям, при этом образующая во всех положениях параллельна плоскости параллелизма (рис. 15,б).

Коноид. Коноидом называется поверхность, образованная движением прямолинейной образующей по двум направляющим, одна из которых кривая линия, а другая прямая, при этом образующая во всех положениях параллельна плоскости параллелизма (рис. 15,в).

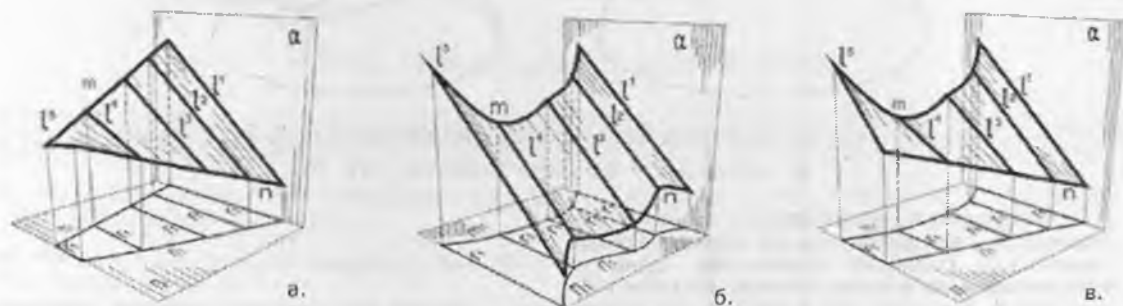


Рис. 15. Линейчатые поверхности: а – гипар; б – цилиндроид; в – коноид

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.С. Семенов

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Синтез искусства, техники и науки

Учебное пособие

Бишкек • 2010

Поверхности параллельного переноса

Поверхностью параллельного переноса называется поверхность, образованная поступательным плоскопараллельным перемещением образующей - плоской кривой линии m по криволинейной направляющей n (рис. 16).

Геометрическая часть определителя состоит из двух кривых линий образующей - m и направляющей - n .

Алгоритмическая часть определителя содержит перечень операций:

1. На направляющей n выбираем ряд точек $A, B, C, \dots$
2. Строим векторы $AB, BC, \dots$
3. Осуществляем параллельный перенос линии m по векторам $AB, BC, \dots$

Наглядным примером поверхности параллельного переноса может служить скользящая опалубка, применяемая в строительстве.

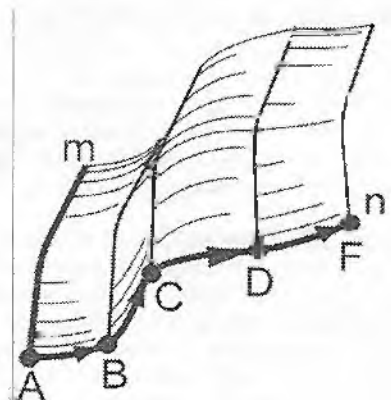


Рис. 16. Поверхность переноса

Касательная плоскость. Нормальные сечения. Кривизна поверхности

Касательная к поверхности плоскость в точке A представляет собой геометрическое место касательных векторов к кривым, лежащим на поверхности и проходящим через эту точку (рис. 17,а).

Перпендикуляр N к касательной плоскости в точке касания ее с поверхностью называется нормалью к поверхности (рис. 17,б). След пересечения поверхности с секущей плоскостью, проходящей через нормаль, представляет собой плоскую кривую, лежащую в поверхности и называемую нормальным сечением. Плоскость,

образующая нормальное сечение, может быть задана углом u , составленным этой плоскостью с некоторым начальным лучом, который лежит в касательной плоскости. Кривизна нормального сечения в точке A является функцией угла u и обозначается символом k_u (индекс u соответствует прямой в касательной плоскости, через которую проходит плоскость нормального сечения). Кривизна нормальных сечений в точке A , которых можно провести бесчисленное множество, характеризует кривизну поверхности в этой точке (рис. 17,б).

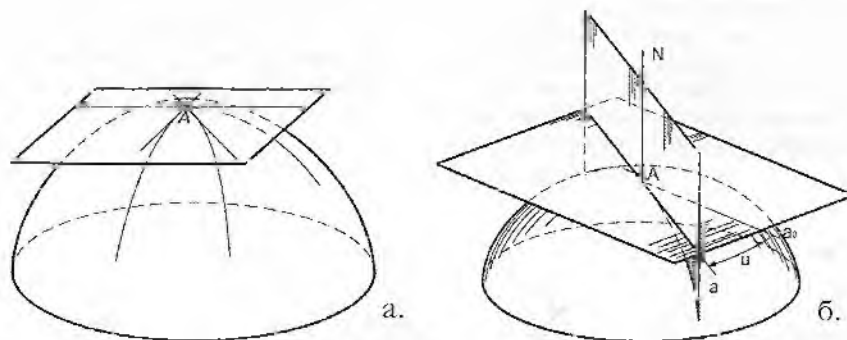


Рис. 17. Касательная к поверхности плоскость (а) и нормальное сечение поверхности (б)

Нормальные ортогональные сечения поверхности, проходящие через точку касания, называются главными кривизнами. Одна из главных кривизн в точке касания является максимальной, а другая - минимальной из множества кривизн всех нормальных сечений.

Средняя кривизна поверхности в данной точке определяется из выражения:

$$K_{\text{ср}} = \frac{k_1 + k_2}{2}.$$

Полная или гауссова кривизна поверхности в данной точке представляет собой произведение двух главных кривизн:

$$K = k_1 \cdot k_2 = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2},$$

где R_1 и R_2 - радиусы кривизны нормальных ортогональных сечений (см. рис. 18).

Если главные кривизны R_1 и R_2 имеют одинаковые знаки, то поверхность в исследуемой точке положительна и сама поверхность в этой точке имеет вид, показанный на рис. 18,а.

Если главные кривизны имеют разные знаки, то гауссова кривизна поверхности в исследуемой точке отрицательна, а поверхность в окрестностях этой точки имеет седлообразный вид (рис. 18,б).

Если одна из главных кривизн равна нулю, то гауссова кривизна поверхности в исследуемой точке равна нулю и поверхность имеет вид, изображенный на рис. 18,в.

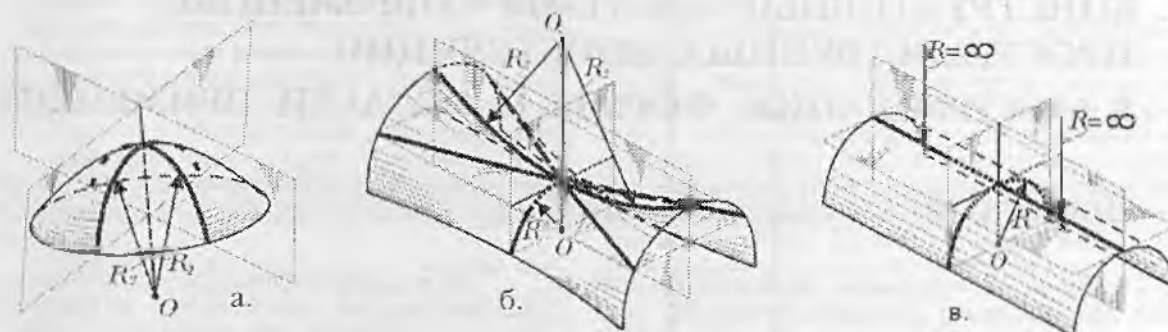


Рис. 18. Поверхности положительной (а); отрицательной (б) и нулевой (в) гауссовой кривизны

Точки поверхности, в которых главные кривизны равны нулю, называются точками уплощения; в их окрестности поверхность имеет сложные свойства.

Замечания о поверхности в целом.

Если во всех точках поверхности $K > 0$, то ее в целом можно назвать *поверхностью двоякой положительной гауссовой кривизны* (сфера,

эллипсоид). При $K < 0$ поверхность называется *поверхностью двоякой отрицательной гауссовой кривизны* (например, гиперболический параболоид). Наконец, если во всех точках поверхности $K = 0$, она называется *поверхностью одинарной или нулевой гауссовой кривизны* (цилиндр, конус, коноид - рис. 19).

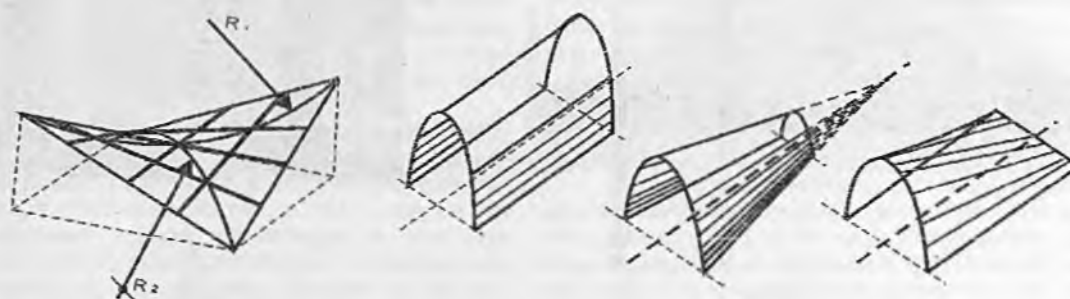


Рис. 19. Гипар, цилиндр, конус и коноид

Литература

1. Каган В.Ф. Основы теории поверхностей Ч. II. - М.: Гостехиздат, 1952. - 151 с.
2. Норден А. П. Теория поверхностей. - М.: Гостехиздат, 1956. - 260 с.
3. Филин А.П. Элементы теории оболочек. Изд. 2-е, доп. и перераб. - Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1975. - 256 с.
4. Михайленко В.Е., Ковалев С.Н. Конструирование форм современных архитектурных сооружений. - Киев: Будівельник, 1978. - 112 с.
5. Лекции по начертательной геометрии. - www.rusgraf.ru

Светлой памяти Алексея Петровича Морозова, Виктора Ивановича Трофимова, Бориса Анатольевича Миронкова и Виктора Борисовича Микулина – русских инженеров и ученых, внесших большой вклад в создание новых типов современных пространственных конструкций

1. КОНСТРУКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ СОВРЕМЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ. КЛАССИФИКАЦИЯ, ФОРМЫ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Введение

Практика строительства последних десятилетий демонстрирует большое количество примеров современных большепролетных зданий с разнообразными типами пространственных систем покрытий – конструктивно целесообразных, экономически эффективных, соответствующих современному уровню развития науки и техники. Такие покрытия позволяют перекрывать планы любой конфигурации, обеспечивают формирование различных объемно-пространственных решений и высокую архитектурную выразительность не только отдельных зданий, но и целых комплексов.

Что же представляют собой «современные» пространственные конструкции? История строительного искусства свидетельствует о том, что некоторые виды пространственных конструкций, такие как купола и своды, известны еще с древнейших времен. Достаточно вспомнить здания буддийского храма «Ступа» в Санчи (рис. 1.1), римского Пантеона (рис.1.2), лондонского Св. Павла (рис. 1.3), китайского «Неба» (рис. 1.4) и многих других культовых сооружений [1, 2].

