

## *ЛЕКЦИИ*

*по курсу «Металлические конструкции»  
для студентов, обучающихся по  
специальности 270102 –  
«Промышленное и гражданское  
строительство»*

*Часть II*

*Краснодар 2017*

**“КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”**





## *ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЙ ЗДАНИЙ*

*Балочные, рамные и арочные большепролетные конструкции состоят из отдельных плоских, жестких дисков (несущих элементов), соединенных между собой легкими связями, способными перераспределять нагрузку между несущими элементами.*

*Приложенная к этим конструкциям нагрузка передается в одном направлении вдоль несущего элемента.*

*В пространственных системах связи усиливаются и привлекаются к распределению усилий и передаче их на опоры. В результате этого основные несущие элементы облегчаются, структура всей конструкции меняется. Приложенная к пространственной конструкции нагрузка передается в двух направлениях. Пространственная конструкция получается легче плоскостной.*





*Пространственные конструкции могут быть плоскими (плиты) и криволинейными (оболочки).*

*Плоские пространственные системы (исключая висячие) для обеспечения жесткости должны быть двухслойные.*

*Оболочки могут быть и однослойными и двухслойными.*

*Наибольшее распространение получили решетчатые пространственные конструкции, образующие по поверхности сетчатую систему.*

*Однослойные конструкции имеют криволинейную сетчатую поверхность и называются односетчатыми.*

*Двухслойные конструкции имеют две параллельные сетчатые поверхности, соединенные между собой жесткими решетчатыми связями; они называются двухсетчатыми.*

*В пространственных сетчатых конструкциях принцип концентрации материала заменен принципом многосвязности системы. Осуществление таких конструкций более трудоемко, требует специальных приемов изготовления и монтажа, что является одной из причин ограниченного применения пространственных конструкций.*





### 3.1 Структурные конструкции.

В современном строительстве получили распространение сетчатые системы регулярного строения, называемые структурными конструкциями или просто структурами (модули).

Структурные конструкции чаще применяются в виде плоских покрытий большепролетных общественных и производственных зданий; реже они применяются в криволинейных покрытиях (сводах, куполах и т.п.).

Плоские структуры представляют собой конструкции, образованные из различных систем перекрестных ферм (рис.9)

Количество пересекающихся в одном узле ферм, а также их вертикальное или наклонное положение дают разнообразное структурные построения. В каждой структуре можно выделить свой многократно повторяющийся объемный элемент, называемый кристаллом (рис.10).

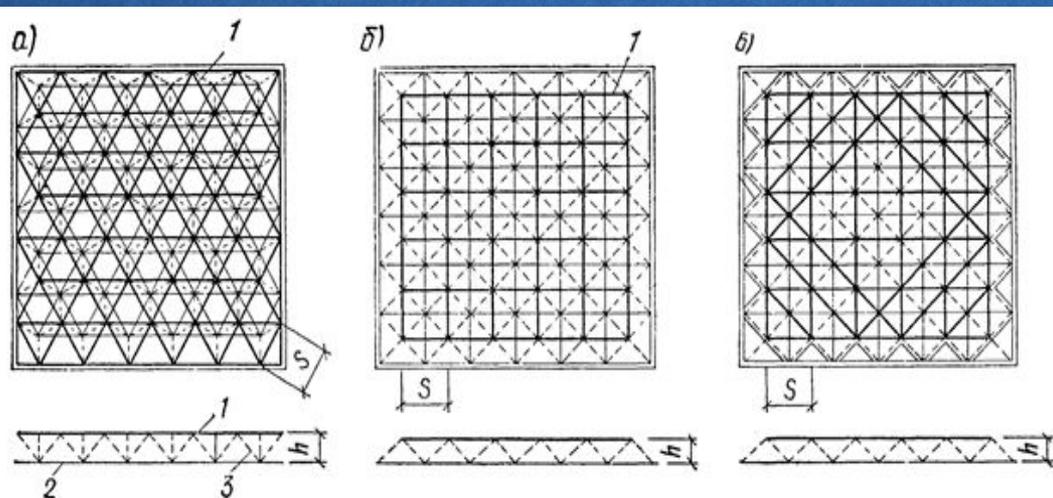


Рис.9.

1 - Верхние пояса; 2 - нижние пояса; 3 - наклонные раскосы; S - модуль

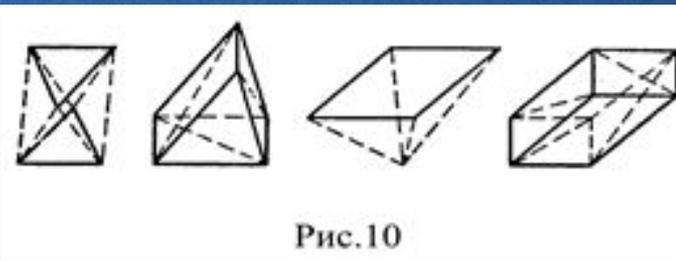


Рис.10



*К недостаткам структурных систем относится повышенная трудоемкость их изготовления и сборки. Этот недостаток частично компенсируется однородностью операции при изготовлении и сборке, что создает условия для поточного производства стандартных конструктивных элементов.*

*Системы могут быть как однопролетные, так и неразрезные многопролетные, с опиранием на стены, фермы или на отдельно стоящие колонны с развитыми капителями, в виде безбалочных перекрытий или подвешенные к вантовой системе.*

*Структуры, образованные из перекрестных ферм, идущих в трех направлениях (рис.9а), имеют статически неизменяемые кристаллы, могут работать на кручение и поэтому являются наиболее жесткими. Структуры, образованные из ферм, идущих в двух направлениях (рис.9б) имеют статически изменяемые кристаллы, они не работают на кручение и поэтому менее жестки. Структуру из ферм, идущих в двух направлениях, можно усилить диагоналями в угловых зонах (рис.9в)*



*Не усложняя систему можно увеличить жесткость конструкции, включив в совместную работу со структурой кровельный настил (металлический и ж/б).*

*Структурные плоские покрытия обладают рядом достоинств, определяющих область их рационального применения.*

*Благодаря большой пространственной жесткости структурными конструкциями можно перекрывать пролеты более 50 м при небольшой строительной высоте  $1/15 \div 1/20$  пролета, что позволяет получить выразительное архитектурное решение.*



*Регулярность строения конструкции позволяет собирать из одних стандартных элементов покрытия разных пролетов и конфигураций в плане.*

*Частая сетка узлов дает возможность осуществлять крепление подвешного транспорта в любой точке и изменять при необходимости направление его движения. Многосвязность системы повышает степень ее надежности при внезапных местных разрушениях.*

*Оптимальный угол наклона раскосов из условия минимального веса структуры равен  $45^\circ$ , практически этот угол принимается в пределах  $35-50^\circ$ . Применение в структурах низколегированных и высокопрочных сталей становится рациональным при пролетах более 40 м, применение стержней трубчатого сечения может дать до 25 % экономии стали по сравнению со стержнями из прокатного профиля. Структурная конструкция представляет собой многократно статически неопределенную систему, точный расчет которой сложен.*

*В общем случае можно применить упрощенный подход, рассматривая конструкцию как ортотропную (одинаковые свойства в одном направлении) пластинку с упругими характеристиками и граничными условиями, соответствующими стержневой конструкции. При такой расчетной схеме учитываются действия как изгибающих так крутящих моментов.*

*В практике проектирования структуры чаще рассчитывают как изотропные плиты или как системы перекрестных ферм (при квадратных ячейках сеток поясов) без учета крутящих моментов.*

*Величины моментов и поперечных сил определяют по таблицам для расчета плит.*

*Получив из расчета плиты величины расчетных значений  $M_{пл}$  и  $Q_{пл}$  переходят к расчетным усилиям стержня по соответствующим формулам. Прогибы также вычисляют по таблицам для изотропных и перекрестных ферм.*

*Этот метод расчета дает запас прочности.*

*Наиболее эффективно структуры работают на сосредоточенные нагрузки.*





## 3.2 ОБОЛОЧКИ

### 3.2.1 Односетчатые оболочки.

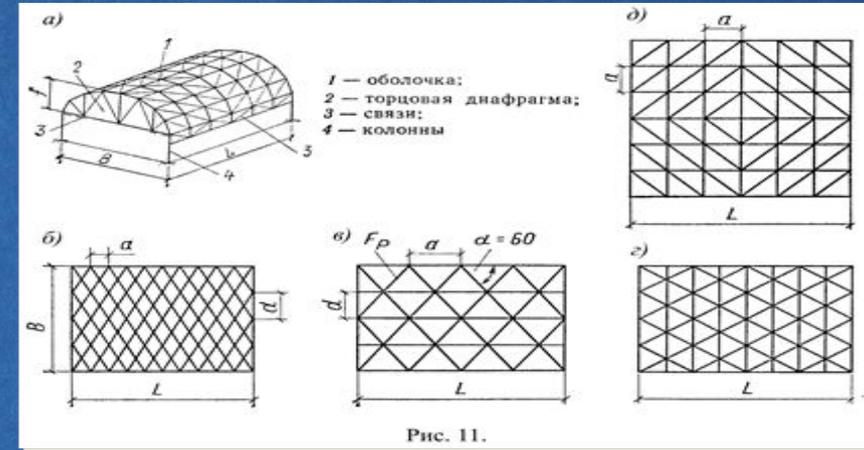


Рис. 11.

Односетчатые оболочки, перекрывающие прямоугольное в плане здание, проектируются в виде цилиндрической поверхности, по которой расположены стержни, образующие сетки различной системы.

Наиболее проста сетка ромбического рисунка (рис. 11б), не имеющая продольных элементов, что не обеспечивает необходимой жесткости конструкции в продольном направлении. Такая конструкция работает как свод в поперечном направлении (с пролетом  $B$ ), передавая нагрузку на продольные стены (вдоль стороны  $L$ ).

Распор свода должен восприниматься стенами или затяжками, соединяющими обвязки свода, укладываемые на стену. Стержни изготавливаются из прокатных или штампованных профилей, труб, а в тяжелых сводах стержни выполняются в виде сквозных прутковых прогонов или фермочек небольшой высоты ( $1/80 \div 1/120$ ) пролета  $B$ .



При расчете свода вырезается полоса шириной в одну ячейку «а», для которой определяют значения изгибающих моментов и нормальных сил. Жесткость конструкции при наличии в сетках продольных элементов увеличивается (рис.11в). Конструкция может работать как оболочка пролетом  $L$ . Опорами оболочки могут служить торцовые стены или четыре колонны с торцовой диафрагмой (рис.11а). Чтобы увеличить жесткость оболочки, крайние свободные грани усиливают вертикальными и горизонтальными бортовыми элементами.

Наиболее жесткими с минимальной металлоемкостью являются сетки с продольными и поперечными стержнями (ребрами), а решетка направлена к ним под углом  $45^\circ$  (рис.11д). Наличие поперечных ребер даже с небольшим моментом инерции уменьшает деформацию поперечного контура, перераспределяя изгибающие моменты и выравнивая эпюру нормальных напряжений по всему поперечному сечению.

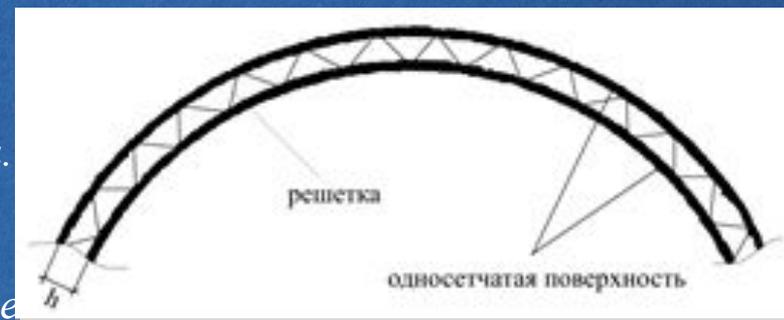
Конструкции оболочек отличаются от сводов тем, что собираются из отдельных плоских ферм, соединяемых на монтаже вдоль продольных элементов (ребер) болтами.

Односетчатыми оболочками можно перекрывать пролеты до 90м.

Оболочки без поперечных ребер рассчитывают как безмоментные.

ребер, обеспечивающих жесткость контура, расчет производится по моментной теории. Если нагрузка расположена в поперечном направлении симметрично, то жесткую оболочку, особенно укрепленную бортовыми элементами, можно рассчитывать как балку, опертую на торцовые диафрагмы.

При расчете сквозных сетчатых оболочек сквозные стержни (ребра) заменяют для упрощения сплошными пластинками. Толщина пластинки должна быть эквивалентной стержневой системе по работе на сдвиг (при действии сдвигающих усилий) или на растяжение и сжатие (при действии осевых усилий). Приведенная толщина эквивалентной сплошной пластинки зависит от типа решетки.

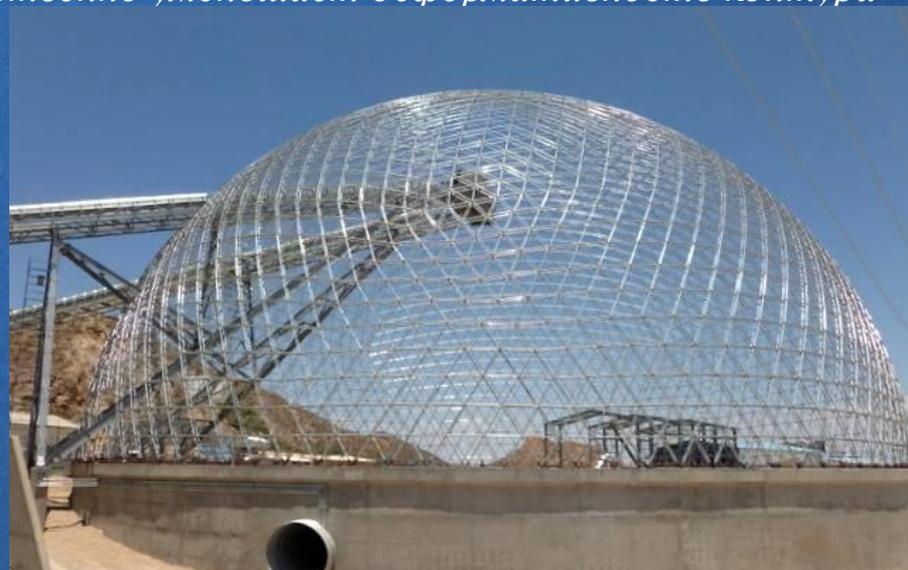
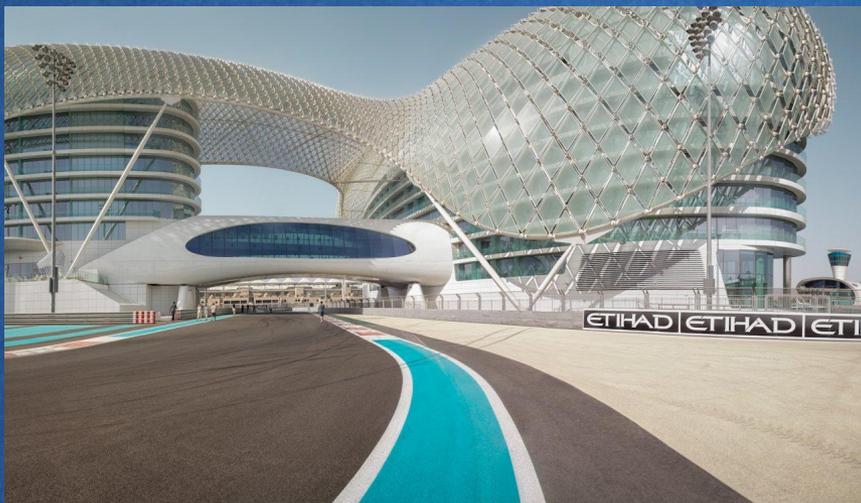




### 3.2.2 Двухсетчатые оболочки

*Конструктивные схемы двухсетчатых оболочек аналогичны схемам двухсетчатых плоских плит-структур. Как и в структурах, двухсетчатые оболочки образуются системами перекрестных ферм, связанных по верхним и нижним поясам дополнительными связями – решеткой. По верхнему поясу решетка (в плоскости сетки) может быть заменена кровельным металлическим настилом, прикрепленным к поясам ферм. В оболочках основная роль в восприятии усилий принадлежит криволинейным сетчатым плоскостям, соединяющая их решетка мало участвует в передаче усилий, но придает конструкции большую жесткость.*

*По сравнению с односетчатыми оболочками двухсетчатые обладают большей жесткостью и несущей способностью, поскольку в них верхняя и нижняя сетчатые системы работают как обычные оболочки, то есть распределяют внутренние усилия в двух направлениях, передают значительную долю нагрузки непосредственно на опоры, разгружая соединяющую решетку. Жесткость продольных ферм (поясов и решетки) существенно увеличивает эффект продольной передачи усилий; жесткость поперечных ферм существенно уменьшает деформативность контура поперечного сечения оболочки.*





*Двухсетчатыми оболочками перекрывают пролеты до 700м. Они чаще проектируются в виде цилиндрической поверхности, опирающейся на продольные стены (свод) или на металлические колонны. Наивыгоднейшее распределение усилий в оболочке получается при равенстве пролета и длины оболочки  $B = L$  (рис.11а). По торцам оболочки опираются на жесткие диафрагмы – стены, фермы, арки с затяжками и т.п.*

*Двухсетчатые оболочки по характеру своей работы аналогичны трехслойной оболочке, у которой заполнителем служит решетка.*

*При расчете оболочки стержневую сетчатую поверхность приводят к эквивалентной сплошной оболочке, устанавливая модуль сдвига среднего слоя, эквивалентного по жесткости соединительной решетке.*





При расчете тонких оболочек ( $\frac{h}{r} \leq \frac{1}{30}$ ) деформации сдвига среднего слоя пренебрегают; оболочку рассчитывают как однослойную, сплошную с приведенной толщиной и модулем упругости.

