

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Владимирский государственный университет  
Кафедра строительных конструкций

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВИСЯЧИХ ПОКРЫТИЙ  
С ПРИМЕРАМИ РАСЧЕТА

Составители:  
В.В. МИХАЙЛОВ  
М.С. СЕРГЕЕВ

Владимир 2010

УДК 692.47.725.4

ББК 38.54

М 54

Рецензент

Кандидат технических наук, профессор  
кафедры строительных конструкций  
Владимирского государственного университета  
*В. И. Воронов*

Печатается по решению редакционного совета  
Владимирского государственного университета

**Методические указания по проектированию висячих по-**  
крытий с примерами расчета / Владим. гос. ун-т ; сост.: В.В.  
Михайлов, М.С. Сергеев. – Владимир: Изд-во Владимир. гос.  
ун-та, 2010. – 102 с.

Приведены общие сведения о висячих покрытиях, даны примеры расчета и элементы конструирования.

Предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения четвертого и пятого курсов специальностей 270102 – промышленное и гражданское строительство, 270105 – городское строительство и хозяйство.

Табл. 3. Ил. 46. Библиогр.: 19 назв.

УДК 692.47.725.4

ББК 38.54

## Введение

Идея и первое применение висячих конструкций для покрытия зданий принадлежит В. Г. Шухову, который в 1896 г. на Всероссийской выставке в Нижнем Новгороде построил четыре павильона: два – размером в плане  $30 \times 70$  м, один  $50 \times 100$  м и один круглый – диаметром 68 м.

Покрытие их было выполнено из тонких перекрещивающихся стальных стержней и полос. Конструктивное решение оказалось весьма простым и удобным в монтаже – покрытие круглого павильона было осуществлено всего за 10 дней небольшим числом рабочих.

Однако позже эти прогрессивные конструкции были разобраны, а идеи В. Г. Шухова забыты, и только в 1950 г. польский архитектор М. Навицкий создал оригинальную конструкцию покрытия спортивного зала размером в плане  $97 \times 92$  м, который через два года был построен в США. Опорный контур представлял собой две наклонные арки.

В 1963 гг. в Германии было возведено висячее покрытие на эллиптическом плане, при этом опорное кольцо было изогнуто в вертикальной плоскости.

В 80-е гг. XX в. в СССР был построен целый ряд висячих покрытий над спортивными сооружениями: диаметр покрытия универсального олимпийского стадиона (г. Москва) – 224 м; перекрытия гаража в Красноярске – 78 м; покрытия рынка в Бауманском районе Москвы – 80 м; покрытия универсального спортзала в Ленинграде – 160 м. Также были возведены покрытие велотрека в Крылатском на овальном плане размером  $165 \times 138$  м; шатровое покрытие гаража диаметром 206 м в Усть-Илимске и др.

Висячие покрытия в последние годы нашли широкое применение в спортивных и выставочных сооружениях, гаражах, крытых рынках, некоторых производственных зданиях.

# 1. Основные положения проектирования висячих покрытий

## 1.1. Характеристика висячих покрытий

Висячими называют покрытия, в которых главная несущая пролетная конструкция (нить) работает на растяжение. Усилие, возникающее в нити, именуют тяжением нити, а горизонтальную составляющую – распором.

Преимущество висячих покрытий в том, что работа нитей – несущих конструкций на – растяжение позволяет эффективно использовать их материал, поскольку их несущая способность определяется прочностью, а не устойчивостью, поэтому экономически целесообразно применение высокопрочных сталей.

Последнее ведет к уменьшению собственного веса несущих конструкций, что особенно эффективно для перекрытия больших пролетов. Это подтверждается практикой мостостроения, существуют висячие мосты пролётом 1000 м и более.

Для висячих покрытий характерны:

- большое разнообразие архитектурных форм, что позволяет применять их для зданий различного назначения;
- транспортабельность элементов и почти полное отсутствие вспомогательных подмостей;
- малый собственный вес несущей конструкции и повышенная деформативность делают ее сейсмостойкой.

Специфическая особенность (или недостаток) висячих покрытий – их высокая деформативность. Дополнительные провисы (прогибы) гибкой нити определяются двумя причинами:

- упругими удлинениями нити при ее нагружении (рис. 1.1, *a*);
- кинематическими перемещениями, поскольку конфигурация (очертание) нити меняется с изменением положения поперечной нагрузки (рис. 1.1, *б, в*).