Еще более древними примерами созданных человеком пространственных конструкций были,



Рис. 1.1

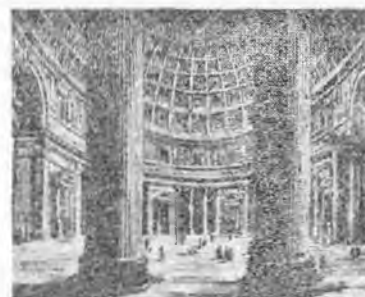


Рис. 1.2



Рис. 1.3



Рис. 1.4

как известно, простые укрытия, использовавшиеся жителями Земли много тысяч лет назад. И сделаны они были из подручных строительных материалов – дерева, тростника, камня, шкур животных и пр. Остатки этих укрытий найдены при археологических раскопках в разных странах мира, в том числе и в Кыргызстане. Простые по конструкции, некоторые из этих сооружений уже в то время имели пространственную форму.

Пространственные системы прошлого – это примеры архитектуры больших масс и громоздких конструкций, поскольку основным материалом для них был камень. Для того чтобы перекрыть пространство нужных размеров приходилось вовлекать в работу огромный массив этого материала. Форма классической архитектуры облегчается сверху, поскольку следует закону распределения масс в каменной конструкции. Основание постройки из таких конструкций всегда мощнее вершины, венчающей заключенное в этой постройке пространство.

Современной архитектуре нет нужды держиваться этой формы. Она имеет дело с материалами, многократно превосходящими по своим

конструктивным характеристикам камень. Монолитная железобетонная тонкостенная оболочка или стальная висячая конструкция способны сегодня перекрывать пролеты в сто и более метров, опираясь всего на четыре, три, две и даже на одну точку опоры. На плане любого современного здания площадь сечения опор занимает ничтожно малую часть всей перекрываемой площади.

Еще одно отличие современной архитектуры – широкое применение стекла не только в качестве элемента ограждения, но и как несущей (!) конструкции.

Современная архитектура демонстрирует неразрывную связь с последними достижениями науки и технологии. Сегодня металл, бетон, стекло не просто материалы для создания сооружений, а набор средств для конструирования пространства. Может быть, в переходе от концепции сооружения к концепции пространства как раз и заключается смысл происходящих перемен в новой архитектуре. Однако истинные возможности этой архитектуры не могут быть раскрыты без той значительной роли, которую играют в ней современные пространственные конструкции.

1.1. Общая классификация несущих систем в строительстве

Весь окружающий нас материальный мир, будь то живое существо, дерево, дом или машина, существует благодаря способности образующих их структур или несущих конструкций сохранять свою форму под воздействием различных внешних воздействий. Благодаря этой функции несущие конструкции превращаются в средство материального оформления среды, т.е. непосредственно в элемент архитектуры.

В связи с тем, что функционирование несущих конструкций подчинено законам механики, в основу их классификации может быть положен принцип работы, т.е. механизм восприятия внешних нагрузок.

Из курса сопротивления материалов известно, что в зависимости от вида и характера приложения нагрузок, различают конструкции, работающие на растяжение, сжатие, изгиб и кручение. Это внутренние усилия, от которых в сечениях элементов конструкций возникают напряжения. В свою очередь, напряжения зависят от формы конструкции, характера и направления действия усилий. Например, если усилие действует только в одном направлении, то напряженное состояние называется линейным или одноосным (растянутый трос).

Если усилия действуют одновременно в двух направлениях, то говорят о двухосном, или плоском напряженном состоянии (гибкая пластинка или мембрана). Если материал конструкции сжимается или растягивается во всех направлениях, то такое напряженное состояние называется трехосным или пространственным (объемным).

Наряду с видом напряженного состояния несущие системы разделяются по геометрическому признаку на линейные, двумерные (плоские) и пространственные (трехмерные). В линейных

системах материал конструкции концентрируется вдоль прямой (балка, колонна), кривой (арка, трос) или ломаной линии (рама). В двумерных несущих системах, таких как пластинки и оболочки, два измерения (размеры в плане) велики по сравнению с третьим (толщиной). Материал в таких системах образует поверхность, которая может быть плоской, пространственной или складчатой (многогранной). В зависимости от характера внешней нагрузки двумерные несущие системы могут быть напряжены одноосно или двухосно. К двумерным несущим системам можно отнести конструкции, образованные из соединенных между собой линейных, одноосно напряженных элементов. Примерами таких систем служат ферма и тростовая сетка.

Трехмерные несущие системы (их еще иногда называют массивными) имеют все три измерения одного порядка и могут иметь любую форму. Они образуются из линейных или плоских элементов, в которых может быть одноосное или двухосное напряженное состояние. По этому признаку различают пространственные стержневые (решетчатые) и пластинчатые системы.

В материальном мире отдельные виды напряженного состояния встречаются редко. Чаще всего возникают различные комбинации этих состояний и видов несущих систем. Чтобы разобраться в этом сплетении нагрузок, напряженных состояний и форм несущих конструкций, архитектор Хайно Энгель предложил разделить все существующие в строительстве несущие системы на пять видов (рис.1.5) [6].

К первому отнесены «активные по форме» (формулировка Х. Энгеля) несущие системы, т.е. криволинейные системы из одноосно напряженных гибких или жестких элементов (арки, ванты и т.п.).

Ко второму типу относятся «активные по вектору» несущие системы. В таких системах внешние нагрузки уравниваются внутренними усилиями сжатия и растяжения, возникающими в жестких элементах плоских или пространственных решеток.

К третьему типу Х. Энгель относит «активные по сечению» системы (балки, рамы, панели). Элементы таких систем работают преимущественно на изгиб и внешние нагрузки компенсируются нормальными и касательными напряжениями, возникающими в их поперечных сечениях.

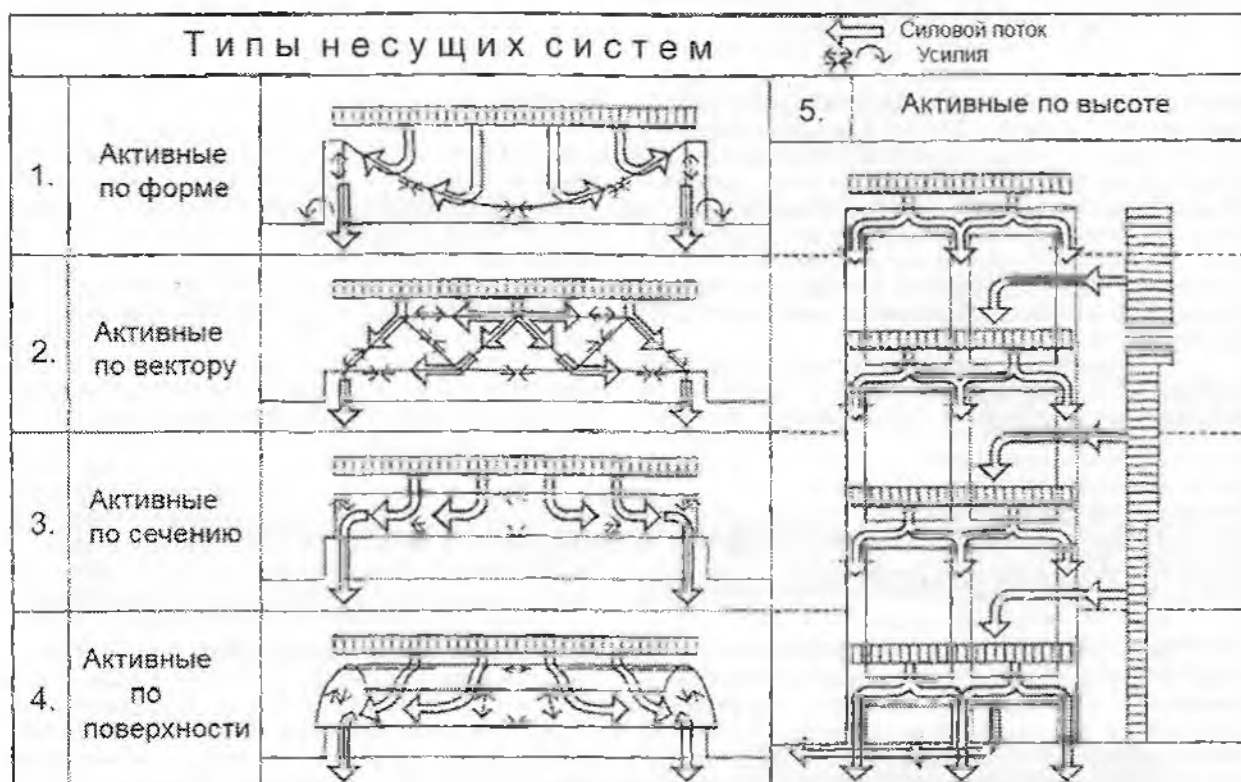


Рис. 1.5. Классификация несущих систем по Х. Энгелю

Наиболее интересным, на наш взгляд, типом являются так называемые «активные по поверхности» несущие системы. К ним относятся пластинки, складки и оболочки. Характерным признаком таких систем является восприятие внешних нагрузок за счет работы образующих их элемен-

тов на сжатие, растяжение и срез и «активной» формы поверхности.

И, наконец, к пятому типу отнесены «активные по высоте» несущие системы. В основном это высотные здания и сооружения различных конструктивных схем (каркасные, ствольные и т.д.).

1.2. Классификация и формы пространственных конструкций покрытий

Принимая во внимание существующие принципы общей классификации несущих систем, а также принципы и подходы системных исследований и проектного анализа [7, 8], рассмотрим признаки, по которым можно объединить разные типы пространственных конструкций покрытий (ПКП).

В основу известных классификаций таких систем [9, 10] положен конструктивный признак. При этом и в одной, и в другой классификации все-таки сделана попытка связать конструктивную схему покрытия с его формой (геометрией). В первой это ссылка на «вспарушенные», «плоские» и «провисающие» покрытия. В другой, более наглядной классификации, форма покрытия пред-

ставлена в виде рисунков.

Как в общей классификации несущих систем, так и в классификации пространственных конструкций покрытий можно выделить основные и второстепенные признаки.

Главными или основными признаками классификации ПКП, на наш взгляд, являются:

- геометрия (форма) поверхности;
- конструктивная схема;
- характер работы основных элементов;
- структурные особенности.

К второстепенным относятся:

- материал, из которого изготовлены основные конструктивные элементы;
- форма плана перекрываемого здания (помещения).

Дополнительными признаками являются способ изготовления и монтажа ПКП. Например, оболочки могут быть сборными, монолитными или сборно-монолитными. По способу монтажа ПКП можно разделить на монтируемые на проектной отметке и собираемые на уровне земли с последующим подъемом в проектное положение.

Для наглядности предлагаемая классификация пространственных конструкций покрытий представлена в табл. 1.1 (Лист 1.1).