Более толстые оболочки ( $\frac{h}{r} > \frac{1}{30}$ ) также могут рассматриваться как сплошные, только их цилиндрическая жесткость определяется с учетом деформации решетки.

Переход от расчетных погонных усилий в эквивалентной сплошной оболочке к усилиям в отдельных стержнях двухсетчатой оболочки осуществляется по соответствующим формулам.





### 3.3.1 Ребристые купола.

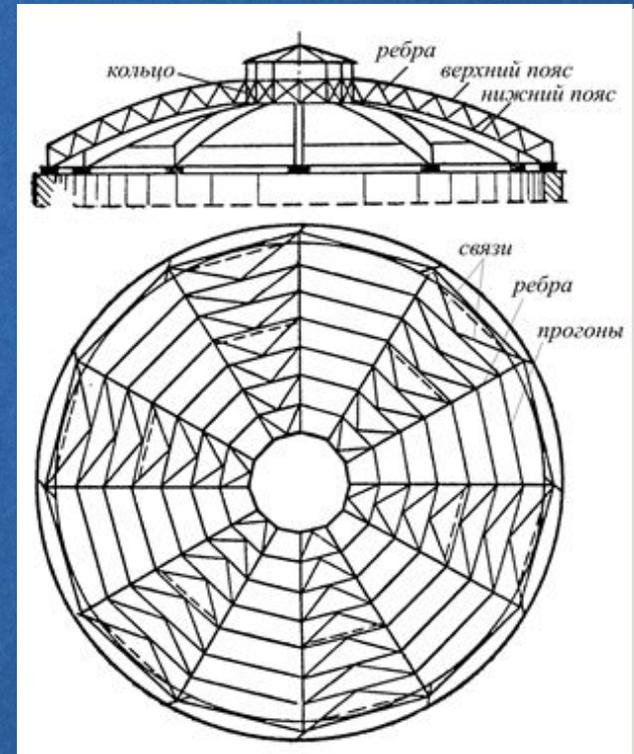
Конструкции ребристых куполов состоят из плоских или пространственных ребер, расположенных в радиальном направлении и связанных между собой прогонами. Верхние пояса ребер образуют поверхность купола, обычно сферическую. Ребра купола могут быть сквозными (в виде легких ферм) или сплошного сечения. Сплошные ребра тяжелее сквозных, но более просты в изготовлении.

В вершине купола располагается кольцо, к которому примыкают ребра купола. Кольцо проектируется жестким; оно работает на изгиб с кручением, поскольку пара ребер, расположенных в одной диаметральной плоскости и прерванных кольцом, рассматривается как единая арочная конструкция.

При шарнирном креплении ребер к кольцу и небольшом его диаметре можно считать, что ребра работают как трехшарнирные арки. Иногда при частом расположении ребер или по архитектурным соображениям кольцо получается больших размеров. Тогда с целью повышения устойчивости и жесткости кольцо раскрепляют внутренними распорками.

Ребристые купола являются распорной системой. Распор может быть воспринят конструкцией стен или специальным опорным кольцом. Опорное кольцо служит затяжкой ребер и рассчитывается на тангенциальные составляющие их реакции. Опорное кольцо может быть изогнуто по окружности, а также в виде многоугольника с жесткими или шарнирными соединениями в углах.

Ребристые купола являются распорной системой. Распор может быть воспринят конструкцией стен или специальным опорным кольцом.





*Опорное кольцо служит затяжкой ребер и рассчитывается на тангенциальные составляющие их реакции. Опорное кольцо может быть изогнуто по окружности, а также в виде многоугольника с жесткими или шарнирными соединениями в углах. Ребристые купола являются распорной системой. Распор может быть воспринят конструкцией стен или специальным опорным кольцом.*

*Опорное кольцо служит затяжкой ребер и рассчитывается на тангенциальные составляющие их реакции. Опорное кольцо может быть изогнуто по окружности, а также в виде многоугольника с жесткими или шарнирными соединениями в углах. На основании кольцо укладывается свободно и должно быть закреплено только от горизонтального смещения при действии ветровой нагрузки. Между ребрами укладываются кольцевые прогоны, на которые опирается кровельный настил. Кольцевые прогоны обеспечивают общую устойчивость ребер купола из их плоскости, уменьшая расчетную длину ребер. Для обеспечения общей жесткости купола в плоскости кровли между ребрами устанавливают связи.*



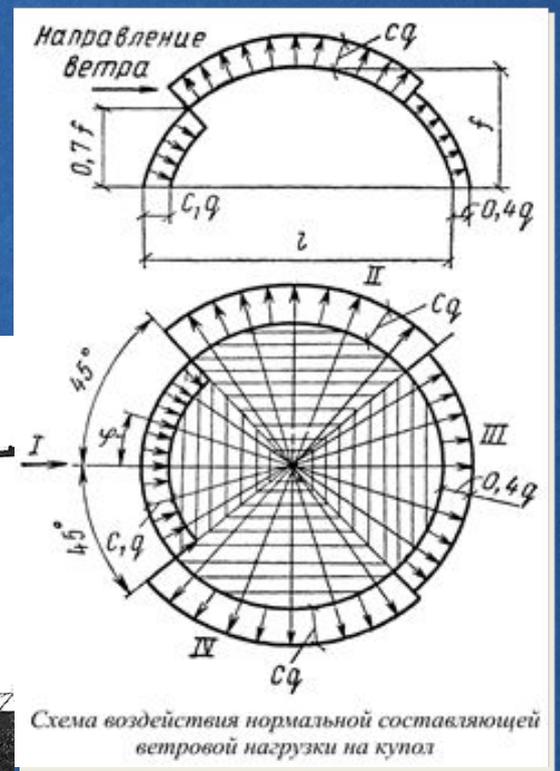
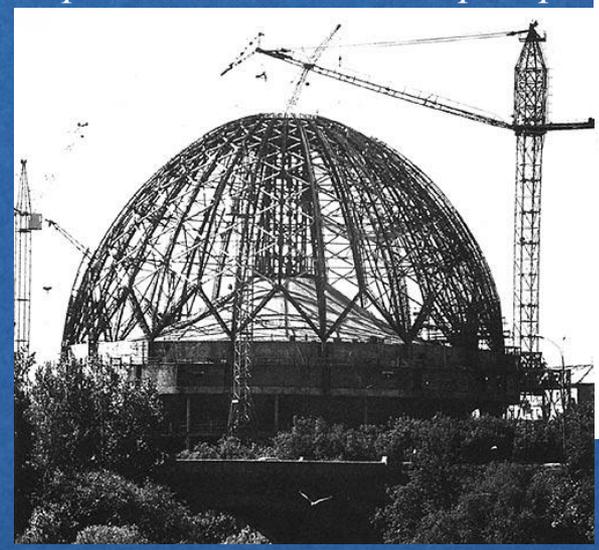


При расчете на вертикальную, симметричную относительно вертикальной оси купола нагрузку, купол разделяется на отдельные плоские арки, каждая из которых воспринимает нагрузку с приходящейся на нее грузовой площади. распор купола воспринимается опорным кольцом, то оно может быть заменено поперечной затяжкой, находящейся в плоскости каждой пары ребер. Площадь сечения условной затяжки принимается такой, чтобы ее упругие деформации были равны упругим деформациям кольца в диаметральной направлении от горизонтальных реакций всех ребер.

При расчете купола на горизонтальную ветровую или несимметричную вертикальную нагрузку купол также разделяется на арки.

Купол разбивается на 4 квадранта: в первом и третьем квадрантах равнодействующая ветрового давления действует в одном направлении и вызывает горизонтальное смещение. Во втором и четвертом квадрантах ветер действует в противоположных направлениях и горизонтальных смещений купола не вызывает.

Наибольшее смещение получает расчетная арка, составленная из ребер, расположенных в плоскости равнодействующей ветрового давления в 1 и 3 квадрантах. Все арки, расположенные в 1 и 3 квадрантах, рассматривают как одну эквивалентную арку, считая ее для упрощения расчетов трехшарнирной.



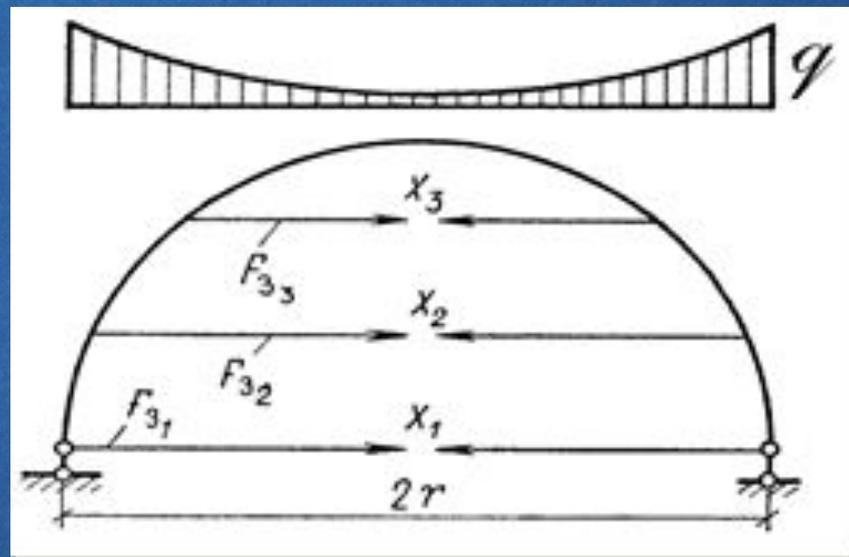


### 3.3.2 Ребристо-кольцевые купола.

В ребристо-кольцевых куполах кольцевые прогоны связываются с ребрами в одну жесткую пространственную систему. В этом случае кольцевые прогоны работают не только на изгиб, но воспринимают растягивающие кольцевые усилия, а при жестких сопряжениях с ребрами – и изгибающие моменты от жесткости узлов.

Сечения купола, находящиеся в плоскостях кольцевых прогонов, не имеют свободных горизонтальных перемещений, поскольку они связаны между собой жесткими кольцами. При ребристо-кольцевой конструкции купола вес ребер уменьшается за счет работы кольцевых прогонов. Наиболее простое конструктивное решение получается при ребрах и кольцевых прогонах из прокатных профилей. В этом случае сопряжение ребер с прогонами можно конструировать по типу жестких сопряжений в балочных системах.

Кольцевые прогоны в ребристо-кольцевом куполе работают так же, как опорное кольцо в ребристом куполе, и могут быть заменены условными затяжками. При симметричной относительно оси купола нагрузке расчет купола можно вести, разделяя его на плоские арки с затяжками на уровне кольцевых прогонов.

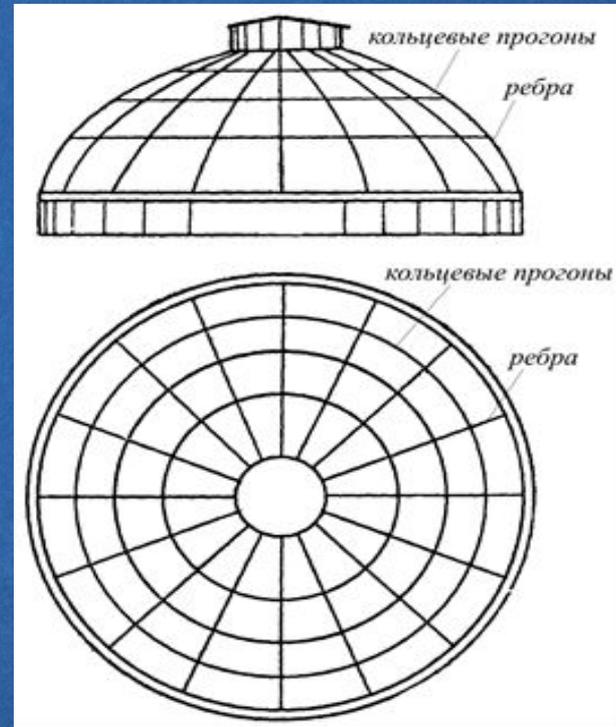
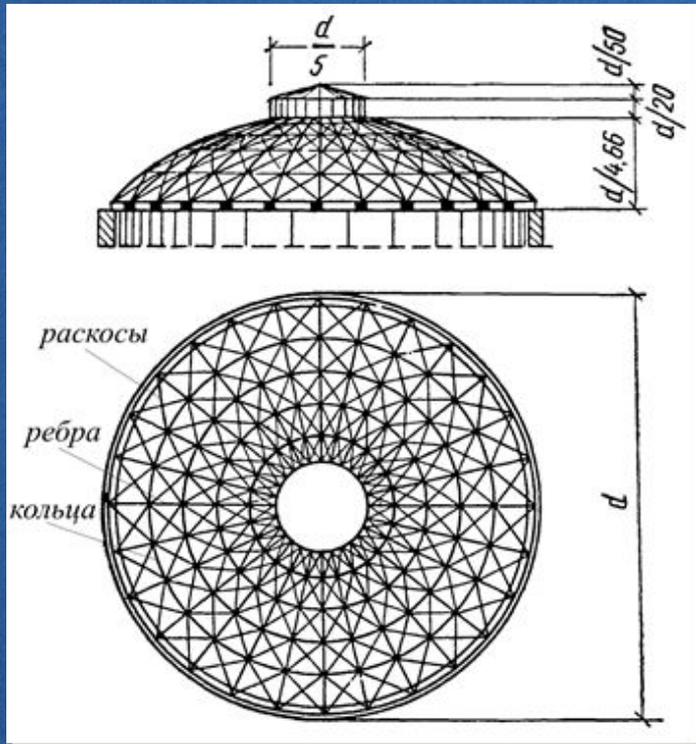




### 3.3.3 Сетчатые купола

Если от ребристого и ребристо-кольцевого купола идти дальше по линии увеличения связности системы, то можно получить сетчатые купола.

В сетчатых куполах между ребрами и кольцами располагаются раскосы, благодаря которым усилия распределяются по поверхности купола и стержни работают только на осевые силы, что уменьшает вес ребер и колец.





Обычная система сетчатого купола состоит из радиальных ребер, кольцевых прогонов и диагональных связей, поставленных в каждом четырехугольнике, ограниченном двумя ребрами и двумя прогонами, то есть представляет собой многогранник, образованный из ребер и кольцевых прогонов. Многогранники сетчатых куполов могут быть разнообразными. Распространены звездчатые купола, все грани которых являются треугольниками, а также геодезические системы куполов, несущие элементы которых являются ребрами многоугольника, вписанного в сферу. В геодезических куполах достигается наибольшая однотипность стержней и узлов, что дает большие производственные преимущества.