Поэтому появляется необходимость применения специальных мер по сохранению формы (стабилизации нити).

Висячие системы – системы распорные, поэтому для восприятия распора необходима специальная конструкция, способная воспринимать эти горизонтальные силы (распор).

Стоимость опорной конструкции составляет значительную часть общей стоимости. Наиболее целесообразны покрытия круглой или овальной формы плана, когда внешний опорный контур работает преимущественно на сжатие и изготавливается из железобетона. Еди-

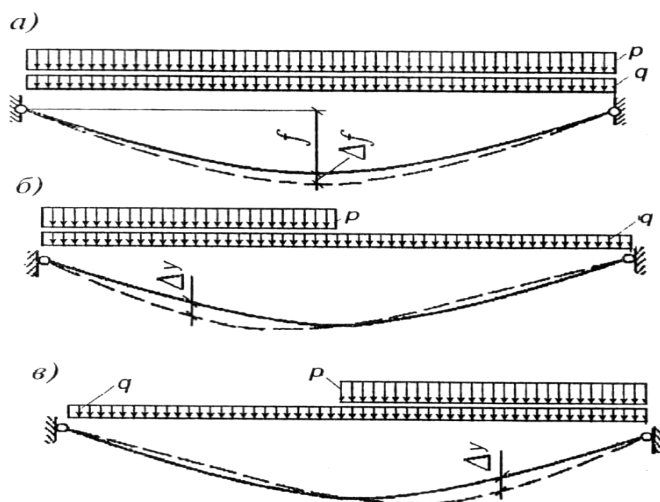


Рис.1.1. Дополнительные провесы гибкой нити: а – вызванные упругими удлинениями; б, в – то же, кинематическими перемещениями

ная классификация висячих покрытий еще не сложилась, но В.В. Горев, выделяет пять основных групп [3]:

-однопоясные системы (рис. 1.2, а), представляющие параллельно или радикально расположенные нити, по которым уложены ограждающие конструкции. Последние должны быть достаточно тяжелыми для того, чтобы доли локальной снеговой нагрузки и ветрового откоса были малы по сравнению с постоянной нагрузкой и не сильно влияли на кинематические перемещения. Обычно это железобетонные плиты. Для дополнительной стабилизации плиты до замоноличивания швов могут быть пригружены временной монтажной нагрузкой, которая после набора бетоном прочности снимается. Это позволяет превратить систему в предварительно сжатую железобетонную оболочку. Аналогичный результат можно получить при использовании для замоноличивания швов расширяющего цемента. Другой вариант стабилизации покрытий на основе однопоясных систем – применение нитей конечной жесткости, выполненных из прокатных профилей в виде сплошностенчатых либо сквозных конструкций (рис. 1.2);

- в двухпоясных системах висячих покрытий (рис. 1.2, б) стабилизацию осуществляют путем введения дополнительной нити, которая через подвески (распорки) или решетку догружает несущую нить;