Почему мы разделяем признаки на главные и второстепенные? Попробуем объяснить это на конкретном примере. В практике современного строительства одну и ту же конструкцию можно изготовить из любого известного строительного материала. Например, балка и купол могут быть деревянными, стальными, железобетонными и даже стеклянными!

Вот что говорил по этому поводу известный немецкий специалист по пространственным конструкциям д-р Герман Рюле: «... уже миновало время строгого разделения конструкций по материалам. Будущее принадлежит оптимально спроектированным конструкциям, в которых используются различные материалы в полном соответствии с их положительными свойствами и функциональными требованиями. Поэтому если сейчас еще удается формально разделить железобетонные оболочки, стальные пространственные конструкции, висячие и вантовые покрытия, пневматические конструкции и т.д., то по существу их нужно рассматривать как нечто единое. Очень часто возможно весьма эффективное сочетание этих конструкций точно так же, как постоянно обнаруживается их общность в аспектах конструктивных решений и технологии изготовления. Единство формы, конструкции и технологии дополняется, таким образом, и единством подхода к материалу» [11].

То же относится и к форме перекрываемого плана, хотя вполне возможно по этому признаку разделить все покрытия на конструкции простой или правильной (квадрат, прямоугольник, круг и т.п.) и сложной (составной, криволинейной и т.п.) формы плана.

Что же касается основных признаков, то они вполне определенно характеризуют не только тот или другой тип ПКП, но и внутреннюю взаимосвязь между ними. Например, форма во многих случаях определяет и характер работы основных элементов.

Классификация ПКП по форме поверхности

По геометрии поверхности ПКП можно разделить на покрытия с единой (постоянной) формой поверхности и на покрытия сложной или составной формы (рис. на листах 1.2, 1.3).

В свою очередь, ПКП с единой формой поверхности подразделяются на покрытия нулевой, положительной и отрицательной гауссовой кривизны. К покрытиям на плоской основе относятся покрытия с плоской формой поверхности (поверхности первого порядка) – пространственные плиты, панели, складки.

Покрытия составной формы поверхности образуются сочетанием элементов либо с единой формой (волнистые и зонтичные оболочки), либо из элементов с различной формой поверхности (купольно-складчатые покрытия и др.).

Отдельный вид – покрытия сложной, произвольной формы поверхности. Такие поверхности в строительстве применяются достаточно редко, однако используются в самолето- и судостроении, гидроэнергетике (лопатки турбин и др.).

Классификация ПКП по конструктивным признакам

Согласно сложившимся представлениям, по конструктивным признакам все типы пространственных конструкций покрытий можно разделить на восемь групп. Первые две группы составляют конструкции, образованные плоскими или криволинейными гранями – это плиты-настилы, складки и шатры.

В отдельные группы мы выделяем жесткие оболочки, системы регулярной структуры, висячие покрытия и мягкие оболочки. И совершенно самостоятельные группы составляют трансформируемые и комбинированные конструкции покрытий.

Подробнее о каждом типе пространственных конструкций будет рассказано в специальных разделах пособия.

Классификация ПКП по структурным особенностям

По основным признакам, характеризующим структурные особенности, все пространственные конструкции можно разделить на: гладкие; ребристые; складчатые; сетчатые; пластинчатые и конструкции комбинированной структуры.

Для примера, определяющего структурные особенности той или другой конструкции, рассмотрим один из наиболее известных типов – покрытие в виде купола. По геометрии поверхности купол относится к покрытиям положительной гауссовой кривизны. По конструктивным признакам купол относится к оболочкам или комбинированным покрытиям. А по структурным особенностям купол может быть гладким, ребристым, складчатым и сетчатым (подробнее смотри 2.3.3). Кроме того, сетчатые (стержневые) купола могут быть однослойными, двух- и многослойными.

Классификация ПКП по характеру работы основных элементов

Почему в классификации по этому признаку мы выделяем основные и неосновные несущие элементы? Любое покрытие – это система связанных между собой элементов или конструкций. Если это жесткая оболочка, то у нее есть плита и контурные элементы – фермы, арки и др. В свою очередь, покрытие в виде висячей оболочки состоит, как минимум, из пролетной части – тросов или мембраны и опорного контура. В первом случае оболочка работает на сжатие, во втором – на растяжение. При этом контурные элементы могут испытывать усилия как сжатия-растяжения, так и изгиба.

Классификация ПКП по форме плана перекрываемого пространства

Для специалистов не секрет, что современные пространственные конструкции позволяют перекрывать здания практически любой конфигурации плана. Конечно же, для каждого типа ПКП есть свои предпочтительные формы. Например, для висячих покрытий это простые симметричные формы – круг, прямоугольник и т.д. Системы регулярной структуры и мягкие оболочки более свободны в выборе возможной формы плана.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД		
Признаки	Пространственные конструкции покрытий	
1. Геометрия поверхности	1.1. Простая (единая) форма поверхности	1.1.1. На плоской основе 1.1.2. Нулевой гауссовой кривизны 1.1.3. Положительной гауссовой кривизны 1.1.4. Отрицательной гауссовой кривизны
	1.2. Составная форма 1.2.1. многогранная 1.2.2. волнистая	1.2.1. Из элементов одной формы 1.2.2. Из элементов разной формы
	1.3. Произвольная форма поверхности	
2. Конструктивная схема	2.1. Плиты - настилы, панели - оболочки	Комбинированные системы покрытий
	2.2. Складки, шатры	
	2.3. Жесткие оболочки	
	2.4. Системы регулярной структуры	
	2.5. Висячие системы	
	2.6. Мягкие оболочки	
	2.7. Трансформируемые покрытия	
3. Структурные особенности	3.1. Гладкие	оболочки, мембраны
	3.2. Ребристые (подкрепленные)	кессоны, своды, купола
	3.3. Складчатые	своды, купола
	3.4. Сетчатые (стержневые) 3.4.1. однослойные, 3.4.2. многослойные	оболочки, купола, висячие покрытия
	3.5. Пластинчатые	плиты - настилы
	3.6. Покрытия комбинированной структуры	
4. Характер работы основных элементов	4.1. Сжатие	Комбинация усилий
	4.2. Растяжение	
	4.3. Изгиб	
	4.4. Кручение	
5. Форма плана	5.1. Простая	правильная геометрическая фигура
	5.2. Сложная (составная)	неправильная геометрическая фигура
	5.3. Произвольная форма плана	
6. Материал основных элементов	6.1. Железобетон	Комбинация материалов
	6.2. Армоцемент	
	6.3. Металл	
	6.4. Древесина	
	6.5. Синтетические ткани, пленки	
Лист 1.1		Табл. 1.1

ТИПЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, РАЗЛИЧАЕМЫХ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКОМУ ПРИЗНАКУ

покрытия на плоской основе (пространственные плиты):



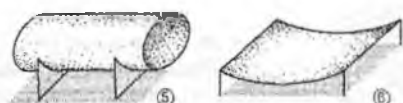
1- с одноостным расположением элементов (складки);

2- с двухосным расположением элементов (плиты);

*покрытия одинарной - нулевой гауссовой кривизны
и сходные с ними призматические оболочки:*



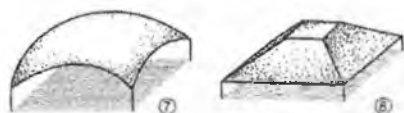
3 и 4- цилиндрическая и призматическая оболочка (своды соответственно);



5- замкнутая цилиндрическая оболочка;

6- цилиндрическая оболочка висячего типа;

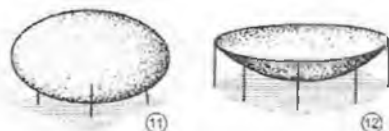
*покрытия двойкой - положительной гауссовой кривизны
и сходные с ними выпуклые многогранные оболочки:*



7 и 8- эллиптическая парусная и пирамидальная (шатровая) оболочки соответственно;



9 и 10- сферический и многогранный (геодезический) купола соответственно;



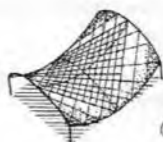
11- замкнутая эллиптическая оболочка;

12- эллиптическая оболочка висячего типа (чашевидная);

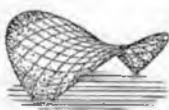
Лист 1.2

ТИПЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, РАЗЛИЧАЕМЫХ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКОМУ ПРИЗНАКУ (продолжение)

покрытия двоякой - отрицательной гауссовой кривизны



13



14

13 и 14 - гиперболические (седловидные) оболочки с прямолинейными (13) и криволинейными (14) образующими;



15



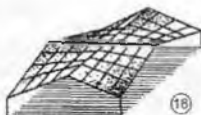
16

15 и 16 - оболочки висячего типа (седловидная и шатровая соответственно).

покрытия составной формы поверхности

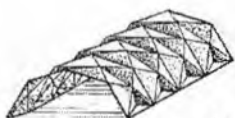


17



18

17 и 18 - составные гиперболические оболочки (двухсекционная и четырехсекционная соответственно);

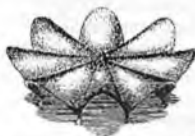


19

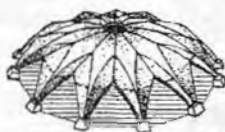


20

19 и 20 - складчатый и волнистый своды соответственно;



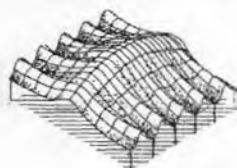
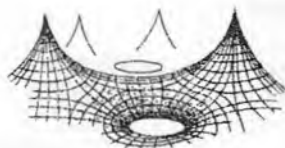
21



22

21 и 22 - зонтичная и купольно-складчатая оболочки соответственно;

покрытия сложной формы поверхности



Классификация ПКП по материалу основных несущих конструкций

Что касается классификации ПКП по материалу, то, как уже говорилось выше, сегодня практически нет пространственной несущей конструкции, изготовленной из одного материала. Как правило, ПКП проектируются и изготавливаются из комбинаций разных материалов. Например, железобетонная оболочка опирается на стальные фермы-диафрагмы, а стальная оболочка-мемб-

рана закрепляется к железобетонному опорному контуру.

В качестве примера на странице 24 приведена наиболее наглядная, на наш взгляд, классификация пространственных конструкций покрытий. Эта классификация предложена специалистами ЛенЗНИИЭПа [10]. Она несколько отличается от классификации табл. 1.1, но эти отличия не носят принципиального характера и классификации отличаются лишь деталями.

1.3. Области применения пространственных конструкций

Сегодня нет ни одной отрасли строительства, в которой не применялись бы пространственные конструкции. В гражданском строительстве это покрытия и перекрытия общественных зданий: спортивных и выставочных залов, кинотеатров, крытых торговых центров и т.д.; в промышленном и сельскохозяйственном строительстве пространственные системы используются в качестве несущих и ограждающих конструкций зданий самого разного назначения. Это и производ-

ственные, и складские здания, гаражи и стоянки сельскохозяйственной техники и т.д.