Купол может быть однослойным и двухслойным. В двухслойных геодезических куполах, аналогично структурам, узлы сопряжения стержней размещаются на поверхности двух концентрически расположенных сфер, разность радиусов которых определяет конструктивную высоту поверхности купола. Двухслойная конструкция купола обладает большой жесткостью и несущей способностью и может перекрывать пролеты в несколько сотен метров.

Стержни сетчатых куполов чаще изготавливают из труб. В несущую систему куполов может быть включена ограждающая конструкция из штампованных алюминиевых или стальных листов.

Сетчатые купола рассчитывают по безмоментной теории, как сплошные осесимметричные оболочки.





### *3.4 Висячие покрытия*

*Висячими называются покрытия, в которых главная несущая пролетная конструкция работает на растяжение. Она может быть образована из стальных стержней, канатов, прокатных профилей. Возникающие в ее элементах растягивающие усилия условно называют тяжением нитей, а их горизонтальную составляющую – распором.*

*Висячие покрытия в последнее время нашли широкое применение в спортивных и выставочных сооружениях, гаражах, крытых рынках, городских залах общего назначения, некоторых производственных зданиях и других сооружениях. Этому способствует ряд преимуществ висячих покрытий перед традиционными конструктивными формами покрытий, к которым следует отнести:*

*1) Работу несущих конструкций на растяжение, что позволяет более полно использовать материал, поскольку несущая способность таких конструкций определяется прочностью, а не устойчивостью. Это особенно важно при применении высокопрочных материалов, для которых висячие покрытия являются наиболее перспективными областями применения.*

*С увеличением пролета преимущество висячей конструктивной формы покрытия повышаются, что подтверждается практикой мостостроения; уже существуют мосты пролетом 1000 м и более.*

*2) Большое разнообразие архитектурных форм висячих покрытий позволяет применять их для зданий самого различного назначения – от покрытий небольших коровников и теплиц до покрытия крупных общественных зданий.*

*3) Транспортабельность элементов висячих покрытий (канатов в бухтах, металлических оболочек в рулонах) и почти полное отсутствие вспомогательных подмостей при монтаже делают их достаточно индустриальными.*

*4) малый собственный вес несущей конструкции и ее повышенная деформативность делают ее сейсмостойкой, поскольку резко уменьшается сейсмический импульс на конструкцию.*



*Висячие конструкции имеют и недостатки, от удачного преодоления часто зависит эффективность применения системы в целом.*

*1) Висячие системы – системы распорные; для восприятия распора необходима специальная опорная конструкция, стоимость которой составляет значительную часть стоимости всего покрытия. Желание уменьшить стоимость опорной конструкции повышением эффективности ее работы приводит к преимущественному использованию покрытий круглой, овальной и других прямоугольных форм плана, которые плохо согласуются с современной планировкой производственных зданий; в этом одна из причин недостаточного широкого применения висячих покрытий для производственных зданий.*

*2) Повышенная деформативность. Она обуславливается, во-первых, повышенными упругими деформациями применяемых высокопрочных материалов и особенно канатов, в которых нормальные напряжения больше, а модуль упругости меньше, чем в обычной конструкционной стали. Таким образом, относительное удлинение элементов конструкции оказывается значительно большим, чем в традиционных конструкциях. Во-вторых, геометрической изменяемостью большинства систем висячих покрытий, в которых при нагружении их нагрузкой, отличающейся по своему характеру распределения от ранее действовавшей, появляются кинематические перемещения, вызванные изменением формы равновесия системы (для нити – изменение формы веревочной кривой) и сопровождающиеся изменением ее напряженного состояния; в-третьих, горизонтальной деформацией опор, их податливостью в распорных висячих системах. Повышенная деформативность висячих покрытий затрудняет герметизацию кровли, применение висячих покрытий в зданиях с крановым оборудованием, приводит в некоторых случаях к аэродинамической неустойчивости покрытий и усложняет их расчет.*

*Для уменьшения деформативности покрытия применяют специальные мероприятия, стабилизирующие его.*

*3) Трудность водоотвода с покрытия.*



*Конструктивная форма висячих покрытий весьма разнообразна. По характерным особенностям работы несущей конструкции большинство из них можно разделить на несколько групп:*

- 1. одноярусные висячие покрытия и металлические оболочки – мембраны;*
- 2. покрытия двухъярусными системами;*
- 3. покрытия растянутыми изгибно-жесткими элементами;*
- 4. покрытия тросовыми фермами;*
- 5. покрытия седловидными сетками;*
- 6. комбинированные висячие системы.*

*Каждая из этих групп имеет свои положительные и отрицательные особенности. Действующие на висячие покрытия нагрузки подразделяются на постоянные и временные – длительно действующие и кратковременные. К постоянным нагрузкам относятся вес несущих и ограждающих конструкций покрытия. К временным длительно действующим нагрузкам относят вес подвесного потолка, вентиляционного и осветительного оборудования, которое часто подвешивается к несущей конструкции покрытия.*

*Главными кратковременными нагрузками являются ветровая и снеговая.*

*Расчетное значение ветровой нагрузки принимается в виде произведение коэффициента надежности по нагрузке, скоростного напора  $q_0$ , коэффициента  $K$ , учитывающего изменения скоростного напора по высоте и аэродинамического коэффициента  $C$ .*



*В действующем СНиП нет указаний по определению аэродинамических коэффициентов для большинства форм висячих покрытий. В процессе реального проектирования их обычно определяют экспериментально продувкой модели в аэродинамической трубе. Значение этих коэффициентов зависит от многих параметров здания, что затрудняет их обобщенную рекомендацию. Данные продувок показывают, что ветер на подавляющей части поверхности*

*большинства покрытий оказывает отрицательное давление – отсос.*

*В легких покрытиях, особенно при недостаточном закреплении его краев, неравномерное давление ветра вызывает большие деформации покрытия и даже явление аэродинамической неустойчивости покрытия, то есть его вибрацию или полное вывертывание покрытия..*

*В этих случаях необходима специальная стабилизирующая конструкция, предохраняющая покрытие от этого явления.*

*Для покрытий, собственный вес которых (вместе с подвесными потолками и технологическим оборудованием) составляет 1,5÷2 кН/м<sup>2</sup> и края которых по всему периметру закреплены, явление аэродинамической неустойчивости не угрожает, и они не нуждаются в какой-либо дополнительной стабилизации, а проверка покрытия на действие ветра становится необязательной.*

*Снеговая нагрузка на покрытие обычно просматривается в нескольких вариантах: в виде равномерно распределенной по покрытию и несколько вариантов неравномерного распределения, учитывающего возможный передув снега ветром, частичную очистку покрытия от снега и др.*

$$\frac{\Delta f}{f}$$

$$\frac{f}{l} \approx \frac{1}{15} = \frac{1}{20}$$



*Расчет несущих конструкций висячих покрытий проводится для определения прочности сооружения и для определения его деформативности. Нерастяжимая нить может иметь только кинематические перемещения и изменяет форму очертания в зависимости от вида и расположения нагрузки. Упругие деформации (удлинение и провис), могут быть только в упругой нити.*

*При упругой деформации увеличивается стрелка провиса нити, а вместе с тем уменьшается усилие в ней, непосредственно зависящее от величины стрелки. Таким образом, при увеличении нагрузки (и стрелки) усилие нити возрастает нелинейно. Следовательно расчет нити не отвечает правилам линейной строительной механики. Расчет нити без учета упругих деформаций дает завышенные значения усилий в нити, что идет в запас прочности. Влияние упругих деформаций на усилие нити зависит от отношения  $\frac{\Delta f}{f}$ ,  $f$ - стрелка провиса нити,  $\Delta f$ - ее приращение от действия нагрузки. Оно существенно только при малых стрелках и при*

$$\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{1}{15} \div \frac{1}{20} \quad 10\%.$$

*Влияние упругих деформаций на точность определения перемещений нити (прогибов) большое и должно учитываться уже при отношении  $\frac{f}{l} < \frac{1}{8}$ .*

*Пологая гибкая нить является основой большинства висячих систем.*

*Нелинейность работы висячих систем, особенно при неравновесных нагрузках (вызывающих кинематические перемещения) часто вынуждает делать расчет три раза: первоначально приближенно вручную для*

*ориентировочного выбора сечений, затем уточнено с учетом нелинейности работы и взаимного влияния отдельных частей системы, обычно на ЭВМ, с последующей корректировкой первоначально заданных сечений и, наконец, последний, контрольный расчет на ЭВМ для окончательной проверки несущей способности всех элементов и деформативности системы.*

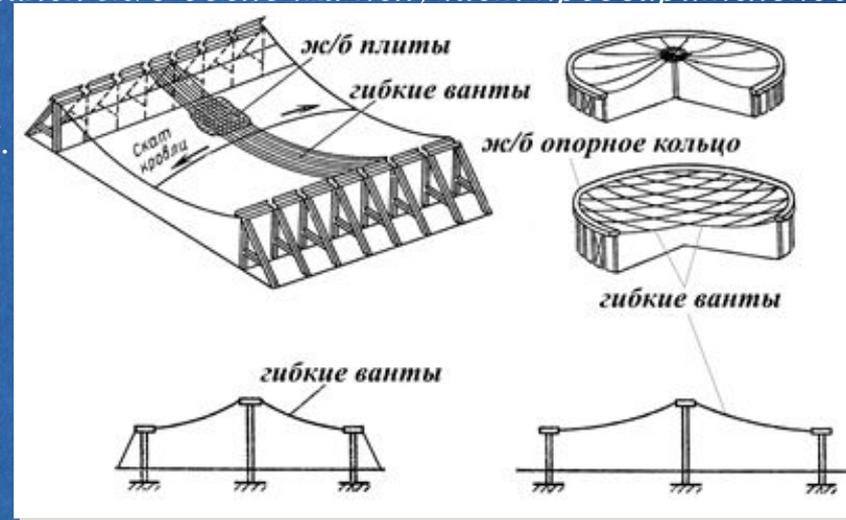




### 3.4.1 Одноярусные висячие покрытия и металлические оболочки – мембраны.

Одноярусные висячие покрытия представляют собой системы из гибких вант (канаты, круглая сталь), на которые во время монтажа укладывают сборные ж/б плиты. Чтобы уменьшить деформативность покрытия и предупредить разрывы в гидроизоляционном ковре, швы между плитами замоноличены после временной пригрузки покрытия нагрузкой, равной весу кровли и снега. После твердения бетона замоноличивания пригруз снимают и образовавшаяся ж/б оболочка получает предварительное напряжение сжатия.

Здания в плане могут быть прямоугольной, круглой и эллиптической формы с радиальной или перекрестной системой нитей. Висячие покрытия можно устраивать не только из высокопрочных канатов или арматуры, но также



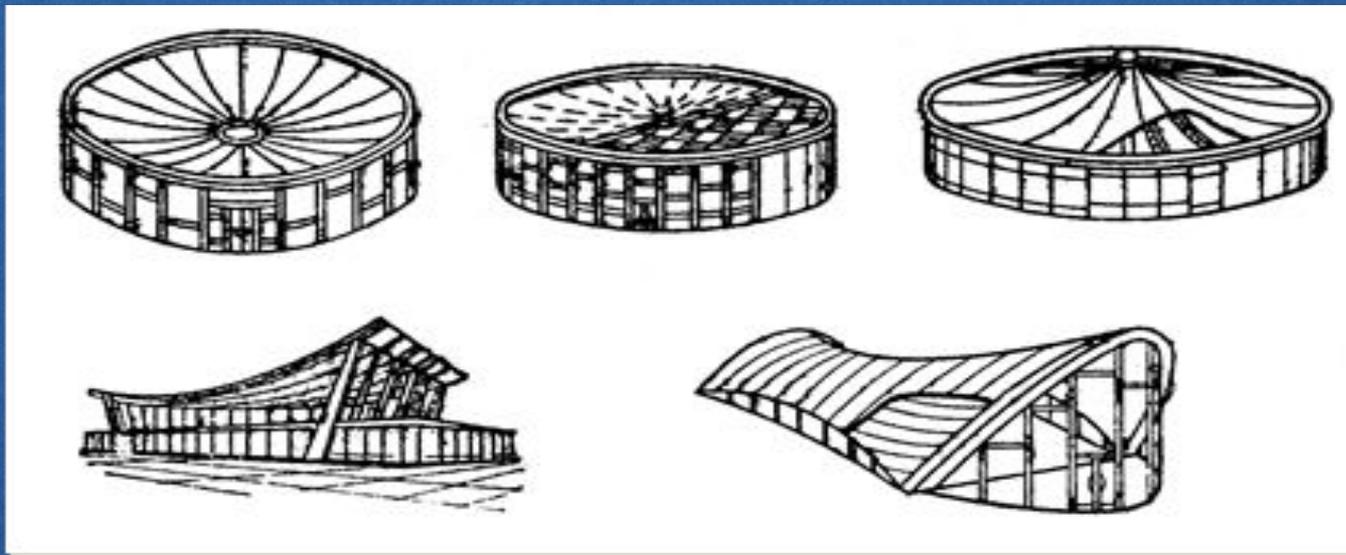
из обыкновенных тонких металлических листов. Такие покрытия будут уже тонколистовыми оболочками или мембранами с характерной для них работой в двух направлениях.





Висячие покрытия можно устраивать не только из высокопрочных канатов или арматуры. Сплошные системы в отличие от систем из нитей могут воспринимать сдвигающие усилия. Благодаря малой толщине листов (2÷6мм) таких оболочек они являются оболочками безмоментными и работают главным образом на растяжение. Однако имеются и отрицательные факторы, тормозящие их применение – это малая огнестойкость и большая поверхность тонкого металла, подверженного коррозии, и возможность вывертывания оболочки при отсосе вследствие недостаточного ее собственного веса. Эти недостатки могут быть в значительной мере нейтрализованы устройством по оболочке бетонного защитного слоя с утеплителем и гидроизоляционным ковром. Кроме того мембраны отрицательной гауссовой кривизны не могут потерять общую устойчивость, поскольку независимо от вида нагрузки и ее распределения всегда есть направления, в которых мембрана работает на растяжение

$$\Gamma = \frac{1}{\rho_x} \times \frac{1}{\rho_y} \quad \left( \Gamma = \frac{1}{r_x} \times \frac{1}{r_y} \right); \quad \rho_x \text{ и } \rho_y - \text{главные радиусы кривизны поверхности.}$$





### 3.4.2 Покрытия растянутыми изгибно-жесткими элементами (жесткими вантами).

*Растянутыми изгибно-жесткими элементами (жесткими вантами) называются прямолинейные или провисающие элементы, закрепленные по краям от перемещений и способные воспринимать растягивающие усилия и изгибающие моменты.*

*Они подобны опрокинутым аркам, но работают на растяжение с изгибом. Изгибно-жесткие элементы выполняются в виде изогнутых ферм или двутавров – сварных или прокатных из малоуглеродистой или низколегированной стали.*

*Покрытие обычно состоит из системы параллельно или радиально расположенных элементов (при круглом плане покрытия), на которые укладывается легкий щитовой настил, не включаемый в работу основной несущей конструкции.*

*Преимущества подобных покрытий:*

- 1. простота конструктивной формы и индустриальность изготовления основных несущих элементов;*
- 2. применение обычных конструкционных сталей;*
- 3. отсутствие процесса предварительного напряжения, усложняющего строительство;*
- 4. возможность получения необходимой жесткости покрытия при малой постоянной и большой временной нагрузке.*

*Недостатки:*

- 1. большая металлоемкость по сравнению с мембранными и тросовыми системами;*
- 2. не используется пространственность работы конструкции.*

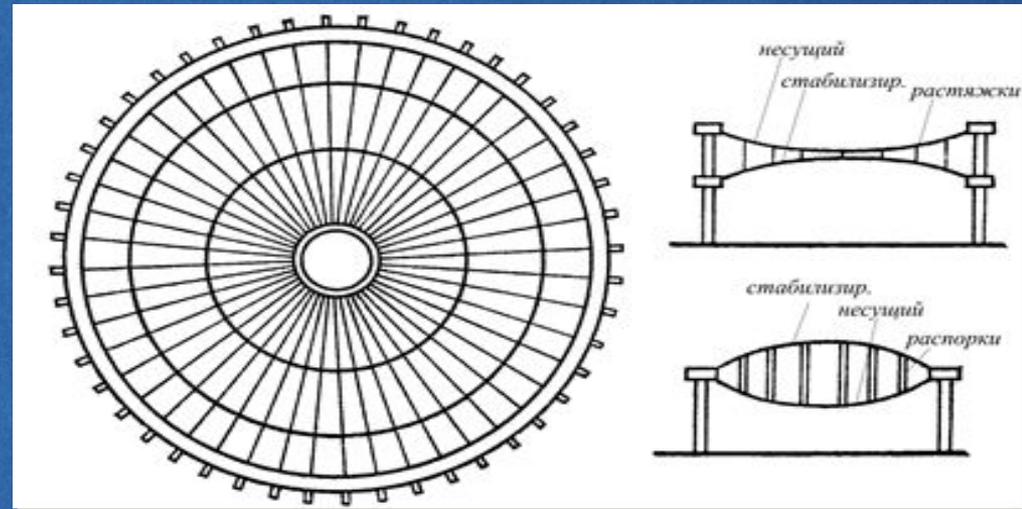




### 3.4.3 Покрытия двухъярусными системами

Двухъярусными называют несущие системы, состоящие из двух поясов, расположенных друг над другом, связанных между собой параллельно расположенными распорками или растяжками и совместно работающих на восприятие внешних нагрузок. Предварительное напряжение системы создает усилия взаимодействия нитей, которые передаются через растяжки или распорки, соединяющие пояса системы.