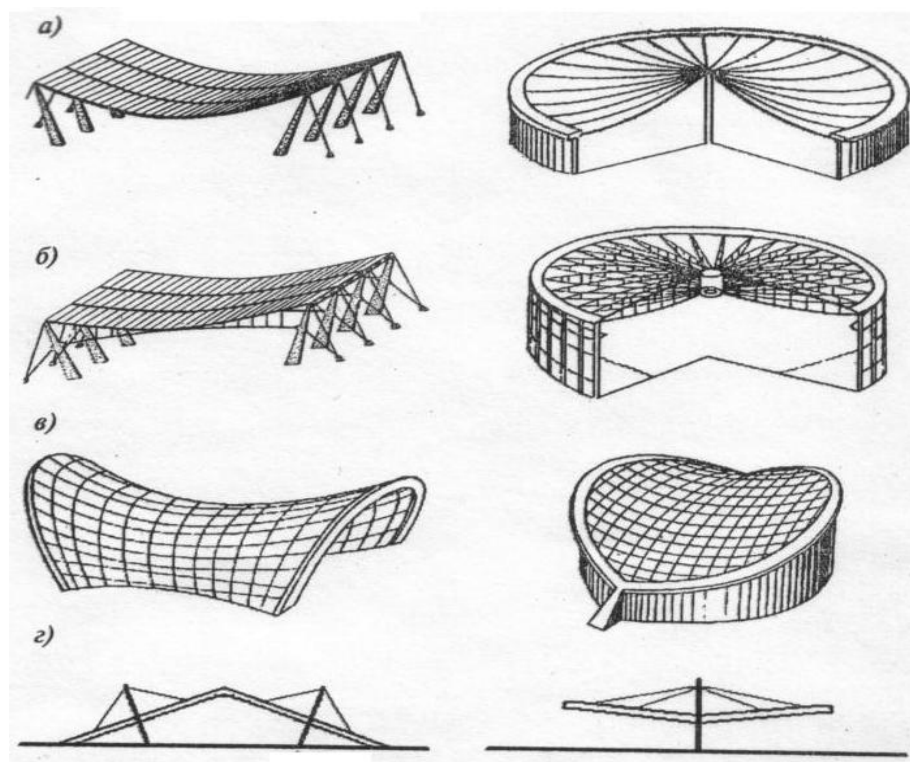


Рис. 1.2. Системы висячих покрытий: а – однопоясные; б – двухпоясные; в – перекрёстные; г – комбинированные

- в перекрестных системах висячих покрытий (рис. 1.2, в) стабилизирующие нити располагают перпендикулярно или под углом к несущим. Форма поверхности перекрестных систем – обычно гиперболический параболоид (гипара);

- мембранные покрытия, выполненные из листовой стали (вместо канатов), являются несущей и ограждающей конструкциями;

- комбинированные вантовые (висячие покрытия) очень разнообразны (рис. 1.2, г). Их особенность – наличие жесткой конструкции, поддерживаемой вантами.

К недостаткам висячих покрытий относят относительную сложность водоотвода.

*Основные термины висячих покрытий.*

Нить – гибкий провисающий стержень, работающий на растяжение и несущий поперечную нагрузку в пролете;

Гибкая нить – нить с нулевой изгибной жесткостью, испытывающая только растяжение;

Жесткая нить – нить конечной изгибной жесткости, работающая в основном на растяжение, но способная воспринимать относительно небольшие изгибающие моменты;

Струна – гибкий практически непровисающий стержень, работающий на растяжение и несущий поперечную нагрузку в пролете;

Ванта – прямолинейный или провисающий стержень, работающий на растяжение и не несущий поперечной нагрузки в пролете;

Канат – гибкий стержень из тонких стальных проволок, объединенных в систему путем свивки, прошивки, склеивания;

Трос – разновидность каната, в котором проволоки свиты в пряди, а они – в канат.

В висячих покрытиях распор передают на опорные конструкции, конструктивное решение которых существенно влияет на технико-эксплуатационные показатели (ТЭП) здания в целом (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Схема усилий, передаваемых на опорный контур: 1 – нить; H – распор; V – вертикальная составляющая; T – усилие нити

## 1.2. Опорные конструкции покрытий

Опорные конструкции служат для размещения анкерных креплений нитей (канатов, стержней), восприятия растягивающих усилий в нитях и передачи их на основание здания. Опорный контур проектируется жестким для ограничения деформаций висячей системы.

Для круглых и эллиптических в плане зданий наружное опорное кольцо воспринимает распор в пределах покрытия, при этом мы имеем внутренне уравновешенную систему с передачей на фундаменты только вертикальных усилий (рис. 1.4).