Многими исследованиями установлено, что если при пролетах зданий до 24 метров рациональность применения пространственных конструкций сопоставима по расходу материалов и стоимости с плоскостными системами, то при больших пролетах применение пространственных конструкций становится единственно возможным и экономически оправданным (рис. 1.6) [10-12].

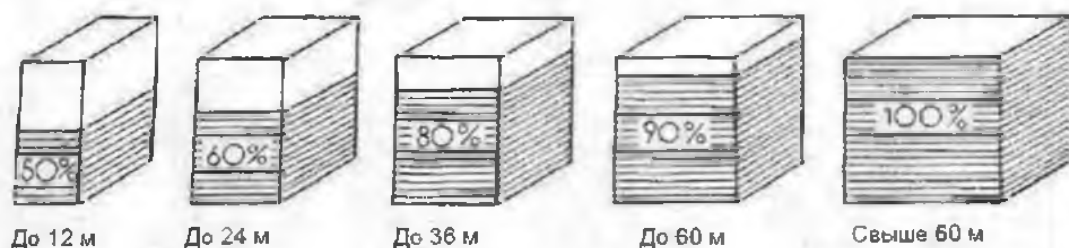


Рис. 1.6. Области (объемы) рационального применения пространственных конструкций в зависимости от величины перекрываемого пролета

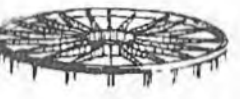
Наглядное подтверждение этому можно увидеть на графике рис.1.7.



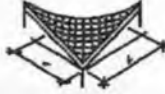
Рис. 1.7. Зависимость расхода стали от величины перекрываемого пролета для различных типов несущих систем

Конечно же, возможности современных пространственных систем не ограничиваются рациональными пролетами. В отдельных случаях вполне допустимо их применение и для зданий больших пролетов (табл. 1.2). Но такое решение должно быть обосновано архитектурными и экономическими критериями.

КЛАССИФИКАЦИЯ И ФОРМЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

КОНСТРУКЦИИ "НА ПРОЛЕТ"	ЖЕСТКИЕ ОБОЛОЧКИ	СИСТЕМЫ РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ	ВИСЯЧИЕ СИСТЕМЫ		ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ ПОКРЫТИЯ
■ ПЛИТЫ НАСТИЛЫ  ■ СКЛАДКИ  ■ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ОБОЛОЧКИ  ■ СВОДЫ 	■ КРЕСТОВЫЕ СВОДЫ  ■ ОБОЛОЧКИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ КРИВИЗНЫ  ■ ЗОНТИЧНЫЕ ОБОЛОЧКИ  ■ КУПОЛА  ■ ОБОЛОЧКИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КРИВИЗНЫ 	■ СТРУКТУРНЫЕ ПЛИТЫ С ПЕРЕКРЕСТНЫМИ РЕБРАМИ  ■ СТРУКТУРНЫЕ ПЛИТЫ СТЕРЖНЕВЫЕ  ■ СТРУКТУРНЫЕ ПЛИТЫ ПЛАСТИНЧАТЫЕ  ■ СЕТЧАТЫЕ ОБОЛОЧКИ, СВОДЫ И ДР.  ■ СЕТЧАТЫЕ КУПОЛА 	■ ПОДВЕСНЫЕ КОНСТРУКЦИИ  ■ ФЕРМЫ ИЗ ТРОСОВ  ■ СЕТКИ ИЗ ТРОСОВ  ■ СЕТКИ ИЗ ТРОСОВ И БАЛОК 	■ ВИСЯЧИЕ ОБОЛОЧКИ  ■ КОНСТРУКЦИИ С ЖЕСТКИМИ ВАНТАМИ  ■ МЕМБРАНЫ  ■ КОМБИНИРОВАННЫЕ ВАНТОВЫЕ ПОКРЫТИЯ 	■ ТЕНТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ  ■ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ  ■ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ ЖЕСТКИЕ ПОКРЫТИЯ 
РАБОТАЮЩИЕ В ОСНОВНОМ НА ИЗГИБ	РАБОТАЮЩИЕ В ОСНОВНОМ НА СЖАТИЕ	РАБОТАЮЩИЕ В ОСНОВНОМ НА ИЗГИБ	ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАБОТАЮТ НА РАСЯЖЕНИЕ		РАБОТАЮЩИЕ НА РАСЯЖЕНИЕ
РАБОТАЮЩИЕ В ОСНОВНОМ НА СЖАТИЕ	РАБОТАЮЩИЕ В ОСНОВНОМ НА СЖАТИЕ И РАСЯЖЕНИЕ	РАБОТАЮЩИЕ КАК БЕЗЫЗГИБНЫЕ СИСТЕМЫ (СЖАТИЕ - РАСЯЖЕНИЕ)	РАБОТАЮЩИЕ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ		

РАБО
УСЛО
РАБ
СЖ
РАБ
И
РА
РА
РА

ПРОЛЕТЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ			
Типы конструкций		Пролёты, м	
Конструктивная схема	Эскиз	Рациональные	Возможные
Складки (железобетон, армоцемент, металл)		18 - 36	40 - 60
Железобетонная панель-оболочка нулевой гауссовой кривизны		18 - 24	24 - 36
Железобетонная панель-оболочка отрицательной гауссовой кривизны		18 - 24	24 - 30
Своды (железобетон)		12 - 36	< 60
Перекрёстные фермы (металл)		18 - 36	> 60
Стержневые плиты (металл)		24 - 100	> 200
Цилиндрические оболочки (железобетон)		18 - 36	40 - 60
Купола гладкие (железобетон)		50 - 150	> 200
Гиперболические параболоиды (железобетон, металл)		30 - 60	> 100 <
Комбинированные арочно-вантовые покрытия		60 - 180	> 250
Висячие подвесные покрытия с оттяжками		50 - 500	< 1000
Рёбристые, рёбристо-кольцевые купола (металл, древесина)		24 - 60	> 150
Пневматические конструкции		12 - 60	< 60 Табл.1.2

2. ЖЕСТКИЕ ОБОЛОЧКИ И СКЛАДКИ. КЛАССИФИКАЦИЯ И РАЗВИТИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФОРМ

Согласно сложившейся классификации к жестким оболочкам относятся тонкостенные конструкции, ограниченные двумя криволинейными плоскостями расстояние между которыми (толщина) мало по сравнению с другими размерами [45, 46].

Складками и шатрами называют конструкции (оболочки) образованные из соединенных между собой и образующих поверхность многогранника пластинок-граней.

На рис. 2.1 показана эволюция пространственных покрытий в виде оболочек и складок.



Рис. 2.1. Эволюция пространственных конструкций в виде оболочек и складок

Простой опыт с листом бумаги показывает, что очень тонкая изогнутая пластинка благодаря криволинейной форме приобретает большую со-

противляемость внешним силам, чем та же пластинка плоской формы (рис. 2.2) [36].

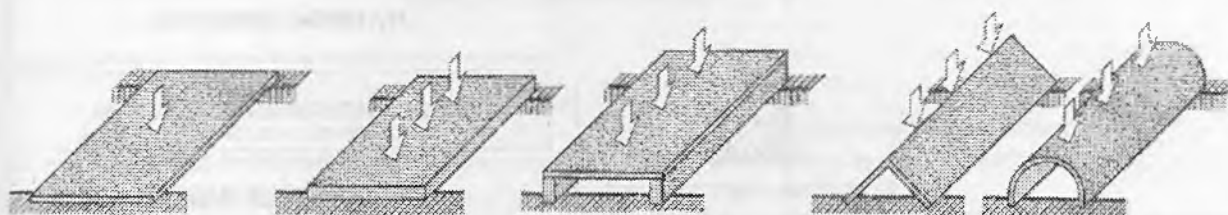


Рис. 2.2. Увеличение несущей способности при изменении только формы конструкции

Жесткие оболочки и складки могут вводиться над зданиями любой конфигурации в плане: прямоугольной, квадратной, круглой, овальной и т.п. (рис. 2.3). При этом даже весьма сложные по конфигурации оболочки могут быть разделены на ряд однотипных элементов [45].

Материалом для оболочек и складок (шатров) служат железобетон, армоцемент, металл, древесина, пластмассы, а также другие материалы, хорошо сопротивляющиеся сжимающим усилиям.

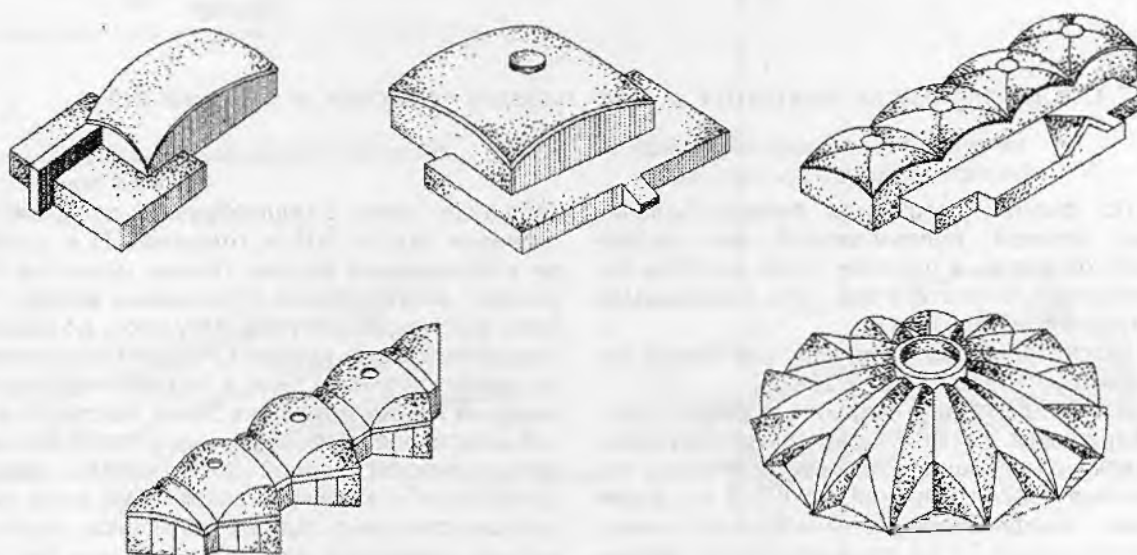


Рис. 2.3. Варианты компоновки зданий с покрытиями в виде оболочек

2.1. Панели-оболочки, плиты-настилы

К панелям-оболочкам и плитам-настилам относятся несущие конструкции «на пролет» образованные тонкой пространственной оболочкой или плоской плитой и контурными (подкрепляющими) элементами или ребрами в виде балок, ферм и т.д. К этой же группе можно отнести кессонные перекрытия (покрытия), у которых несущая плита по всей площади перекрываемого пространства опирается на систему ортогональных или диагональных балок. Рисунок кессонного

перекрытия можно увидеть в разделе 3 – Системы регулярной структуры. Как правило, эти конструкции опираются на стены или стропильные (подстропильные) элементы каркаса. Материалом для них служат железобетон и армоцемент. В литературе встречаются примеры выполнения панелей-оболочек из синтетических материалов.