Эти силы взаимодействия называют контактной нагрузкой, и она, действуя на несущий пояс подобно постоянной нагрузке, уменьшает возможность его кинематических перемещений.



Цель предварительного напряжения – препятствовать искажению формы системы при неравномерном распределении временной нагрузки и уменьшать прогибы. Предварительное напряжение системы производят натяжением стабилизирующего пояса.





### 3.4.4 Покрытия тросовыми фермами .

*Дальнейшим развитием двухпоясных систем является превращение их в тросовые фермы, где растяжки в каждой панели заменены наклонными гибкими раскосами, пересекающимися с поясами в узлах фермы и превращающими систему в геометрически неизменяемую.*

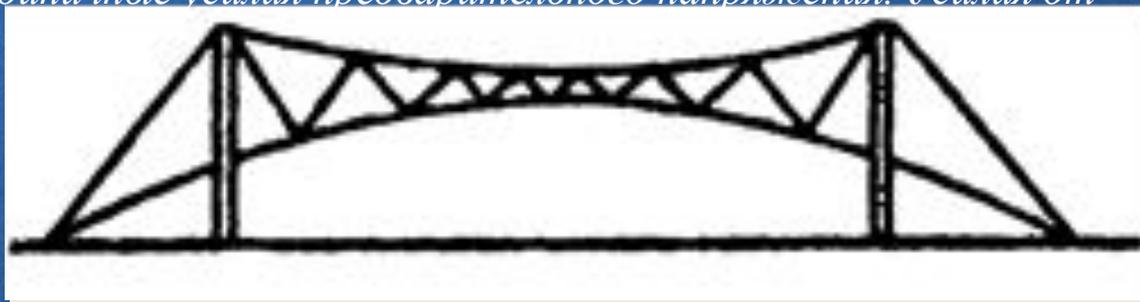
*В тросовых фермах есть растянутые и сжатые элементы и для обеспечения работы на сжатие гибких раскосов они должны быть подвергнуты предварительному растяжению.*

*Тросовые фермы как системы геометрически неизменяемые более жестки, чем обычные двухпоясные системы (особенно при действии неравновесных нагрузок), а потому их более целесообразно применять при легких кровлях и больших временных нагрузках.*

*Предварительное напряжение тросовых ферм удобно осуществлять натяжением раскосов винтовыми стяжками.*

*Тросовые фермы как системы рассчитывают общепринятыми методами строительной ме-*

*ханики, применяемыми при расчете статически неопределимых стержневых систем. Ферму рассчитывают на внешние нагрузки и единичные усилия предварительного напряжения. Усилия от предварительного напряжения во всех элементах фермы должны быть растягивающими, что достигается соответствующим подбором геометрии системы.*

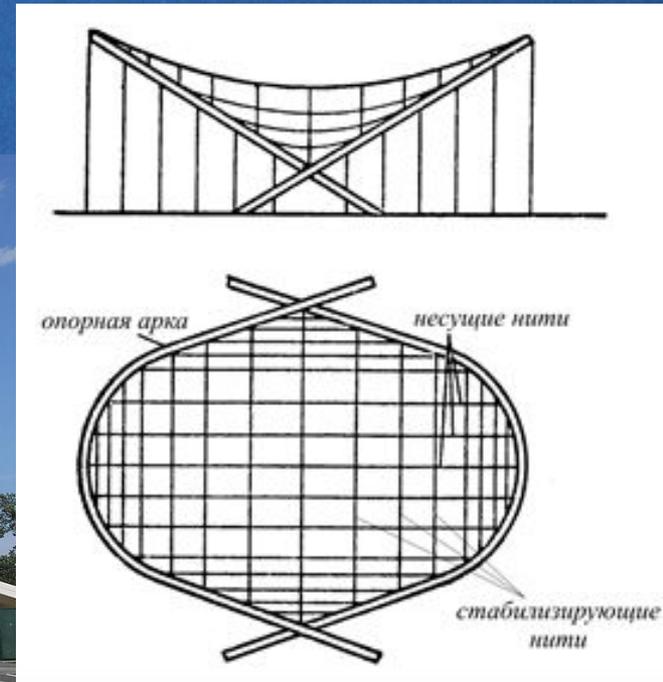




### 3.4.5 Покрытия седловидными сетками

Покрытия напряженными седловидными сетками являются одной из наиболее распространенных ферм висячих покрытий, применяемых как в капитальных сооружениях, так и во временных покрытиях – навесах. Основная несущая конструкция – седловидная сетка, состоящая из несущих нитей, имеющих провис вниз, и перпендикулярных стабилизирующих нитей, имеющих выгиб вверх. Эта система является мгновенно-жесткой, поскольку поверхность сетки имеет отрицательную гауссову кривизну. Таким образом, несущая конструкция является внутренне стабилизированной, способной воспринимать нагрузки противоположных направлений, например собственный вес покрытия, вес снега, и отрицательное давление ветра (отсос) и позволяет применять любую конструкцию кровли: от жестких утепленных щитов до тканевых или пленочных покрытий.

Эта универсальность покрытий, а также возможное разнообразие плана покрытия привели к широкому их распространению.





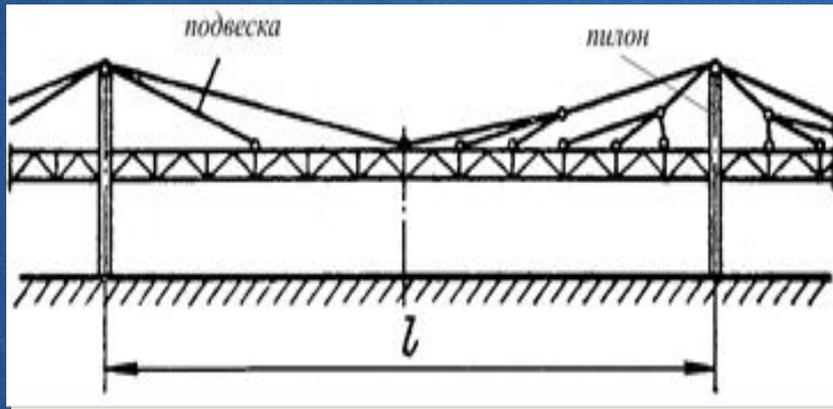
### 3.4.6 Комбинированные висячие системы

Комбинированными называются системы, в которых стабилизацию производят введением в конструкцию покрытия жестких элементов, работающих на осевое усилие и поперечный изгиб.

Применение комбинированных систем особенно рационально, если возможно действие неравномерно распределенных нагрузок. В этом случае жесткий элемент, работая на изгиб, перераспределяет нагрузку между гибкими элементами, благодаря чему уменьшается деформация покрытия.

Среди комбинированных систем наиболее распространены консольные. Система эта состоит обычно из консольных балок или ферм, шарнирно опертых на поддерживающую конструкцию и подвешенных к пилону одной или несколькими подвесками.

Расчет консольных систем ведется обычными методами строительной механики с учетом удлинения подвесок и специфических особенностей не имеет.





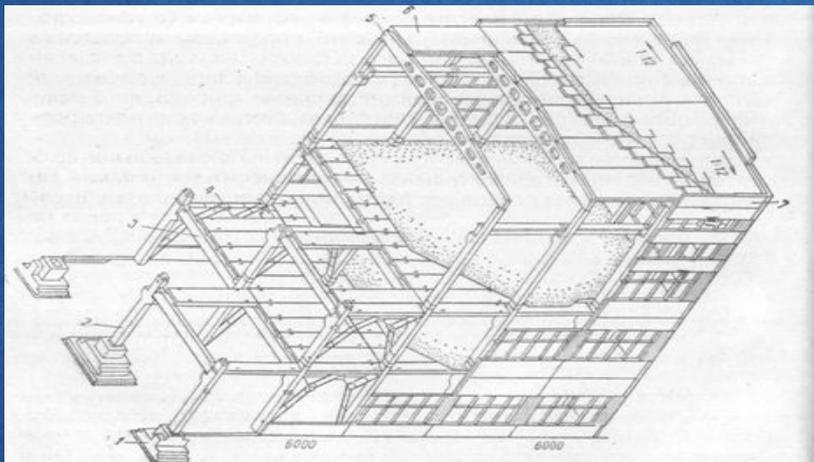
## 4. СТАЛЬНЫЕ КАРКАСЫ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

При большой этажности зданий (20-30 этажей и выше) рационально разделение конструкций на несущие и ограждающие. Функции несущих конструкций выполняют каркас из высокопрочных материалов (сталь, ж/б); функции ограждающих конструкций – легкие стеновые панели с эффективными термоизоляционными материалами.

Каркасы могут быть стальными, ж/б и смешанными – колонны нижних этажей из стали, верхних из ж/б.

С повышением этажности здания целесообразность применения стального каркаса увеличивается. На каркас многоэтажного здания действуют следующие нагрузки: вертикальные – собственный вес здания (постоянные), полезные нагрузки помещений (временные длительные); горизонтальные – ветровые (кратковременные), сейсмические (особые).

Основными элементами каркаса являются колонны и балки, образующие систему, воспринимающую как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки, и передающую их воздействия на фундамент. Фундамент обычно проектируют в виде сплошной ж/б плиты, наилучшим образом распределяющей неравномерно приложенные к фундаменту нагрузки по всей площади основания здания.





*Вертикальные нагрузки через балки перекрытия передаются на колонны и затем на фундамент. Для восприятия и передачи горизонтальных нагрузок на фундамент нужно создать в каркасе жесткие в горизонтальном направлении системы. Такие системы могут быть:*

- 1) бескаркасные системы, состоящие из пластинок (стен), оболочек открытого и замкнутого профиля, объемных тонкостенных блоков;*
- 2) каркасные системы, состоящие из стержней;*
- 3) смешанные системы, состоящие из элементов каркасных и бескаркасных систем.*

*Металлические несущие конструкции применяют в каркасных и смешанных системах.*

*Каркасные и смешанные системы в зависимости от распределения функций в системе для обеспечения ее пространственной жесткости и устойчивости*

*подразделяются на:*

- 1) рамные;*
- 2) связевые;*
- 3) рамно-связевые.*





## 4.1 Рамные системы

Рамная система состоит из жестко соединенных колонн и ригелей, образующих плоские и пространственные рамы, объединенные перекрытиями.

В обычной рамной системе (рис. а) колонны регулярно расположены по всему плану здания с шагом 6-9 м. Пространственная жесткость и эффективность работы рамной системы существенно повышается при размещении колонн только по контуру здания с образованием внешней пространственной рамы (рис. б).

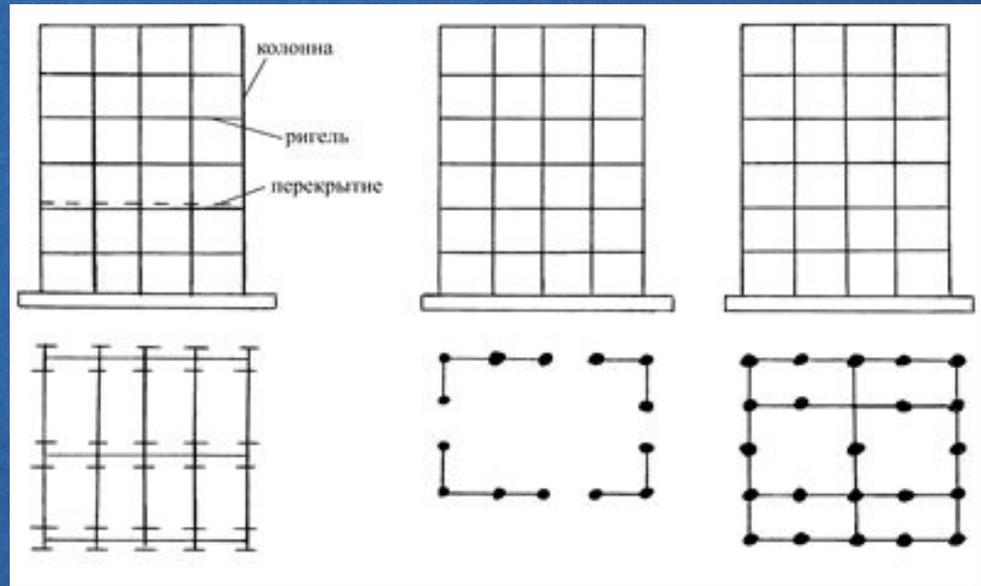
Преимущества системы с внешней пространственной состоит в повышении ее общей изгибной жесткости, потому что при распределении колонн по контуру увеличивается момент инерции горизонтального сечения каркаса. Система отличается высокой жесткостью при кручении. Эта система имеет и другие названия: рамная оболочка, рамная труба. Секционно-рамная система (рис. в), структура которой в плане напоминает обычную рамную систему, а составляющие ее плоские рамы решены как грани системы с внешней рамой и имеют часто расположенные колонны (шаг колонн меньше размера секции в плане). Жесткость этой системы по сравнению с предыдущей повышается благодаря дополнительному сопротивлению внутренних рам.

По такой системе построено здание высотой 442м (109 этажей) США.

а)

б)

в)





## 4.2 Связевые системы.

Связевая система состоит из связевой конструкции, колонн и шарнирно присоединенных к ним ригелями.

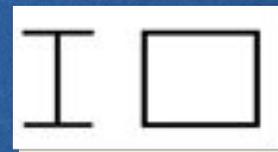
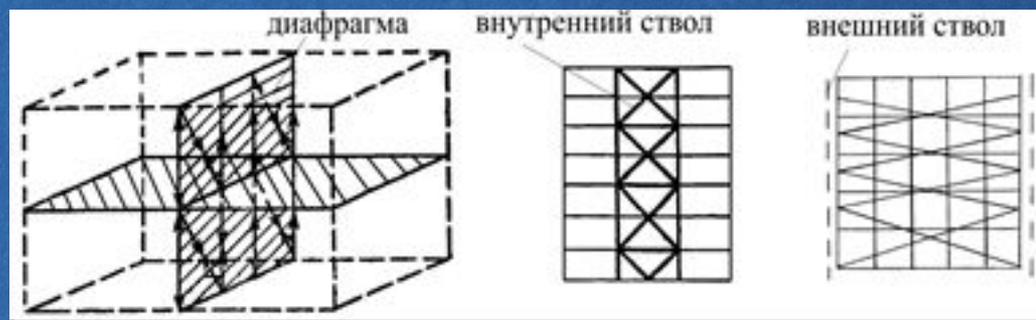
Основные связевые системы:

- 1) с диафрагмами;
- 2) с внутренним стволом;
- 3) с внешним стволом.

Диафрагмы могут быть решены в виде плоских ферм, стенок жесткости (обычно ж/б), тяжелых рам.