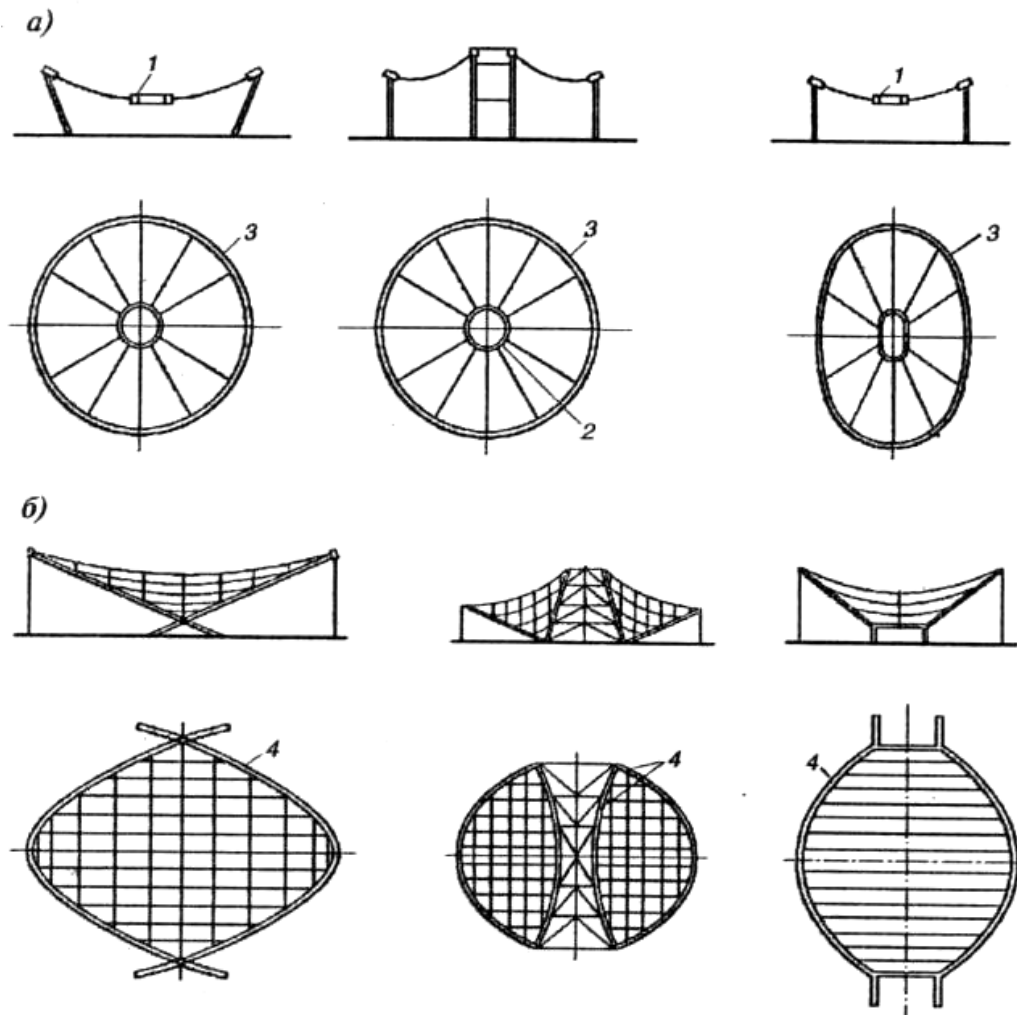


Рис. 1.4. Схемы круглых и арочных опорных конструкций: а – круглых; б – арочных; 1 – внутреннее кольцо; 2 – то же, опорное; 3 – наружное опорное кольцо; 4 – опорные арки



В перекрестных висячих покрытиях применяют опорный контур в виде двух арок (рис. 1.4, б), вес которых уравнивает распор несущих нитей. Арки работают на сжатие.

При прямоугольном плане здания распор может передаваться на фундаменты сжатыми стойками с помощью балок в плоскости покрытия на торцевые диафрагмы в виде стен или контрфорсов. Используются и другие решения (рис. 1.5).