Классификация покрытий в виде панелей-оболочек и плит-настилов представлена на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Классификация покрытий в виде панелей-оболочек и плит-настилов

По форме поверхности панели-оболочки бывают нулевой, положительной или отрицательной кривизны, а плоские плиты-настилы могут опираться по контуру или быть консольными (конструктивный признак).

Рассмотрим некоторые конструктивные решения таких панелей (лист 2.1) [16].

Панели-оболочки покрытий нулевой гауссовой кривизны типа КЖС совмещают несущие и ограждающие функции. Это предварительно напряженные панели шириной 1,5 и 3,0 м с двумя ребрами – диафрагмами сегментного очертания и плитой толщиной 30 мм цилиндрической формы. Работают эти панели как тонкостенные своды-оболочки. Геометрия обуславливает постоянство усилий в сжатой и растянутой зонах и погашение поперечных сил в ребрах. Плитами КЖС можно легко и удобно перекрывать одно-, двух- и многопролетные здания промышленного, гражданского и сельскохозяйственного назначения с подвесными и мостовыми кранами, с возможностью устройства свето- и аэрационных фонарей. При таком решении покрытия значительно сокращается число типоразмеров элементов, уменьшается объем здания и трудоемкость работ.

Железобетонная панель-оболочка отрицательной гауссовой кривизны представляет собой предварительно напряженную гладкую или

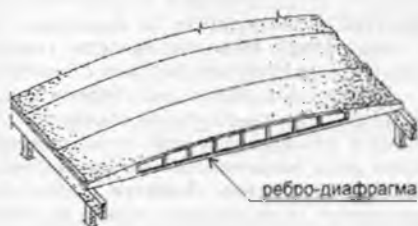
ребристую плиту с седлообразной поверхностью размером 3х12 и 3х18 м, толщиной 35 м с ребрами у продольных бортов. Панель пролетом 18 м усилена вертикальным продольным ребром (килем). Высота ребра от 200 мм у опор, до 500 мм в середине. Высота профиля – 500мм. Применяются панели пролетом 18 м и без киля при высоте профиля 700 мм и толщине 50мм. Жесткость и устойчивость элемента обеспечивается в основном геометрической формой самой панели. Область применения – актовые и спортивные залы школ, производственные здания. Интерьеры перекрываемых помещений могут быть решены без применения подвесных потолков.

Линейчатая армоцементная панель "бабочка" образуется двумя коноидальными поверхностями, сопряженными между собой по длинным сторонам предварительно напряженным ребрам. Размеры - 3х12, 3х15 и 3х18 м. Ребра, очерченные по дуге окружности, соединяются между собой с помощью сварки закладных деталей. Возможны решения покрытий с зенитными фонарями. Применяют такие покрытия над зальными помещениями самого различного назначения и без подвесных потолков.

Другие типы панелей-оболочек, представленные на листе 2.1 отличаются формой плиты и отдельными конструктивными элементами.

ПОКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОЛОЧЕК РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ФОРМ И ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ (КОНСТРУКЦИИ "НА ПРОЛЕТ")

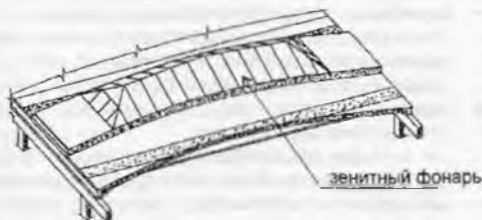
а. Цилиндрическая панель-оболочка
типа КЖС (поверхность нулевой
гауссовой кривизны)



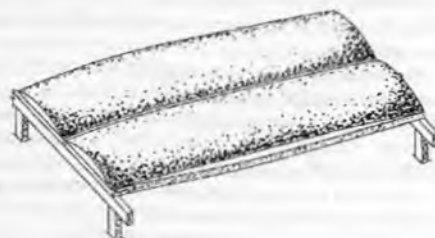
б. Железобетонная панель-оболочка
из элементов с отрицательной
гауссовой кривизной



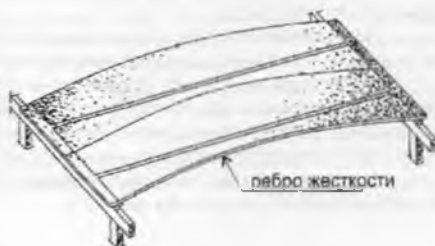
в. Линейчатая армоцементная панель
типа "Бабочка"



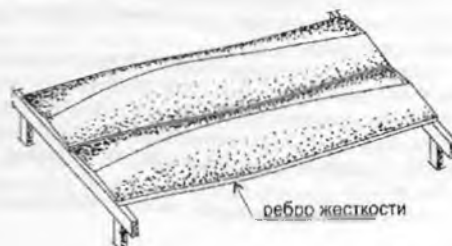
г. Армоцементные панели-оболочки
положительной гауссовой кривизны



д. Армоцементные панели с коноидальной
поверхностью и выпуклыми
продольными ребрами



е. Армоцементные панели с коноидальной
поверхностью и горизонтальными
продольными ребрами



Лист 2.1

2.2. Складки, шатры

Складками и шатрами называют конструкции, образованные из соединенных между собой и образующих поверхность многогранника пластинок-граней. Складки из прямоугольных пластинок называются призматическими. Балочные складки состоят из плоских элементов – граней, соединенных между собой под углом так, что в месте их сопряжения образуется прямолинейное ребро.

Покрытия из пластинок треугольной, трапециевидной и др. формы образуют шатры.

Складчатые покрытия состоят из ряда повторяющихся в определенном порядке складок, опирающихся на балки или диафрагмы жесткости. Такие покрытия чаще всего используются для перекрытия прямоугольных в плане зданий.

Шатровые покрытия по своим конструктивным и архитектурным особенностям больше всего подходят для зданий круглой или правильной полигональной формы в плане. К достоинствам шатровых конструкций можно отнести возможность устройства верхнего света, открытых проемов, а также технологичность. Такие конструкции в сборно-монолитном варианте целесообразны при устройстве междуэтажных перекрытий, в случае сетки колонн 12×12 м и больших полезных нагрузках (до 5 т/м^2). Кроме того, они не требуют устройства подвешенного потолка, а пустоты в самой конструкции перекрытия используются для прокладки инженерных коммуникаций.

Материалы для складчатых и шатровых покрытий

В качестве материалов для изготовления элементов складчатых покрытий используют железобетон (сборный и монолитный), армоцемент, металлы (сталь и алюминий), пластмассы, специальные типы фанеры, картон и др. Основными достоинствами железобетонных и армоцементных складок являются высокая степень унификации, относительно небольшой расход

материалов, возможность автоматизации процесса изготовления. Для складок из пластических масс характерна возможность придать элементам любую геометрическую форму, светопрозрачность, стойкость к воздействию агрессивных сред.

Однако складчатые конструкции из этих материалов не лишены недостатков. Так, сборные железобетонные складки обладают большим весом и требуют дополнительных затрат на транспортировку, а их монтаж – тяжелого кранового оборудования и устройства сложных подмостей. Конструкциям из пластмасс присущи повышенная деформативность, горючесть, склонность к старению, высокая стоимость.

Металл в наибольшей степени соответствует конструктивной форме складчатых конструкций, объединяя в себе основные преимущества двух вышеназванных материалов и не имея их недостатков. Пожалуй, единственным недостатком (относящимся только к стали) является необходимость создания антикоррозионной защиты тонкостенных профилированных листов. Но благодаря разработке недорогих высокоэффективных антикоррозионных синтетических покрытий и появлению специальных марок сталей этот недостаток может быть устранен.

Материалом шатровых покрытий чаще всего является монолитный или сборный железобетон. В практике проектирования и строительства известны шатровые покрытия, выполненные из стекла и металла. В этом случае грани шатра (пирамиды) образуются плоскими стальными решетками, на которые опирается стеклянное ограждение.

Ниже рассматриваются только призматические складки. Складчатые конструкции, применяемые в оболочках, системах регулярной структуры, комбинированных покрытиях рассматриваются в соответствующих разделах.

Классификация складчатых покрытий

Покрытия в виде складок и шатров можно разделить на две большие группы. К первой относятся призматические (линейные) складки; ко второй – многогранные.

По форме поперечного сечения призматические складки могут быть треугольные, трапециевидные, прямоугольные и др. По конструктивным особенностям они бывают открытые, закрытые, шедовые, встречные, консольные и т.д. (лист 2.2).

Встречаются складки комбинированного

типа, когда консольные свесы решены с открытым сечением, а пролетная часть – из складок замкнутого профиля.

По способу изготовления и монтажа складки и шатры бывают сборные и монолитные.

Шатровые покрытия являются многогранниками и их можно разделить как по форме, зависящей от количества граней, их конфигурации и пр., так и по форме перекрываемого плана.

Классификацию покрытий в виде складок и шатров можно увидеть на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Классификация покрытий в виде складок и шатров

2.2.1. Складки и шатры из железобетона и армоцемента

Конструктивные формы покрытий в виде складок и шатров из железобетона и армоцемента представлены на листах 2.2. и 2.3 [16].

Из треугольных и трапециевидных складок могут быть образованы так называемые шедовые покрытия, в которых часть площади наклонных граней заменяется ленточным остеклением.

Треугольные складки встречаются пролетом до 60 м, шириной не более 8 м. Ширина отдельных граней не превышает 3...3,5 м, толщина — не менее 50 мм.

На торцах складчатых покрытий предусматриваются диафрагмы жесткости в виде глухих стен, треугольных рам или пилообразных элементов. Кроме того, жесткость складок может быть обеспечена введением ребер жесткости и в пролете. Шаг ребер — 1,5-2,0 м.

Рекомендуемые пролеты складчатых покрытий (L): 12-36 м, высота (H): $1/10-1/20L$. ($H=1/10L$ — отвечает требованиям архитектурной выразительности, $H=1/20L$ — возможностям конструкции). При одном и том же пролете конструктивная высота трапециевидных складок несколько меньше, чем треугольных, поскольку при одной и той же высоте трапециевидные складки имеют значительно больший момент инерции.

Складки могут быть выпущены за пределы крайних опор, образуя консольные свесы. Толщину плоского элемента складки принимают около $1/200$ пролета, высоту элемента не менее $1/10$, а ширину грани — не менее $1/5$ пролета.

Складками обычно перекрывают пролеты до 50 – 60 м, а шатрами до 24 м.

При изготовлении складок из монолитного железобетона угол наклона граней рекомендуется принимать не более 35° . Это делается для того, что бы обеспечить возможность их бетонирования без двойной опалубки. Сборные железобетонные складки получают как из плоских, так и V-образных элементов. Грани армоцементных складок могут быть и криволинейного очертания.

Складчатые конструкции имеют целый ряд положительных качеств:

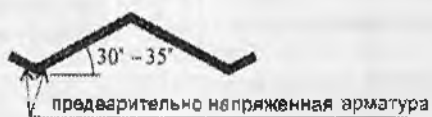
- простота формы и, соответственно, простота изготовления;
- возможности заводского изготовления;
- экономия высоты помещения и др.