Внутренний ствол может иметь открытое или замкнутое поперечное сечение. Возможно решение ствола в виде стальной пространственной фермы или жесткой рамы.

Внешний ствол, охватывающий все здание, наиболее эффективен с точки зрения обеспечения жесткости системы и восприятия горизонтальных нагрузок.



## 4.3 Рамно-связевые системы

Основные рамно-связевые системы аналогичны по своей схеме связевым, но отличаются от них рамным соединением колонн и ригелей, не входящих в связевую конструкцию.



## 4.4 Конструкции элементов и особенности расчета стального каркаса многоэтажных зданий

При небольшой свободной длине колонн (в пределах этажа 3-4м) и большой Площади сечения (нагрузка в нижних этажах достигает нескольких десятков тысяч кН, коэффициенты продольного изгиба получаются близкими к единице.

Поэтому в колоннах применяют двутавровые сварные сечения с толстыми полками и стенками ( $\delta = 40-60\text{мм}$ ), а также сплошные квадратные и прямоугольные сечения. В ряде высотных зданий применены колонны из пакета толстых листов (40–60 мм), соединенных продольными связующими швами. В колоннах с небольшими усилиями (4000–5000 кН) применяют сечения из двух уголков (рис.1) и из 4-х (рис.2) уголков усиленных внутренним листом. Колонны стыкуются по высоте через 2 этажа. Для удобства монтажа стыки размещают на 0,5-1м выше уровня междуэтажных перекрытий. Стыки проектируются с фрезеровкой торцов.

Базы колонн, как и стыки, проектируют с фрезерованными торцами с опиранием на строганую плиту толщиной до 200 мм.

Балки перекрытия проектируются двутаврового сечения – прокатные или сварные. Сопряжение балок с колоннами может быть шарнирным и жестким. При шарнирном сопряжении балки передают на колонны только вертикальные реакции; при жестком сопряжении – вертикальные реакции и момент.

Связи контролируют как фермы, у которых поясами служат колонны, стойками балки перекрытий, и дополнительно ставят раскосы.

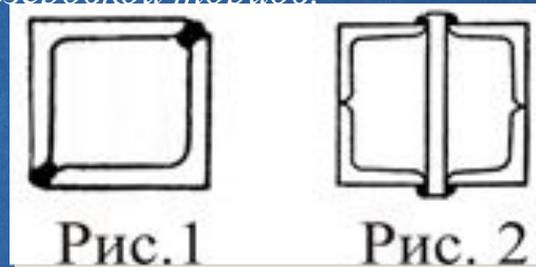


Рис.1

Рис. 2



*Стальной каркас многоэтажных зданий рассчитывают на несущую способность и жест-кость. Несущую способность проверяют при совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок; жесткость проверяют при действии горизонтальных нагрузок – ветра. При статическом расчете сложная пространственная система каркаса расчленяется на отдельные плоские системы.*

*Горизонтальную нагрузку воспринимают рамы, расположенные по всем рядам колонн (рамная система), или отдельные связи (связевая система). При рамной системе каркаса вся ветровая нагрузка распределяется между рамами пропорционально их жесткостям. Ввиду большой степени статической неопределимости рам многоэтажных зданий усилия в них находят приближенными методами. Распространен расчет, при котором рама принимается как статически определимая в результате размещения шарниров посередине пролета балки и посередине высоты колонн в пределах каждого этажа.*

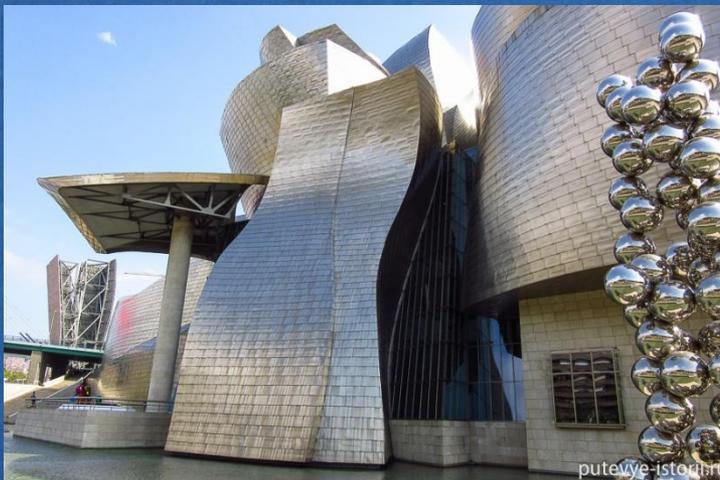
*Ветровая нагрузка на отдельно стоящие вертикальные связи распределяется пропорционально их жесткостям. Если связи поставлены несимметрично, то необходимо учитывать дополнительные воздействия на них, получаемые от закручивания системы. После определения величин нагрузок, действующих на связи, они рассчитываются как вертикальные фермы обычными методами статики.*

## 5. ЛИСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Листовые конструкции представляют собой различные сооружения типа оболочек, несущей основой которых являются плоские или изогнутые металлические листы (пластинки и оболочки). Они применяются для хранения, перегрузки, транспортировки, технологической переработки жидкостей, газов и сыпучих материалов. Листовые конструкции широко применяются во всех областях промышленности и составляют по массе около 20 % всех применяемых М/К.

Листовые конструкции классифицируются по назначению:

1. резервуары для хранения жидкостей (нефти, нефтепродуктов, кислот, сжиженных газов и пр.);
2. газгольдеры для хранения и выравнивания состава газов;
3. бункеры и силосы для хранения и перегрузки сыпучих материалов (руды, угля, цемента, песка и т.п.);
4. листовые конструкции доменных цехов (кожухи доменных печей, воздухонагреватели, пылеулавливатели и др.);
5. листовые конструкции специальных технологических установок (химических и нефтеперерабатывающих заводов);
6. трубопроводы большого диаметра для транспортировки воды и газов.





Элементами, образующими листовую конструкцию, являются плоские металлические листы – пластинки или изогнутые листы – оболочки. Работа и расчет пластинок и оболочек зависят от их геометрических параметров.

Работа и расчет плоских пластинок зависят от отношения  $\frac{l}{t}$ ,

где  $l$  – пролет пластинки или наименьший размер в плане при опирании пластинки по контуру,  $t$  – ее толщина.

Пластинки малого прогиба имеют отношение  $5 < \frac{l}{t} < 50$ . Такие пластинки работают только на изгиб. Напряжениями от распора пренебрегают, если  $f_{\max} \leq 0,5t$

Пластинки большого прогиба имеют отношение  $50 < \frac{l}{t} < 300$ . Такие пластинки работают на совместное действие изгиба и растяжения. У них  $f_{\max} > 0,5t$

Гибкие пластинки (мембраны) имеют отношение  $\frac{l}{t} > 300$  и работают как гибкие нити только на растяжение от распора.

Поверхность оболочек образуется изгибом листов по заданному радиусу кривизны. Оболочки, изогнутые в одном направлении с постоянным радиусом кривизны, называются цилиндрическими; если этот радиус изменяется вдоль оси вращения по линейному закону, получается коническая оболочка. Если оболочка образована изгибом листа во взаимно перпендикулярных направлениях, получается сферическая оболочка.

Работа и расчет оболочек зависят от отношения ее радиуса кривизны к толщине  $\frac{r}{t}$ .

Тонкие оболочки листовых конструкций имеют отношение  $\frac{r}{t} \geq 20$ .

Равновесие элемента тонкой оболочки при определенных условиях соблюдается при наличии только осевых сил без изгиба (безмоментная теория расчета).



Равновесие элемента тонкой оболочки при определенных условиях соблюдается при наличии только осевых сил без изгиба (безмоментная теория расчета).

К таким условиям относятся:

1. сплошные осесимметричные нагрузки без резких изменений интенсивности;
2. участок оболочки должен быть сплошным, достаточно удаленным от так называемых краевых линий, препятствующих или искажающих плавность деформаций оболочки.

Такие линии образуются ребрами жесткости, днищами, резкими изменениями толщины, острыми перегибами.

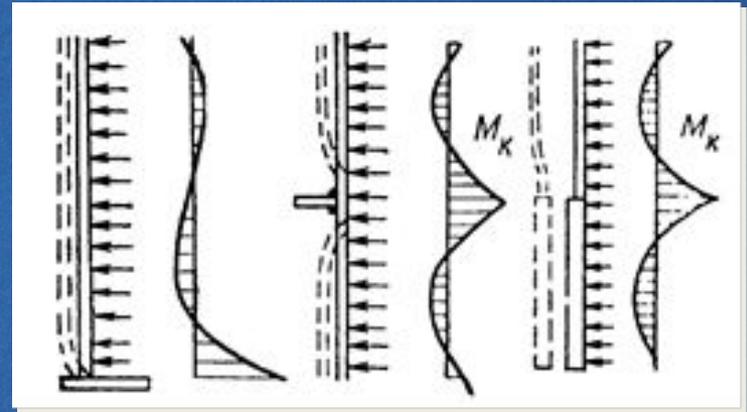
Деформация оболочки в этих местах стеснена, на некотором участке происходит местный изгиб, которым нельзя пренебречь.

Возникновение изгибающих моментов у краевых линий называется краевым эффектом.

Напряжение для некоторых оболочек простейших форм:

1. Шаровая оболочка  $\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{Pr}{2t}$ ,  
где  $P$  – внутреннее давление;  
 $r$  – радиус сферы;  $t$  – толщина оболочки;

2. Цилиндрическая оболочка  $\sigma_1 = \frac{Pr}{t}$ ;  $\sigma_2 = \frac{Pr}{2t}$





Оболочки, как правило, испытывают двухосное напряженное состояние. Проверка их прочности производится по приведенным напряжениям

$$\sigma_{ред} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \leq \gamma_c R_y$$

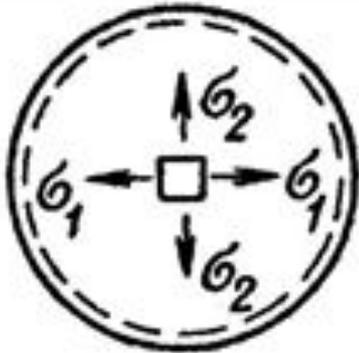
при этом должны соблюдаться условия

$$\sigma_1 \leq \gamma_c R_y \quad \sigma_2 \leq \gamma_c R_y$$

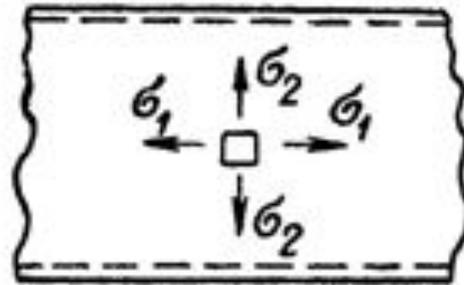
При равномерном внутреннем давлении и получаются растягивающими.

При равномерном внешнем давлении или внутреннем вакууме напряжения определяются по тем же формулам, однако будут другого знака, сжимающими. В этом случае оболочка может потерять устойчивость.

Проверка оболочек на устойчивость заключается в том, чтобы расчетные напряжения в оболочке от нагрузки не превышали критических которые зависят от вида оболочки, отношения  $\frac{l}{t}$ , напряженного состояния и материала.



шаровая оболочка



цилиндрическая оболочка



## 5.1 Вертикальные цилиндрические резервуары низкого давления

Резервуарами низкого давления называются резервуары, имеющие небольшое избыточное давление внутренней паровоздушной среды до  $2 \text{ кН/м}^2$ . Вертикальные резервуары низкого давления строятся объемом  $100\text{-}50000 \text{ м}^3$ . Конструкция вертикального цилиндрического резервуара состоит из днища, корпуса и покрытия.

Днище резервуара устанавливается непосредственно на песчаную подушку высотой  $20\text{-}35 \text{ см}$  с уклоном от центра к краям  $i = 1:100$ . Толщина листов днища принимается конструктивно толщиной  $t = 4\div 6 \text{ мм}$ .

Корпус резервуара под воздействием гидростатического давления жидкости испытывает растяжение. Толщина его листов принимается по расчету, но не менее  $4 \text{ мм}$ . Листы толщиной  $6 \text{ мм}$  и более свариваются в стык; при меньшей толщине сварка производится внахлестку с телескопическим или ступенчатым расположением листов по вертикали.

Крыша резервуара опирается на корпус и центральную стойку; толщина ее листов  $2,5\div 3 \text{ мм}$ .

Корпус резервуара рассчитывают как цилиндрическую оболочку, нагруженную внутренним гидростатическим и избыточным давлением.





Растягивающее кольцевое напряжение в стенке:

$$\sigma_1 = \frac{Pr}{t} = \frac{(n_1 \gamma x + n_2 P)r}{t} \leq 0,8R_y$$

где  $n_1 \gamma x$  – гидростатическое давление по закону треугольника на глубине  $X$  от поверхности жидкости;

$n_1 = 1,1$  – коэффициент перегрузки;

$\gamma$  – удельный вес жидкости;

$n_2 P$  – заданное избыточное давление среды  $P$  с коэффициентом перегрузки  $n_2 = 1,2$ ;

$r$  – радиус резервуара;

$t$  – толщина стенки.

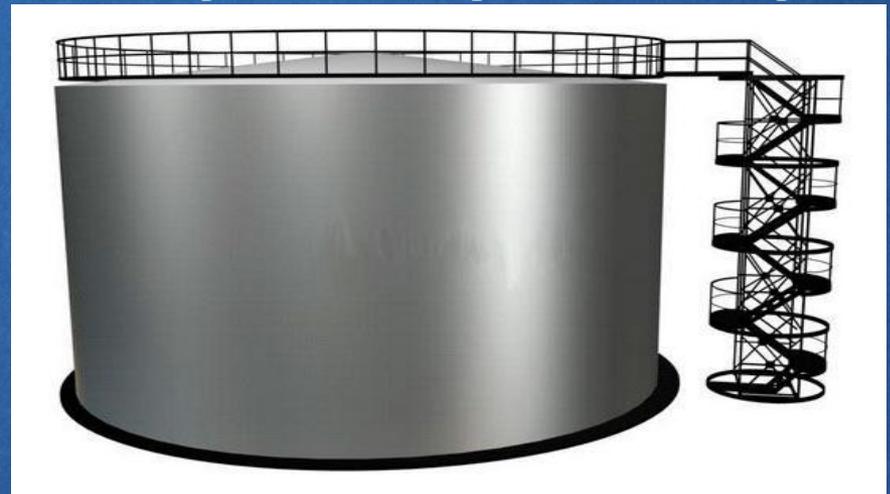
Толщину листов каждого пояса корпуса резервуара определяют по приведенной формуле при условии его полного заполнения жидкостью, т.е.  $X$  принимается от верха корпуса до нижнего края корпуса.

Меридиональными напряжениями обычно пренебрегают, поскольку они незначительны.

Кровлю резервуара рассчитывают на действие собственного веса  $m/k$ , теплоизоляции, снега и действие вакуума =  $0,25 \text{ КН/м}^2$ .

Кровля проверяется также на обратное направление нагрузки от избыточного давления  $2 \text{ кН/м}^2$  и отсасывающее действие ветра, принимаемого равным  $0,8$  скоростного напора с  $n_z = 1,2$ . При этой проверке предполагается отсутствие снега и теплоизоляции, а вес кровли  $m/k$  принимается с  $n_c = 0,9$ .

Прогоны и поперечные ребра кровельных щитов рассчитывают как однопролетные балки, а листовую обшивку – как тонкие пластинки.





## 5.2 Резервуары повышенного давления.

Такие резервуары имеют внутреннее давление паровоздушной среды до  $70 \div 200$  кН/м<sup>2</sup> для легких жидкостей и до  $600 \div 1800$  кН/м<sup>2</sup> для сжиженных газов.

Резервуары повышенного давления имеют разнообразную конструктивную форму, особенностью которой является плавность внешнего очертания оболочки, хорошо работающей на внутреннее давление.