Применение складок с открытым сечением позволяет обогатить пластику фасадов, особенно при наличии консольного свеса, а также интерьер, однако, усложняет гидро-, паро- и теплоизоляционные работы.

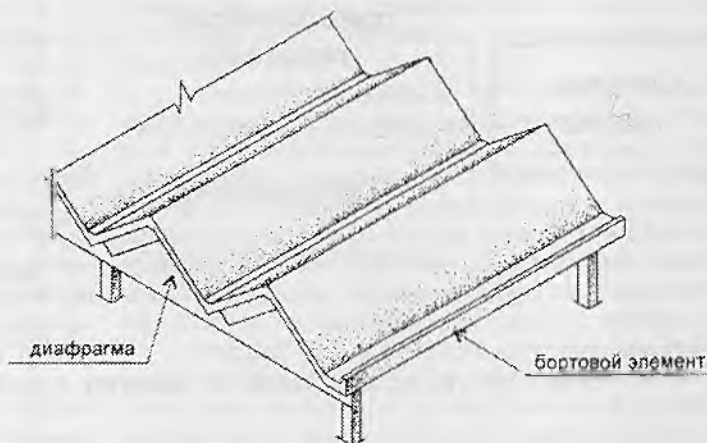
Складки замкнутого профиля, сохраняя выразительность в интерьере, позволяют упростить вопросы изоляции и размещения инженерных коммуникаций. Кроме того, плоская верхняя плита включается в работу конструкции, что позволяет уменьшить высоту покрытия. На фасад такие складки не выводят. Область применения всевозможных складок — здания трапециевидной и сложной (криволинейной) формах плана.

СКЛАДЧАТЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА (армоцемента)

Монолитная складка



Треугольная складка

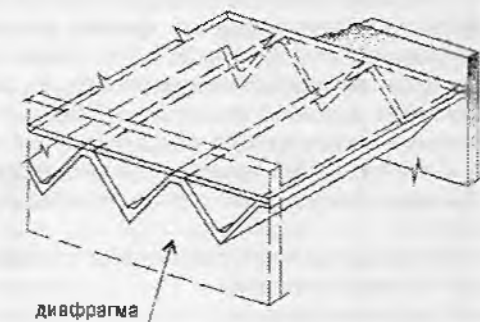


Сборная складка

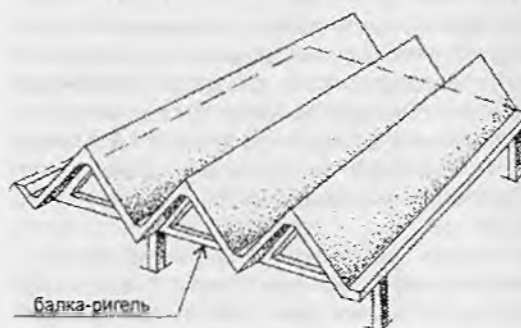


Варианты треугольных складок

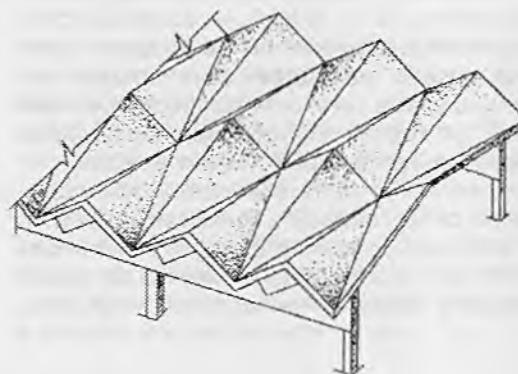
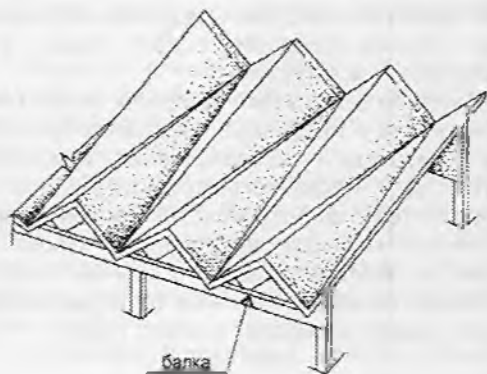
Складка замкнутого профиля



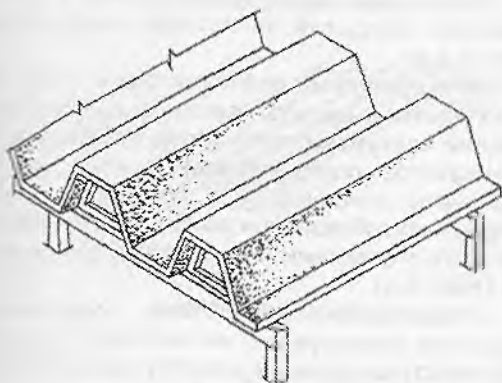
Веерообразная складка



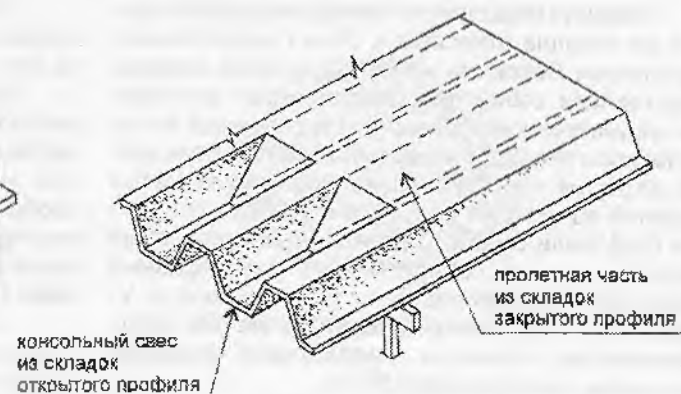
Встречные складки



Трапецевидная складка



Трапецевидная складка
комбинированного типа

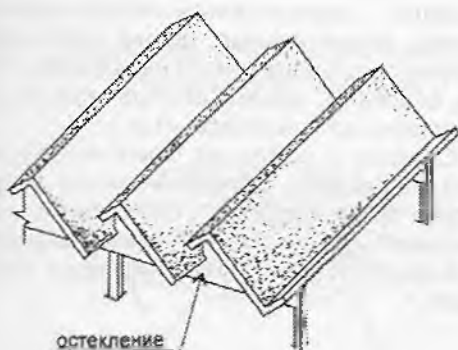


Сборные складки

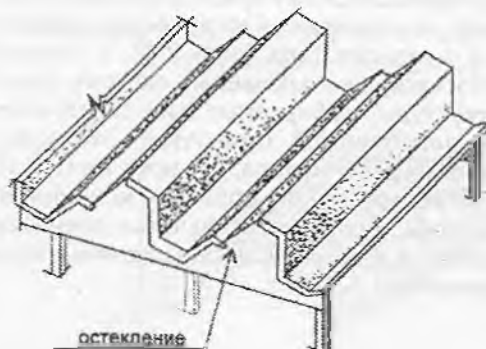


Складчатые шедовые покрытия

Из треугольных складок

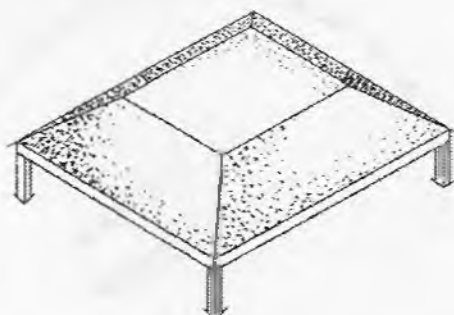


Из трапецевидных складок

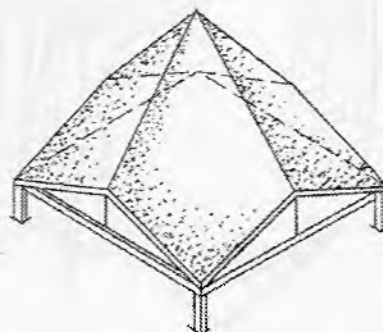


Шатровые (многогранные) покрытия

Шатер на прямоугольном основании
с плоским верхом



Четырехгранный шатер
на квадратном плане



Лист 2.3

2.2.2. Складки и шатры из металла

Первые сведения о складчатых конструкциях из металла относятся к 30-м годам прошлого столетия. Покрытия из металлических складок представляли собой пространственные трехгранные металлические фермы и закрепленный на их наклонных гранях тонколистовой настил. Дальнейшее развитие конструктивные формы складчатых покрытий из металла получили в 40..50-х гг., когда в США были выданы патенты на бескаркасные сводчатые здания, собираемые из лоткообразных элементов трапецевидного, треугольного и V-образного поперечного сечения. В это же время обозначились основные направления развития этого вида конструкций [15].

Первое направление – это формирование систем из тонкостенных лоткообразных элементов, второе – из ромбических (треугольных) элементов и третье – формирование систем из пространственных элементов сложной конфигурации (так называемых элементов пространственной структуры профилирования). Складчатые элементы получают из тонколистовой заготовки холодной гибкой.

По конструктивному признаку складчатые покрытия из металла можно разделить на четыре группы. К первой группе относятся линейные складки, опирающиеся на каркас. Довольно большую группу составляют бескаркасные здания сводчатого и рамного типа (лист 2.4). К третьей группе относятся так называемые системы регулярной структуры, собираемые из складчатых элементов пластинчатой структуры. Это кристаллические своды и купола, а также плиты. И, наконец, четвертую группу образуют комбинированные системы, у которых складчатые элементы присутствуют и в покрытии, и в поддерживающих его конструкциях.

Описанные выше конструктивные формы складчатых покрытий из металла представлены на листе 2.4.

По структурным особенностям в таких покрытиях можно выделить конструкции с жесткими несущими контурами, а по форме профилированных элементов, определяющей их класс, на лоткообразные, ромбические и объемные. В свою очередь, лоткообразные и ромбические элементы могут быть с плоскими или криволинейными гранями (лист 2.5).

Характерными признаками, отличающими складчатые конструкции из металла от других типов пространственных конструкций, являются высокая степень тонкостенности элементов при одновременном увеличении их общих размеров; максимальная унификация, а также форма элементов, позволяющая перевозить их в компактном виде за счет вкладывания элементов один в один.

Если первые здания с покрытиями в виде металлических складок имели пролеты 12..18 метров, то сегодня благодаря научным исследованиям и разработкам специалистов их пролеты достигают 60..72 и более метров [15, 19, 24].

Область применения складчатых покрытий из металла – здания сельскохозяйственного назначения, общественные здания спортивного и культурно-развлекательного назначения (крытые корты, бассейны, универсальные спортивные залы выставочные комплексы ит.д.).