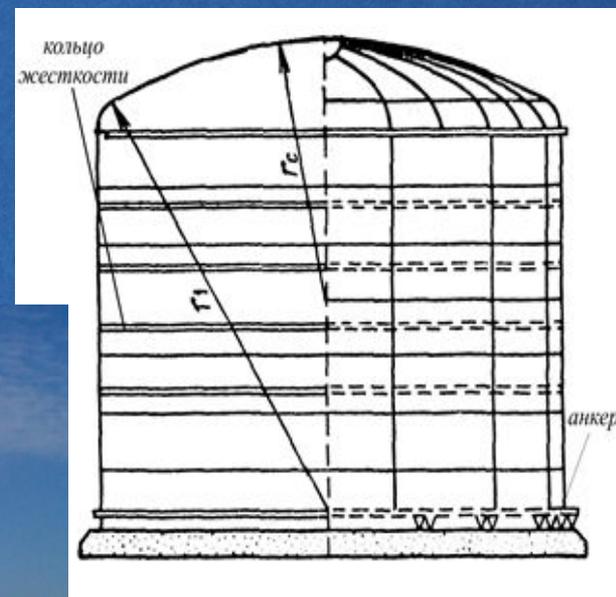
Вертикальные цилиндрические резервуары повышенного давления проектируются со сферическими или сфероцилиндрическими кровлями и плоскими или выпуклыми днищами.

Резервуары с плоскими днищами могут приподняться при большом внутреннем давлении и изогнуть днище.

Поэтому нижний пояс корпуса заанкеривают в кольцевой ленточный фундамент анкерами, расположенными через 2 – 2,5 м.

Против консолей для анкеров с внутренней стороны располагается кольцо жесткости, обеспечивающее прочность и устойчивость нижнего пояса резервуара.

Резервуары с выпуклым днищем имеют сходную конструкцию кровли и днища.

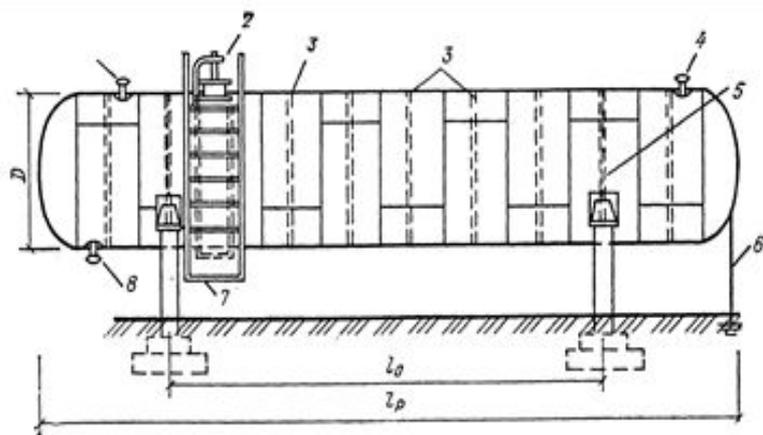




Горизонтальные цилиндрические резервуары проектируются диаметром до 4м, длиной до 40м, объемом до 400м<sup>3</sup> с избыточным давлением 40-70 КН/м<sup>2</sup> при хранении жидкостей и 200 – 1800КН/м<sup>2</sup> при хранении сжиженных газов.

Наземные резервуары устанавливаются на опоры, расстояние между которыми 0,5÷0,7 длины резервуара. По оси опор внутри резервуара приваривают диафрагмы из гнутого уголка с треугольником жесткости. В днище резервуаров малого объема и давления ( $d \geq 2м$ ;  $p = \text{до } 40 \text{ рН/м}^2$ ) делают плоскими, работающими как мембрана.

При больших давлениях применяют сферические, конические или цилиндрические днища.

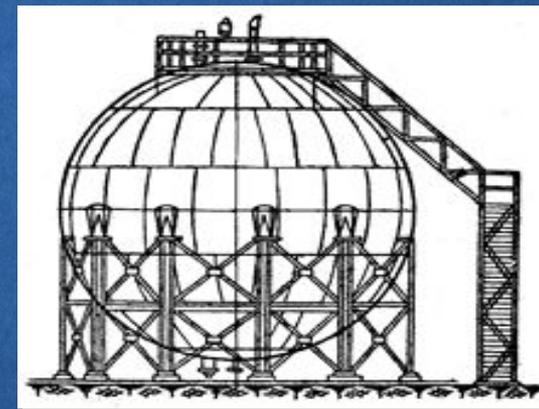


1 - штуцер для загрузки; 2 - лаз для осмотра; 3 - кольцо жесткости; 4 - штуцер для вентиляции;  
5 - опорная диафрагма; 6 - заземление; 7 - лестница; 8 - штуцер для забора;

Шаровые резервуары применяют для хранения сжиженных газов и нефтепродуктов при внутреннем избыточном давлении 200–600 КН/м<sup>2</sup>.

Шаровые резервуары устанавливают на 8–12 колонн или специальное опорное кольцо.

Каплевидные резервуары имеют форму капли жидкости на несмачивающейся поверхности под действием сил поверхностного натяжения. В условиях нормального режима такие резервуары являются равнопрочной конструкцией.



## 5.3 Газгольдеры



*Газгольдеры – это сооружения в виде сосудов, предназначенных для хранения, выравнивания состава и перемешивания различных газов.*

*В зависимости от внутреннего давления газгольдеры подразделяются на:*

- 1. газгольдеры низкого давления с избыточным давлением до 5 кН/м<sup>2</sup>;*
- 2. газгольдеры высокого давления с избыточным давлением до 3000 кН/м<sup>2</sup> и более.*

*Существуют газгольдеры постоянного давления и газгольдеры постоянного объема.*

*В процессе наполнения или опорожнения в первых изменяется объем, а давление остается все время постоянным; объем вторых газгольдеров постоянный, но изменяется давление газа.*

*Газгольдеры низкого давления имеют переменный объем и делятся на две группы:*

- 1. мокрые газгольдеры с вертикальными направляющими и винтовыми направляющими;*
- 2. сухие газгольдеры с поршнем и гибкой секцией.*

*Наиболее распространены мокрые газгольдеры.*





### 5.3.1.1 Мокрые газгольдеры.

В газгольдерах этой группы для уплотнения подвижных соединений используется вода.

Конструкция газгольдера состоит из неподвижного вертикального резервуара, наполненного водой, в котором находится подвижное звено – опрокинутый стакан – колокол.

В газгольдерах больших объемов (10 000 м<sup>3</sup> и более) между резервуаром и колоколом размещаются подвижные звенья – телескопы.

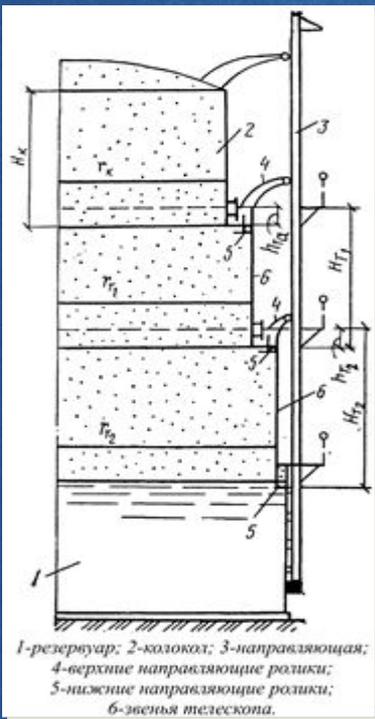
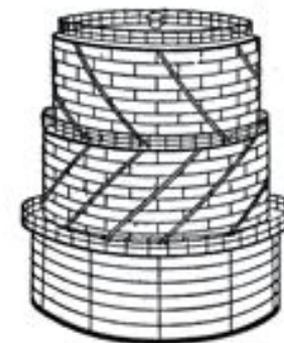
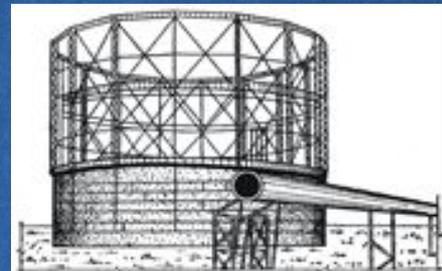
Газ подается под колокол и своим давлением поднимает его, а вода, находящаяся в карманах – желобах, расположенных по периметру колокола и телескопа, является гидравлическим затвором, препятствующим выходу газа наружу.

Газгольдер с одним колоколом называется однозвеньевым, если добавляется телескоп, то двухзвеньевым и т.д.

Мокрые газгольдеры с вертикальными направляющими называются так потому, что движение колокола и телескопов происходит по вертикальным направляющим, расположенных снаружи газгольдера.

В мокрых газгольдерах с винтовыми направляющими подъем и опускание колокола и телескопов производится по направляющим в виде винтовой линии – подобно движению винта в гайке.

Винтовые направляющие расположены по внешней поверхности газгольдера под углом 45°. Под давлением газа колокол как бы ввинчивается в направляющих.



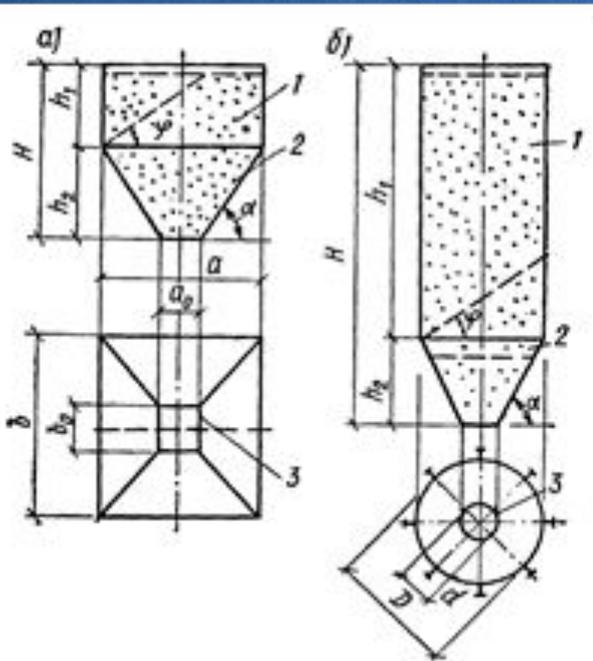
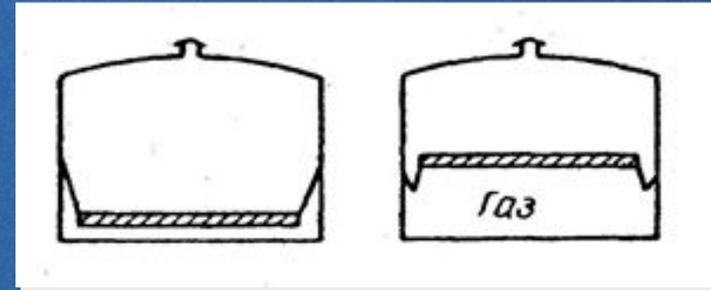


### 5.3.1.2 Сухие газгольдеры

– поршневого типа

Представляют собой вертикальный резервуар, внутри которого находится поршень со скользящим затвором на консистентной смазке, препятствующей просачиванию газа.

– с гибкой секцией



Схемы бункера (а) и силоса (б)

1 — верхняя часть (призматическая или цилиндрическая); 2 — воронка (пирамидальная или коническая); 3 — выпускное отверстие

### 5.4 Бункера и силосы

Бункерами и силосами называют емкости для хранения и перегрузки сыпучих материалов. Силосы имеют высокую цилиндрическую часть.

– поршневого типа

Представляют собой вертикальный резервуар, внутри которого находится поршень со скользящим затвором на консистентной смазке, препятствующей просачиванию газа.

– с гибкой секцией



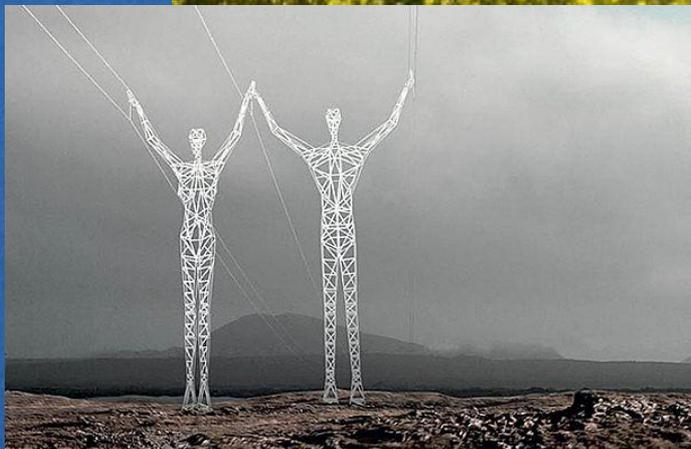
## 6. ВЫСОТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Высотными называют сооружения, высота которых намного превышает их размеры в поперечном сечении. К ним относятся опоры антенных сооружений связи (радио и телевидение), опоры воздушных линий электропередач (ЛЭП), вытяжные башни, дымовые трубы, осветительные метеорологические вышки, маяки, водонапорные башни, силосы и т.п.

По конструктивной схеме все высотные сооружения разделяются на два основных вида – башни и мачты.



© Зиньковский М.А.





## 6.1 Башни

Башнями называют свободно стоящие сооружения, жестко закрепленные в основании и работающие как консоль (вертикальная консольная балка).

Нагрузки, действующие на башню: собственный вес конструкции, оборудования, ветер, гололед.

Нагрузка от собственного веса и оборудования вызывает относительно небольшие напряжения (20–25 % расчетных), за исключением группы башен,

например водонапорных, поддерживающих резервуар с водой, вышек с подъемниками и т.п.

Доминирующей нагрузкой является ветровая. Величина ветровой нагрузки зависит не только от скоростного напора, но и от формы и габаритов самой башни и ее отдельных элементов. Ветровая нагрузка определяется как сумма ее статической и динамической составляющей.

Кроме того, башни, проверяемые на резонанс от действия ветра, следует проверять расчетом на выносливость.

Для башен с периодом собственных колебаний меньше 0,25 сек. динамическая составляющая, вызываемая пульсацией скоростного напора ветра, не учитывается.

Расчетные усилия в элементах башни определяют как в консольном внецентренно-сжатом стержне под действием перечисленных нагрузок.

Башни в большинстве случаев проектируют решетчатыми, в виде пространственных ферм трех или четырехгранного, реже многогранного очертания. С увеличением числа граней расход металла возрастает.

В целях обеспечения устойчивости и более равномерного распределения усилий в поясах башни проектируют уширенными книзу в соответствии с возрастанием изгибающих моментов от вершины к основанию.





$$\frac{1}{6} \approx \frac{1}{12}$$

*Ширина башни у основания составляет высоты. С увеличением ширины башни уменьшаются усилия в поясах от моментов, что снижает расход металла на пояса, но приводит к дополнительному расходу материала на решетку и диафрагмы.*

*Ширину верхней части башни стремятся свести к минимуму, поскольку это способствует уменьшению нагрузки от ветра.*

*В верхней части башни целесообразно применять треугольную и раскосную системы решетки; при большой ширине грани ромбическую или полураскосную.*

*Существенную экономию стали можно получить при применении крестовой решетки с гибкими предварительно напряженными раскосами.*

*При небольшой ширине ствола башни его проектируют сплошностенным.*





## 6.2 Мачты

Мачты представляют собой высокие тонкоствольные конструкции, расчлененные оттяжками и работающие как балки на упругих опорах. Мачты экономичнее башен по расходу металла, но требуют большей площади для установки.

Нагрузки, действующие на ствол мачты: собственный вес конструкции, оборудования, ветер, гололед, вертикальная составляющая тяжения оттяжек.

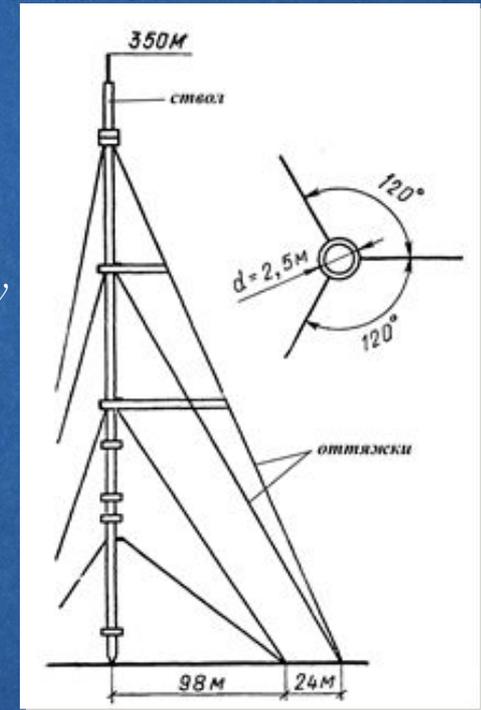
Расчетные усилия в элементах ствола мачты определяют как во внецентренно сжатом стержне на упругих опорах, роль которых выполняют оттяжки.

Доминирующими нагрузками для мачт являются ветровые и гололедные. Ветровая нагрузка определяется как сумма ее статической и динамической составляющей.

Для мачт, так же, как и для башен, с периодом собственных колебаний меньше 0,25 с динамическая составляющая, вызываемая пульсацией скоростного напора ветра, не учитывается.

Ствол мачты проектируют постоянного по высоте сквозного или сплошного сечения в плане сквозных мачт с тремя или четырьмя углами соответственно с тремя или четырьмя оттяжками. Стволы сплошных мачт проектируют из труб.

Оттяжки проектируются из стальных канатов, закрепляя их к бетонным якорям. Оттяжки разных ярусов размещаются или параллельно друг другу или сводятся в одну точку. В первом случае усилия в оттяжках меньше, и меньше вертикальная составляющая на ствол, но зато каждой оттяжке необходим анкерный якорь и большая площадь для установки мачты. Для обеспечения поперечной жесткости мачты наименьший угол наклона оттяжки принимается  $30^\circ$ . Крепление ствола мачты к фундаменту – шарнирное.





## 6.3 Опоры ЛЭП

Опоры ЛЭП предназначены для поддержания токонесущих проводов линий электропередачи. Расстояние между опорами принимается от 200м до 2,5км. Опоры ЛЭП разделяются на линейные (промежуточные), устанавливаемые на прямолинейном участке трассы без преград, и специальные (анкерные), расположенные в углах трассы (угловые), у переходов через водные препятствия и другие преграды (переходные).

По форме опоры разделяются на одностовольные, несущие провода на консолях, и порталные (двустовольные или четырехстовольные), несущие провода на поперечном портале.

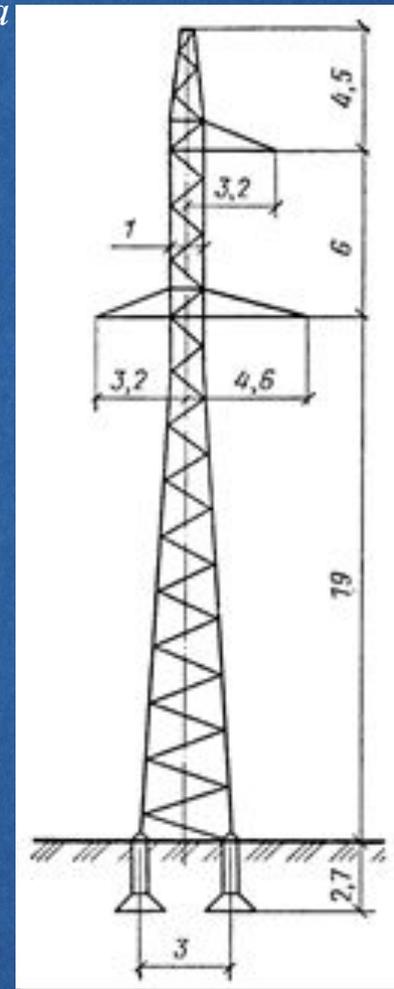
Линейные опоры воспринимают относительно небольшие продольные усилия и для них применяют одностовольные и плоские двустовольные порталные опоры.

На специальные опоры действуют большие дополнительные усилия от угловой составляющей тяжения проводов, разности тяжения у переходов и т.д., поэтому их делают четырехстовольными с подкосами или оттяжками.

Для опор ЛЭП характерна работа на кручение при одностороннем обрыве проводов. Проектирование опор ЛЭП ведется с учетом специальных технических требований.

Опоры ЛЭП имеют высоту до 40м, специальные переходные опоры у широких рек достигают высоты более 200м.

Сечения поясов и раскосов промежуточных опор обычно принимают из одиночных уголков. Опора разбивается на транспортабельные секции с монтажными соединениями на сварке или болтах. Алюминиевые опоры ЛЭП в 2-2,5 раза легче стальных. Их рационально применять в труднодоступных местах.





## 7. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ УСИЛЕНИИ КОНСТРУКЦИЙ.

*Анализом причин аварий м/к установлено, что наиболее распространенными причинами аварий являются следующие:*

*1. перегрузка снегом, наледями и производственной пылью; непродуманная очистка снега, в результате которой отдельные части конструкций перегружаются;*

*2. потеря общей или местной устойчивости сжатыми элементами конструкций из-за отсутствия развязки сжатых поясов;*

*3. хрупкое разрушение конструкций, выполненных из хладостойких сталей (конвертерных с повышенным содержанием фосфора или мартеновских кипящих, имеющих «порог хладостойкости» в интервале минус 10°–30°С), работающих в неотапливаемом помещении или на открытом воздухе;*

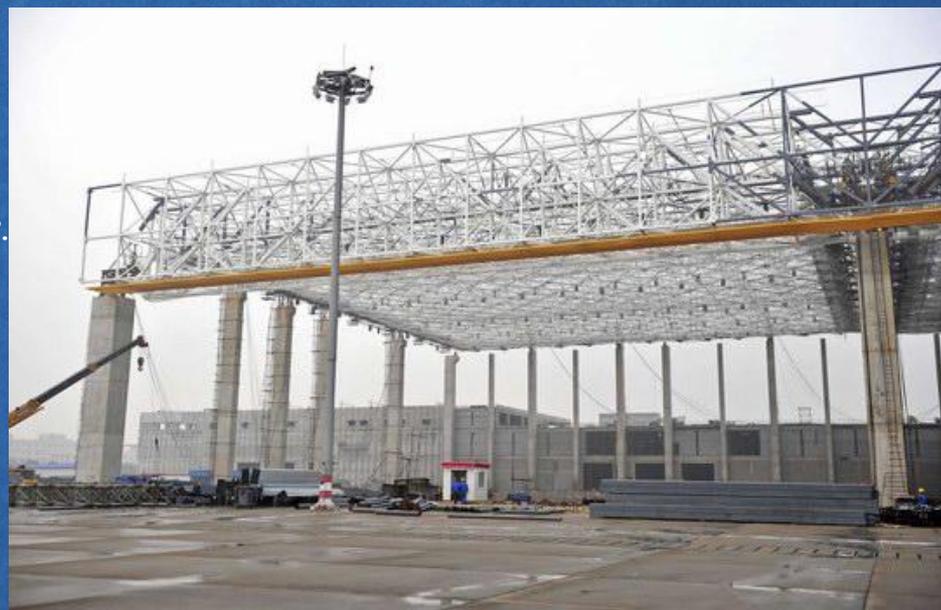
*4. неправильное выполнение сварочных работ, особенно в зимнее время, заключающееся в отсутствии подогрева изделия при температуре – 30°С, отсутствии защиты от ветра, отсутствии контроля;*

*5. наличие концентраторов напряжения (отверстия, прорезы, трещины);*

*6. отсутствие надлежащей защиты стальных конструкций, работающих в агрессивной среде.*

*В отдельных заводских цехах приходится усиливать или менять м/к после 5-10 лет их эксплуатации;*

*7. разрушение швов в конструкциях, работающих на подвижную нагрузку (подкрановые балки).*





## 7.1 Классификация усиления

*Усиление есть совокупность мероприятий направленных на повышение несущей способности конструкции или ее элементов. Конструкции, подлежащие усилению, могут находиться в напряженном состоянии, предварительно разгруженном, и в демонтированном. Регулирование напряжений при усилении по существу, сводится к вопросу о способах включения в работу элементов усиления.*

*Иногда это происходит автоматически, например: при усилении разгруженных и демонтированных конструкций. Чаше же элементы усиления включаются в работу после того, как им дано дополнительное натяжение или произведено искусственное регулирование напряжений в усиливаемой конструкции, устанавливаемых элементах или тех и других одновременно (усиление конструкций под нагрузкой).*

*Усиление конструкций под нагрузкой представляет собой один из частных случаев применения предварительного напряжения в конструкциях.*

*«Специальные мероприятия» имеют такое же большое значение, как и основные способы усиления. К ряду специальных мероприятий относятся: выявление неучтенных запасов прочности и разгрузка или уменьшение действующей на конструкцию нагрузки.*

*Пять способов непосредственного усиления совместно с двумя отнесенными к разряду «специальных мероприятий» решают задачу усиления конструкций.*

*Способами общего усиления конструкций являются усиления за счет изменения конструктивной схемы и установки дополнительных связей пространственной жесткости.*

*К способам местного усиления могут быть отнесены: установка дополнительных ребер, диафрагм, распорок, увеличение сечений отдельных элементов, усиление соединений.*



Наиболее интересным с инженерной точки зрения является способ усиления путем изменения конструктивной схемы. Характерен он тем, что исключает шаблон в выборке приемов, почти всегда дает хорошие экономичные решения. Проектировщик должен совершенно отчетливо представлять себе «игру сил», чтобы предусмотреть наиболее выгодные перераспределения усилий и напряжений в конструкциях.





## 7.2 Искусственное регулирование напряжений при усилении МК

*Искусственное регулирование напряжений может быть выполнено как без специальных устройств, так и с их применением.*

*Регулирование без применения специальных устройств: используется большей частью при усилении разгруженных и демонтированных конструкций, если они усиливаются пред-напряженными элементами.*

*Разгрузка усиливаемого элемента может быть достигнута путем перемещения нагрузки из одного пролета в другой, определенными комбинациями загрузки соседних пролетов в неразрезных и консольных балках и фермах.*

*Если не предусмотреть специальных мер при усилении конструкций под нагрузкой, то на усиливающие элементы будет передаваться только дополнительная и возрастающая постоянная нагрузки.*

*Вся же нагрузка, действующая в момент усиления, будет восприниматься неусиленной конструкцией.*

*Регулирование с использованием специальных устройств и приспособлений.*

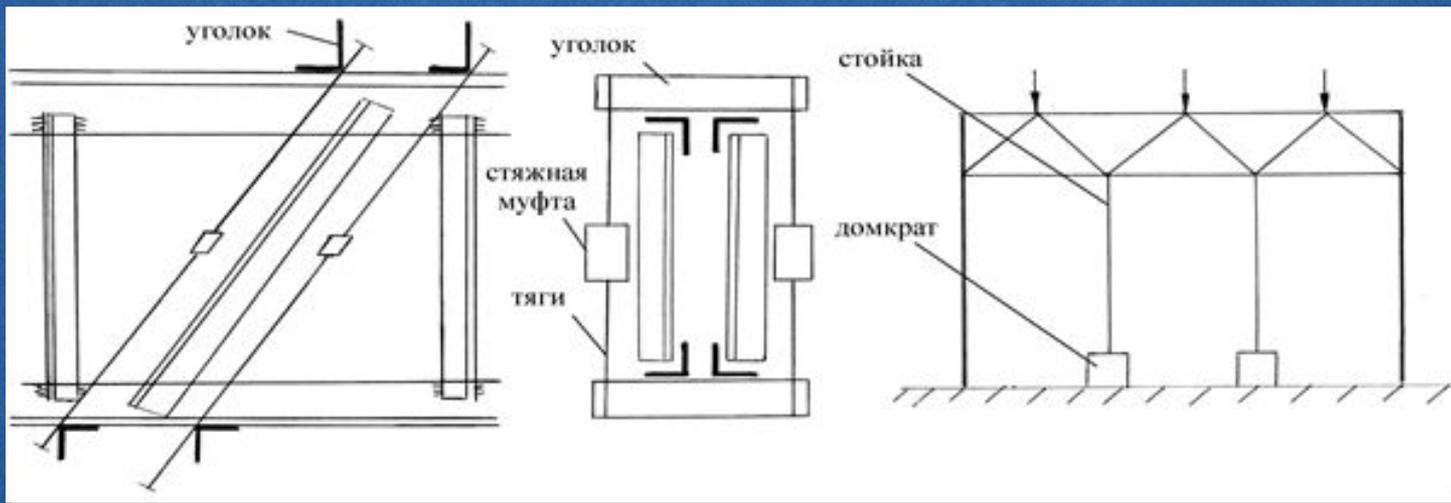
*Если усиливаемая конструкция находится под нагрузкой и работает на изгиб, то приходится принимать меры по уменьшению или устранению прогиба, полученного ею при работе под действием собственного веса и временной нагрузки. Могут встретиться следующие случаи:*

- 1. конструкция усиления должна будет воспринимать только свой собственный вес и существующую временную нагрузку. В этом случае элементы усиления могут быть присоединены без принятия мер по разгрузке конструкции. Уменьшать или устранять прогиб конструкции нет необходимости.*
- 2. конструкция усиления кроме своего собственного веса и существующей временной нагрузки должна будет воспринимать также и часть дополнительной нагрузки. В этом случае, до ее усиления, необходимо уменьшить полученный ею до усиления прогиб.*



3. конструкция усиления помимо собственного веса и временной нагрузки должна будет воспринимать всю дополнительную нагрузку. В этом случае до усиления нужно полностью устранить прогиб в усиливаемой конструкции, имеющейся от действия нагрузок в момент усиления.

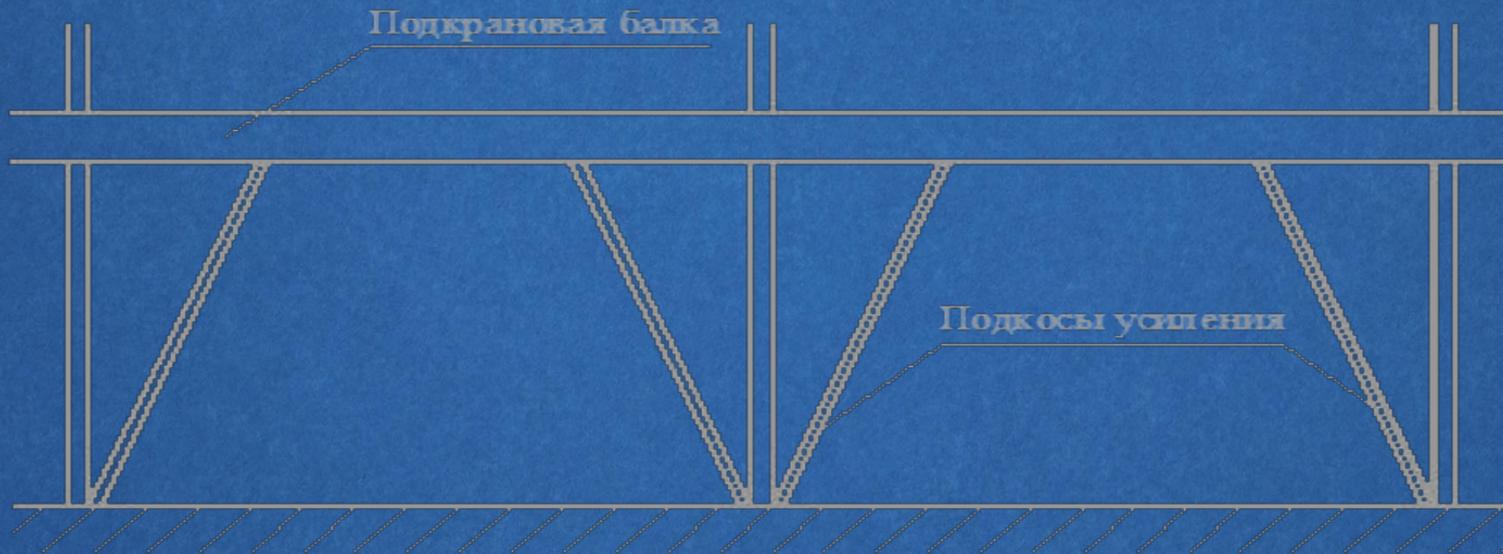
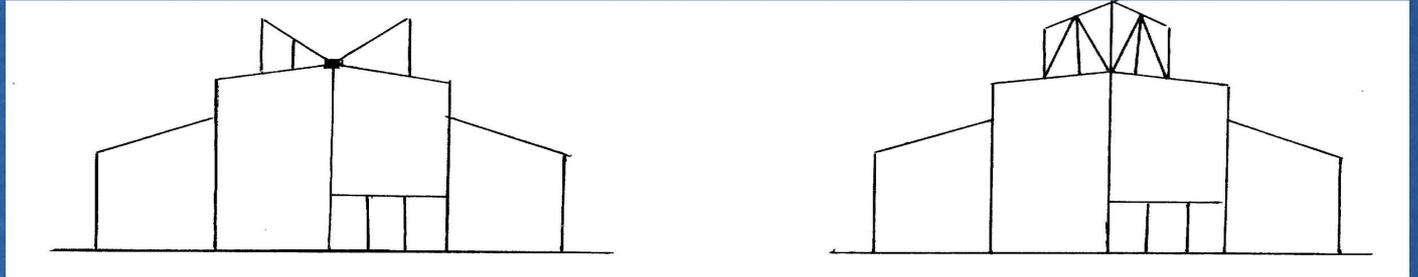
Не рекомендуется выправлять сжатые элементы конструкций под нагрузкой. Погнутые элементы конструкций, если по расчету они не требуют усиления, могут быть оставлены при условии постановки связей и распорок. Для регулирования напряжения в элементах и конструкциях в целом применяют тяги, полиспасты, муфты, домкраты и другие приспособления.