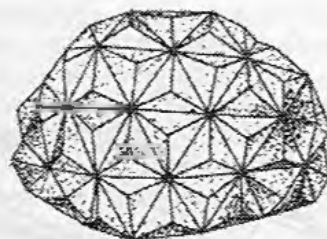
Складки и шатры из синтетических материалов (пластмасс, стеклопластиков и пр.) чаще всего применяются в виде сводов, куполов и в комбинированных системах. Поэтому они рассматриваются в соответствующих разделах пособия.

СКЛАДЧАТЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ МЕТАЛЛА

Опирающиеся на каркас



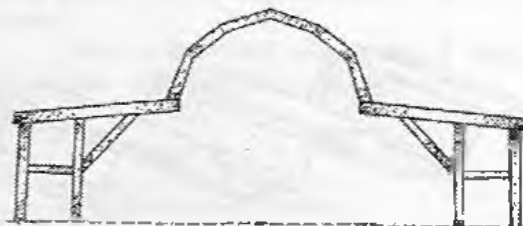
Покрывтия регулярной структуры



Бескаркасные

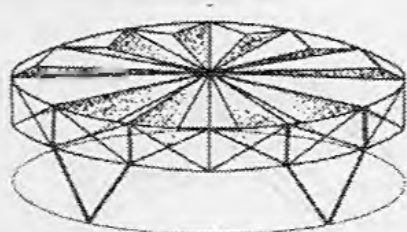


Комбинированные покрытия

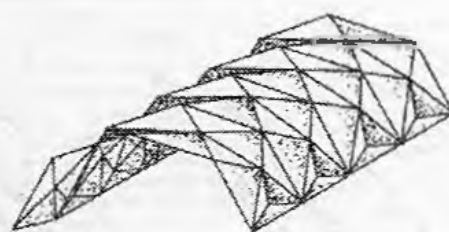


Примеры конструктивных решений складчатых покрытий

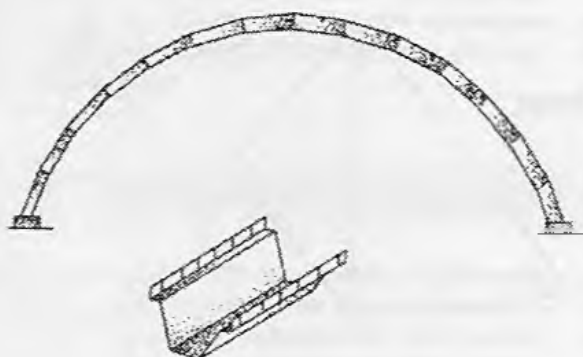
Опирающееся на V-образные стойки
кровельное покрытие



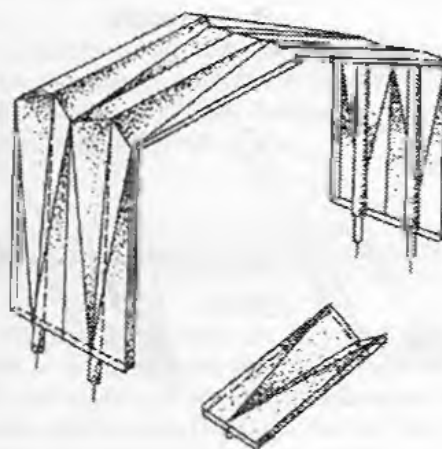
Бескаркасное складчатое покрытие
из треугольных элементов



Бескаркасное сводчатое покрытие
из трапецевидных элементов

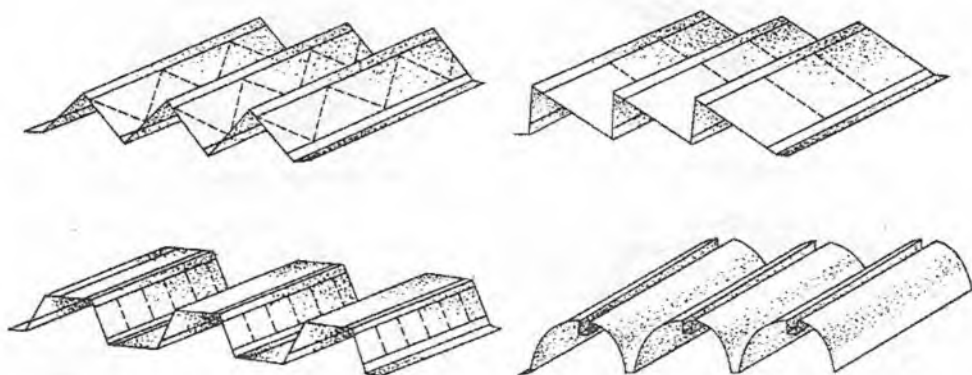


Бескаркасное здание рамного типа
из элементов сложной конфигурации



Лист 2.4

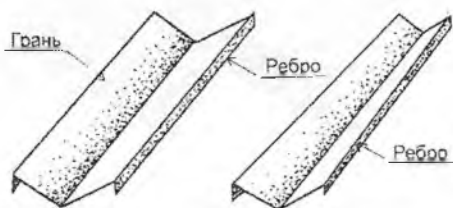
СКЛАДЧАТЫЕ СИСТЕМЫ ИЗ МЕТАЛЛА С ЖЕСТКИМИ НЕСУЩИМИ КОНТУРАМИ



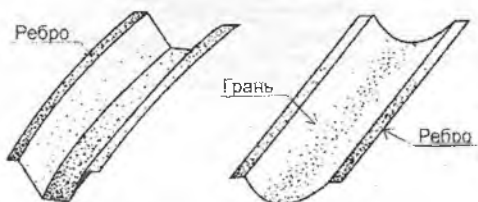
Классы профилированных элементов

Лоткообразные

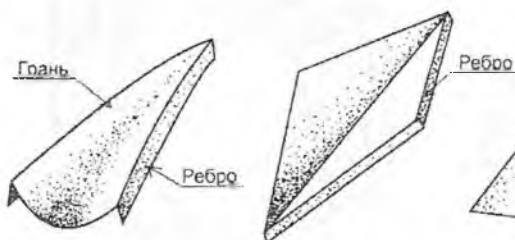
С плоскими гранями



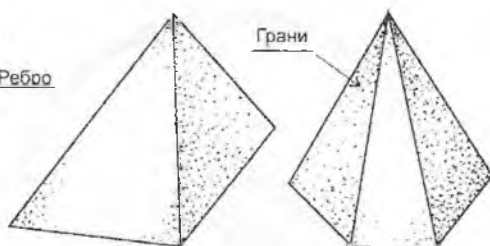
С криволинейными гранями



Ромбические



Объемные



2.3. Жесткие оболочки

Классификация покрытий в виде жестких оболочек

Тонкостенные оболочки являются одним из наиболее эффективных видов пространственных покрытий, которые используются при строительстве зданий с большими пролетами (ангаров, стадионов, рынков и т.п.). Напомним, что тонкостенная оболочка представляет собой изогнутую поверхность, которая при минимальной толщине, небольшой массе и расходе материалов обладает очень большой несущей способностью – благодаря криволинейной форме она работает как пространственная несущая конструкция.

По геометрии поверхности все покрытия в виде жестких оболочек можно разделить на три группы: оболочки одной формы поверхности; оболочки составной формы и оболочки произвольной формы поверхности.

В свою очередь, оболочки одной формы могут иметь поверхности нулевой (одинарной), положительной или отрицательной (двоякой) кривизны, а сопряженные оболочки могут быть образованы из элементов либо одной геометрии поверхности, либо из элементов разной формы.

В отдельную группу можно выделить покрытия в виде панелей-оболочек, имеющих разную форму поверхности и плоские покрытия в виде плит-настилов.

По конструктивной схеме все оболочки могут быть гладкими, ребристыми (подкрепленными), волнистыми, складчатыми и комбинированными.

Классификация покрытий в виде жестких оболочек представлена на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Классификация пространственных покрытий в виде жестких оболочек

Как видно из представленной классификации, к покрытиям нулевой гауссовой кривизны относятся цилиндрические и конические оболочки, а также коноиды.

К покрытиям положительной кривизны относятся купола и парусные (пологие) оболочки. Сводчатые и купольные покрытия мы выделяем в отдельную подгруппу.

2.3.1. Оболочки различной формы поверхности

Цилиндрические оболочки имеют круговое, эллиптическое или параболическое очертание и опираются на торцевые диафрагмы жесткости, которые могут быть выполнены в виде стен, ферм, арок или рам. В зависимости от длины оболочек их делят на короткие, у которых пролет по про-

дольной оси не более чем полторы длины волны (пролет в поперечном направлении), и на длинные, у которых пролет по продольной оси более, чем полторы волны (рис. на листе 2.6) [16].

По продольным краям длинных цилиндрических оболочек предусматриваются бортовые

элементы (ребра жесткости), в которых размещается продольная арматура, позволяющая работать оболочке вдоль продольного пролета подобно балке. Кроме того, бортовые элементы воспринимают распор от работы оболочек в поперечном направлении и поэтому должны обладать достаточной жесткостью и в горизонтальном направлении.

Длина волны длинной цилиндрической оболочки обычно не превышает 12 м. Отношение стрелы подъема к длине волны принимается не менее $1/7$ пролета, а отношение стрелы подъема к длине пролета – не менее $1/10$.

Сборные длинные цилиндрические оболочки собираются из цилиндрических секций, бортовых элементов и диафрагм жесткости, арматура которых в процессе монтажа сваривается между собой и омоноличивается.

Длинные цилиндрические оболочки целесообразно применять для покрытий больших помещений с прямоугольным очертанием в плане. Обычно их располагают параллельно короткой стороне перекрываемого прямоугольного пространства для сокращения величины пролета вдоль продольной оси.

Оболочки положительной кривизны

Поверхность оболочек положительной гауссовой кривизны может быть образована либо вращением в общем случае произвольной плоской кривой (образующей) вокруг вертикальной или горизонтальной оси, либо поступательным перемещением образующей (прямой или кривой) по направляющей, которая может иметь форму прямой или кривой. В первом случае мы имеем оболочки вращения, во втором – оболочки переноса. С помощью способа переноса с использованием кривых любой формы можно получить поверхности двоякой кривизны.

Покрытия в виде оболочек, как правило, состоят из криволинейной плиты и контурных элементов в виде ферм, арок с затяжками или диафрагм. Плита оболочки может быть гладкой и ребристой (подкрепленной), а по способу изготовления – сборной или монолитной. Плита оболочки работает в основном на сжатие и только в углах возникают растягивающие усилия.

Основные геометрические параметры покрытий в виде оболочек – форма в плане, пролет (ширина) и стрела подъема. Стрела подъема назначается в пределах $1/10 \dots 1/5 L$. Толщина плиты назначается по расчету (обычно в пределах $1/600 \dots 1/500 L$), но не менее 40 мм по конструктивным требованиям. В приконтурных зонах толщина плиты увеличивается для размещения дополнительной арматуры и восприятия возникающих в этих зонах усилий.