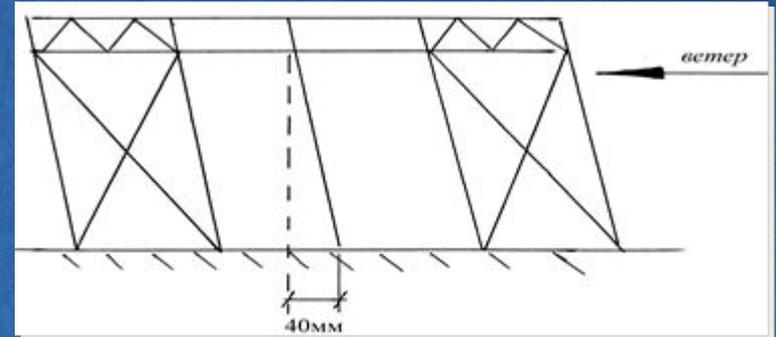
## 7.2.1 Примеры искусственного регулирования напряжений в конструкциях

### 7.2.1.1 Реконструкция главного здания мартеновского цеха.





### 7.2.1.3 Усиление вызванное нарушением технологии монтажа конструкций.



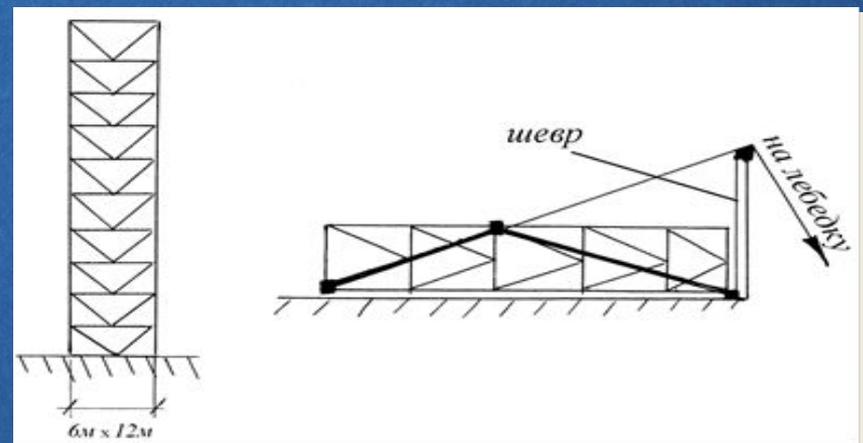
### 7.2.1.4 Регулирование напряжений при усилении ферм.

Причины усиления:

1. замена покрытия с утяжелением.
2. недостаточная длина и высота швов в узлах фермы.



Усиление конструкции от действия монтажных нагрузок.





### 7.2.1.5 Регулирование напряжений в соединениях элементов м/к

*При регулировании напряжений в конструкциях может возникнуть необходимость регулирования напряжений и в соединениях отдельных элементов, в усилении креплений строжней в узлах и т.п.*

*При наварке нового шва в процессе наплавления металла электрода существующий шов будет разогреваться, образуя зону пластичности.*

*Участки шва в зоне пластичности не могут воспринимать приходящуюся на них нагрузку, и эта часть нагрузки будет восприниматься еще не усиленными холодными участками шва, а также уже усиленными, но достаточно остывшими.*

*Зона пластичности будет перемещаться вдоль шва, и напряжения в шве будут непрерывно распределяться по его длине.*

*Условной границей перехода металла шва от идеально упругого к идеально пластическому состоянию для практических расчетов принимают температуру  $450^{\circ}\text{C}$ . При  $t=450-550^{\circ}\text{C}$  резко снижается модуль упругости и предел текучести. Максимальная температура шва непосредственно под электродом достигает  $2200-2300^{\circ}\text{C}$ .*

*Основной величиной, определяющей напряженное состояние шва, является зона пластичности «а» - участок длины шва, находящийся в результате сильного нагрева в пластическом состоянии, который не может воспринимать нагрузку. Зона пластичности зависит как от режима сварки, так и от теплотехнических характеристик сварного соединения.*



Современное состояние разработки вопроса возможности регулирования напряжений в соединениях элементов м/к позволяет сделать следующие выводы:

1) Напряжения в сварных соединениях можно регулировать наложением новых сварных швов или, что более рационально, наплавкой на существующие швы дополнительных слоев; наплавка новых слоев сварных швов более рациональна, потому что в существующих нагруженных конструкциях, находящихся в напряженном состоянии, возможность наложения новых швов ограничена, а крепление к ним новых деталей, на которых можно разместить дополнительные швы, трудоемко.

2) Прочность сварных швов в процессе их усиления падает, причем наибольшая потеря прочности, зависящая от длины усиливаемых швов и режима сварки, составляет 10-20 % первоначальной прочности сварного узла (наибольшее падение прочности происходит, когда дуга находится на расстоянии 15-20 мм от начала сварки). Объясняется это тем, что в процессе наплавки усиливающего слоя шва в зоне дуги выключатся участок шва длиной примерно 50 мм за счет частичного расплавления и сильного нагрева металла; по мере передвижения дуги вдоль шва прочность его возрастает, так как в работу включаются ранее наложенные слои шва.

3) После усиления прочность сварных швов возрастает пропорционально увеличению сечений рабочих швов; в процессе усиления происходит некоторая потеря прочности не только сварных швов, но и деталей узла (фасонки, уголка, накладки и др.): при сварке вдоль действия усилий потери прочности меньше, чем при сварке поперек направления действующих усилий.

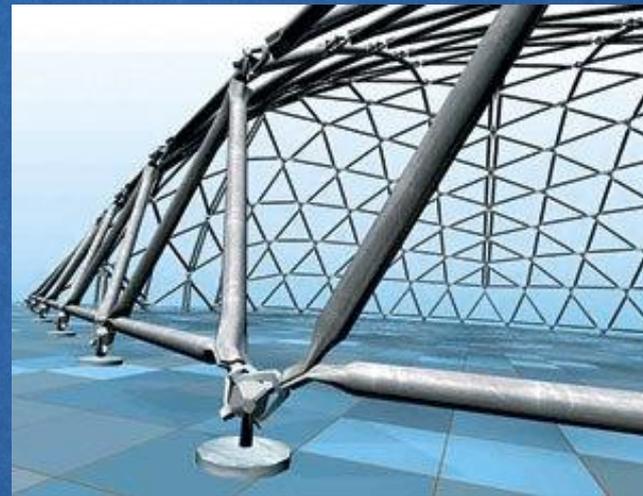




4) Регулирование напряжений в сварных швах под нагрузкой может выполняться как наплавкой, так и приваркой наклонных коротышей-пластин со стороны обушка уголка. При значительной протяженности угловых швов целесообразно выполнять их утолщение наваркой, для коротких же швов, например в узлах ферм, усиление прикрепления целесообразно выполнять приваркой коротышей-пластинок, перекрывающих швы у обушков уголков.

5) Усиление сварных швов наваркой следует производить, начиная с менее напряженных участков, например, усиление креплений стержней ферм в узлах начинать с конца уголка, а не от края фасонки.

6) В отдельных случаях при усилении существующих конструкций допускается усиление заклепочных соединений сваркой. При этом все усилия должно восприниматься сварным соединением. Это объясняется тем, что сварные швы, в силу их малой пластичности, разрушаются раньше, чем заклепки.





## 8. РАСЧЕТ УСИЛЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО МЕТОДУ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ.

*Расчет рекомендуется производить по первому предельному состоянию – по несущей способности.*

*Введем следующие обозначения:*

*$\sigma$ ,  $R$ ,  $M$  – соответственно напряжение, усилие, изгибающий момент в конструкции после ее усиления и догрузки;*

*$\sigma_s$ ,  $R_s$ ,  $M_s$  – соответственно напряжение, усилие, изгибающий момент в старом сечении конструкции перед усилением;*

*$\sigma_{доп}$ ,  $R_{доп}$ ,  $M_{доп}$  – соответственно напряжение, усилие, изгибающий момент от дополнительной нагрузки;*

*$F_s$ ,  $W_s$  – соответственно площадь поперечного сечения и момент сопротивления старом сечении конструкции перед усилением;*

*$F_{ус}$ ,  $W_{ус}$  – соответственно площадь добавляемого металла (усиления) и дополнительный момент сопротивления;*

*$W_{об}$  – общий момент сопротивления сечения после усиления;*

*$\gamma_s$  – коэффициент условий работы;*

*$R_y$  – расчетное сопротивление.*





За предельное состояние растянутого усиленного стержня можно принимать такое состояние, при котором напряжения, равные расчетному сопротивлению, будут по всему усиленному сечению.

Тогда  $\sigma = \frac{P_c + P_{дон}}{F_c + F_{yc}} \leq \gamma_c R_y$  отсюда

- 1)  $F_{yc} \geq \frac{P_c + P_{дон}}{\gamma_c R_y} - F_c$
- 2)  $P_{дон} \leq \gamma_c R_y (F_c + F_{yc}) - P_c$

При изгибе  $\frac{M_c + M_{дон}}{W_{об}} \leq \gamma_c R_y$  отсюда

- 3)  $W_{об} \geq \frac{M_c + M_{дон}}{\gamma_c R_y}$
- 4)  $M_{дон} \leq \gamma_c R_y W_{об} - M_c$

Расчет по формулам 1 и 2, учитывающим равномерное распределение напряжений по сечению, при растяжении и по формулам 3 и 4 при изгибе дает более экономичный подбор элементов усиления и достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Расчет сжатых стержней производится по формуле

5)  $\frac{P_c + P_{дон}}{(F_c + F_{yc}) \varphi_{об}} \leq \gamma_c R_y$ , где  $\varphi_{об}$  – коэффициент продольного изгиба усиленного стержня.

Отсюда

6)  $P_{дон} \leq \gamma_c R_y (F_c + F_{yc}) \varphi_{об} - P_c$

В формулах 5 и 6 должно соблюдаться следующее условие:  $P_c \leq 0,8 \gamma_c R_y F_c \varphi_{об}$

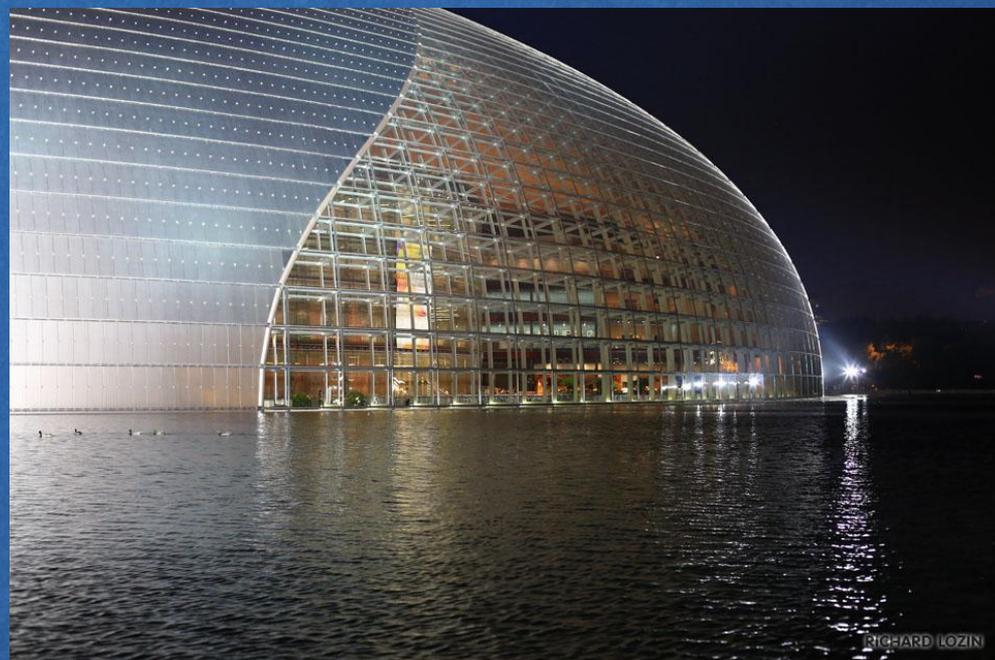
Соблюдение этого необходимо потому, что в момент приварки усиливающих элементов получается неравномерный разогрев основного стержня.



## 9. ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБСЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД НАГРУЗКОЙ.

*Сооружения (конструкции), в которых предполагается производить усиление и регулирование напряжений, должны быть предварительно осмотрены в натуре и выполнен их проверочных расчет.*

*В результате перерасчета может оказаться, что в силу имеющихся больших запасов прочности или недоучета других факторов, улучшающих работу конструкций и идущих в запас прочности, отпадает необходимость в регулировании напряжений или, наоборот, возникает необходимость еще и в дополнительном усилении отдельных элементов конструкции или их прикреплении. Кроме осмотра конструкций и их перерасчета следует лабораторным путем определить механические характеристики материала, из которого выполнена конструкция, и, если конструкции старые, то проверить материал на свариваемость. При проверочном расчете предварительно напряженных конструкций необходимо опытным путем определить усилие не только по величине, но и по знаку, поскольку в предварительно напряженных конструкциях не всегда справедливо обычное представление о сжатых или растянутых стержнях, из классической теории сооружений.*





*Особое значение при регулировании напряжений в предварительно напряженных конструкциях придается выявлению действительной величины предварительного напряжения в конструкции, находящейся под нагрузкой.*

*Не всегда бывает известно не только степень предварительного напряжения, полученная конструкцией при ее изготовлении, но и последовательность выполнения монтажа.*

*При обследовании конструкции в натуре в отдельных случаях целесообразно испытать их пробной нагрузкой.*

*Если временная нагрузка мала, по сравнению с постоянной, и не может вызвать больших дополнительных напряжений и деформаций, испытание пробной нагрузкой не проводят. Для определения в каком-либо элементе конструкции или части сооружения фактических напряжений применяют различные методы.*





## 9.1 Магнитометрический метод определения напряжений.

*В настоящее время для оценки напряженного состояния арматуры в ж/б конструкциях разработан магнитометрический способ, который может быть использован и в м/к.*

*Этот метод позволяет определять напряжения в существующих конструкциях без их разрушения (высверливания, выпиливания).*

*Сущность метода заключается в следующем.*

*Магнитные свойства металла меняются в зависимости от степени его напряженного состояния. Одна магнитная головка аппаратуры устанавливается на исследуемый напряженный элемент конструкции, а вторая на эталонный образец. Затем эталонный образец растягивается до тех пор пока показания от первой и второй головок не будут одинаковыми. Зная растягивающую силу эталонного образца и площадь его поперечного сечения. Можно вычислить напряжение в эталонном образце, а следовательно и в исследуемом элементе конструкции.*





*Выполнила  
студентка группы 13-С-УС1  
Овчинникова Екатерина Витальевна*