Пологие оболочки переноса на квадратном или близком к нему прямоугольном плане с отношением сторон $1 \dots 1.5$ и стрелой подъема f меньшей или равной $1/5$ минимального пролета (или $1/10$ меньшей стороны) называются парусными. К достоинствам этих оболочек можно отнести небольшую строительную высоту, возможность

применения унифицированных элементов, экономичность. Пролеты парусных оболочек достигают 100 и более метров.

Парусная оболочка имеет много общего с куполом – ее можно представить как купол с отсеченной вертикальными или наклонными плоскостями плитой (оболочкой).

Оболочки отрицательной кривизны

К оболочкам отрицательной кривизны относятся гиперболический параболоид (поверхность переноса) и однополостной гиперболоид вращения (подробнее об этом смотри раздел «Краткие сведения...»). Характерной особенностью этих поверхностей является их линейчатость.

Как и другие типы оболочек, гипары состоят из пролетной части – гладкой или ребристой плиты и контурных элементов, которые проектируются в виде ферм, балок или рам. При этом контурные элементы могут быть как плоскими и прямолинейными, так и пространственными и криволинейными.

Гипары отличаются большим разнообразием архитектурных и конструктивных форм, высокой несущей способностью, хорошими технико-экономическими показателями. Материалом для оболочек в виде гипаров служат железобетон, армоцемент, металл, древесина, пластмассы. Весьма эффективно использование в покрытиях такого типа комбинации различных материалов.

Применяются оболочки – гипары в покрытиях общественных и производственных зданий с различной формой плана пролетами от 18 до 80 и более метров, в малых архитектурных формах. При этом покрытия могут быть как отдельно стоящими, так и составными, в виде сочетаний отдельных гипаров, которые образуют многопролетные покрытия.

Опираются такие покрытия как по контуру (на стены, балки и т.п.), так и на отдельные опоры по углам (контрфорсы или фундаментные конструкции). Железобетонные гипары могут возводиться в монолитном, сборном или сборно-монолитном варианте.

О покрытиях с применением в качестве материала пролетной конструкции тонкого металлического листа или ткани рассказывается в соответствующих разделах пособия.

Составные (сопряженные) оболочки образуются совокупностью взаимно пересекающихся фрагментов (тоже оболочек), имеющих либо одинаковую для всех, либо отличную для каждого фрагмента форму поверхности. По линиям сопряжения фрагментов, образующих составную оболочку, проходят переломы ее поверхности, а фрагменты могут иметь нулевую, положительную, отрицательную кривизну, а также многогранную (складчатую) форму [19, 23, 45].

Составляющие оболочки имеют, чаще всего, треугольный, трапециевидный или квадратный план, либо план, получаемый сопряжением этих фигур. Некоторые формы составных оболочек имеют полигональный план, достаточно близко вписанный в замкнутую кривую (круг, эллипс и т.д.).

ов, эконо-
достигают

общего с
пол с от-
ими плос-

ы
зны отно-
зержность
ид враще-
«Краткие
тью этих
.

ры состо-
ебристой
е проек-
При этом
плоскими
зными и

нообрази-
форм, вы-
и техни-
материалом
железобе-
астмассы.
окрытиях
ериалов.
в покры-
их зданий
от 18 до
ных фор-
отдельно
очетаний
инопро-

то конту-
дельные
аментные
ы могут
и сборно-

естве ма-
металли-
я в соот-

ики обра-
экающих-
дих либо
для каж-
о линиям
оставную
хности, а
тельную,
огранную

аще все-
адратный
иим этих
рчек име-
о вписан-
д.).

Очень часто составные оболочки являются элементами более сложных, комбинированных несущих систем, в которых они работают совместно с висячими конструкциями, складками, мембранами и т.д. Такие системы подробно проанализированы в главе 7.

Покрытиями в виде составных оболочек перекрывают здания пролетами от 24 до 150 и более метров с различной формой плана (квадратной, прямоугольной, многоугольной, криволинейной). Одной из наиболее распространенных конструктивных форм составных покрытий являются оболочки в виде сочлененных гипаров, перекрывающие пролеты до 70 м (лист 2.7), а также разнообразные зонтичные оболочки (лист 2.8).

Очень интересные конструктивные формы создают составные оболочки положительной кривизны на полигональном плане и купольно-складчатые оболочки (лист 2.9). Верхняя часть таких оболочек образована оболочкой положительной кривизны или кольцом, а нижняя – складчатыми элементами (оболочками), опирающимися по периметру на фундаменты и контрфорсы. Пролеты таких покрытий достигают 150 м.

Отдельный вид представляют собой составные покрытия висячего типа. В таких покрытиях

в работу составной оболочки включаются ребра жесткости и висячие элементы типа затяжек, жестких нитей, вантовых ферм и др. Подробнее о составных покрытиях висячего типа можно прочитать в [45].

В качестве материалов составных оболочек обычно используют железобетон или комбинацию различных материалов, например, железобетонную плиту и стальные контурные элементы – фермы, арки. Работа покрытий в виде составных оболочек определяется формой поверхности, конструктивными особенностями, характером опирания по контуру.

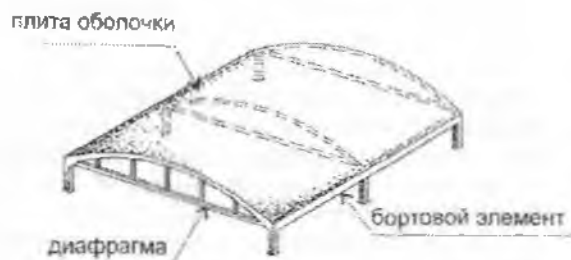
Развитие конструктивных форм жестких оболочек тесно связано с потребностями современной архитектуры. Именно архитекторы придумывают новые формы поверхностей покрытий в виде жестких оболочек, увязывая эти формы с функциональным назначением, параметрами планировочного решения и градостроительными требованиями конкретного участка строительства.

На листе 2.10 показана примерная взаимосвязь разнообразных форм оболочек (в основном положительной кривизны) с формой плана перекрываемого помещения [38].

ПОКРЫТИЯ В ВИДЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ

а. Оболочки нулевой гауссовой кривизны (цилиндрические)

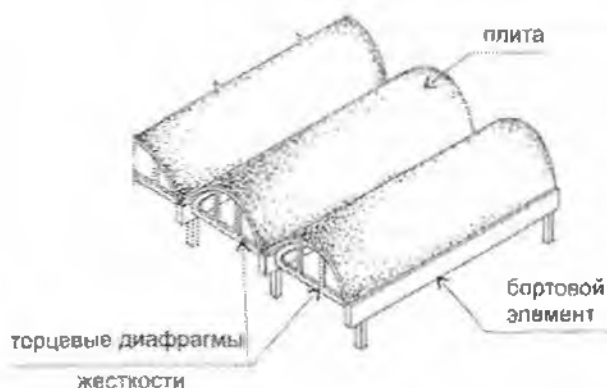
Монолитная оболочка



Сборная оболочка

Формообразование
Поверхность переноса
образующая

Короткие цилиндрические оболочки



Конические оболочки



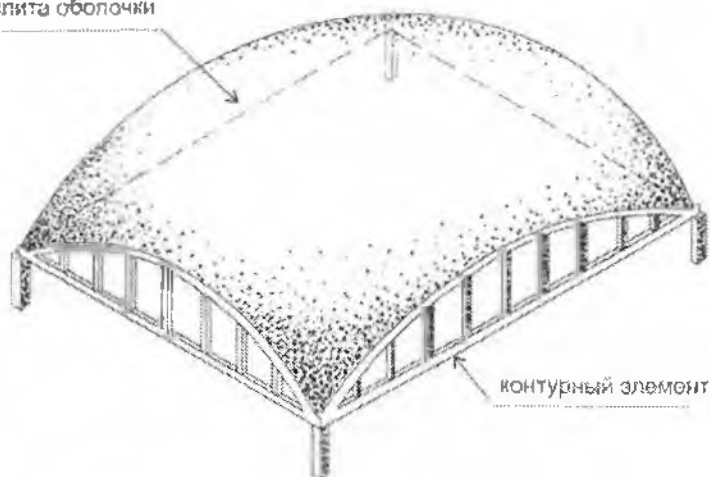
б. Оболочки положительной гауссовой кривизны

Пологая (парусная) оболочка

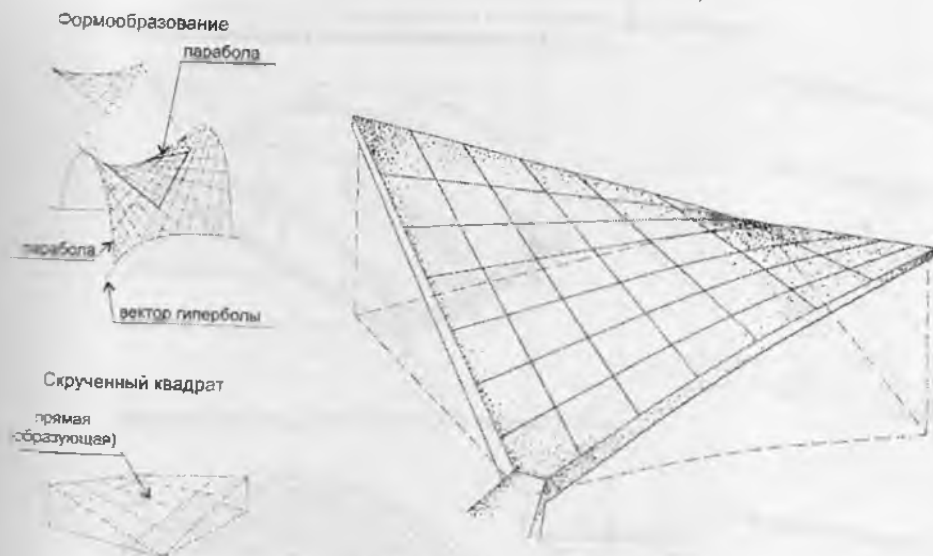
Формообразование

Поверхность
переноса

плита оболочки

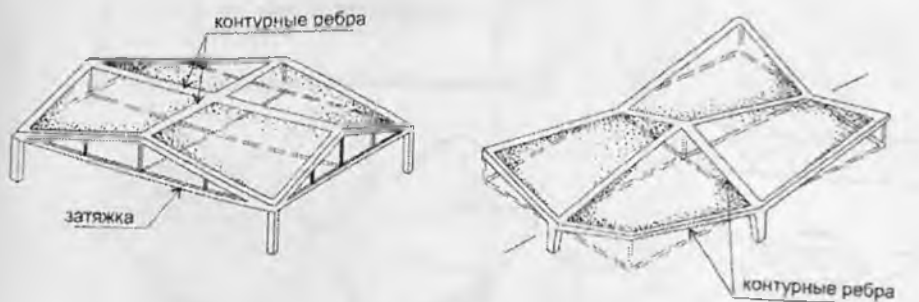


в. Оболочки отрицательной гауссовой кривизны
(гиперболические параболоиды - гипары)



ПРИМЕРЫ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЧЛЕНЕННЫХ ГИПАРОВ

Шатровые



Типа <Зонт>

Щипцовые



Лист 2.7