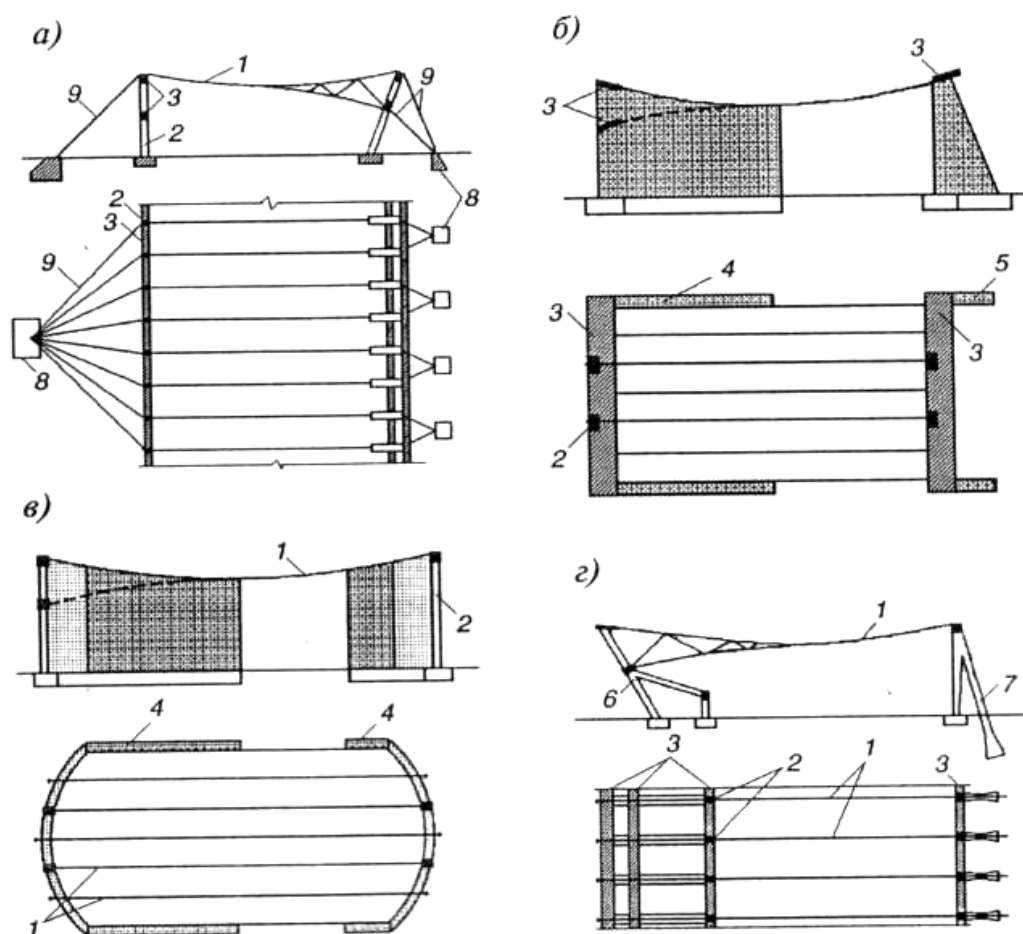


Рис. 1.5. Опорные конструкции: а – с передачей распора на оттяжки; б – то же, на торцевые диафрагмы; в – то же, на криволинейные стены; г – то же, на рамы в плоскостях тросов; 1 – тросы (тросовые фермы); 2 – колонны; 3 – жёсткие балки; 4 – торцевые диафрагмы; 5 – контрфорсы; 6 – поперечные рамы; 7 – растянутые подкосы; 8 – анкерные фундаменты; 9 – оттяжки

Безызгибная работа при опорном контуре в форме квадрата, шестиугольника (рис. 1.6, а, б) может быть обеспечена передачей распора в углы опорного контура. Иногда применяют дополнительную конструкцию – подбор, закрепленный в углах (рис. 1.6, в).

Подбор выполняется из тросов, полосовой или профильной стали и работает на растяжение от усилий распора.

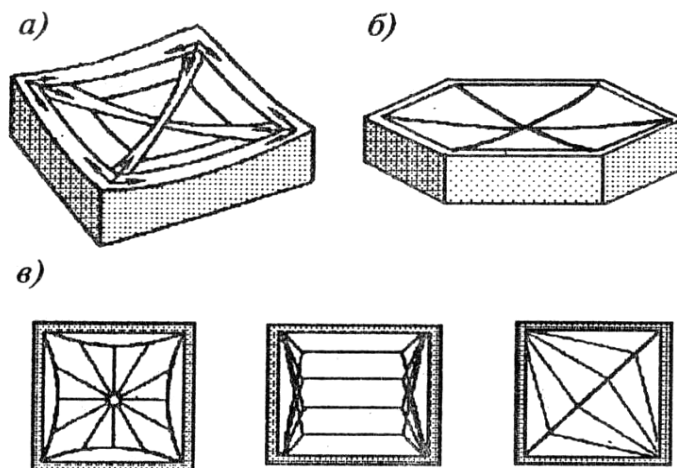


Рис. 1.6. Безызгибные опорные контуры: а – квадратный; б – шестиугольный; в – с тросами-подборами

### 1.3. Материалы

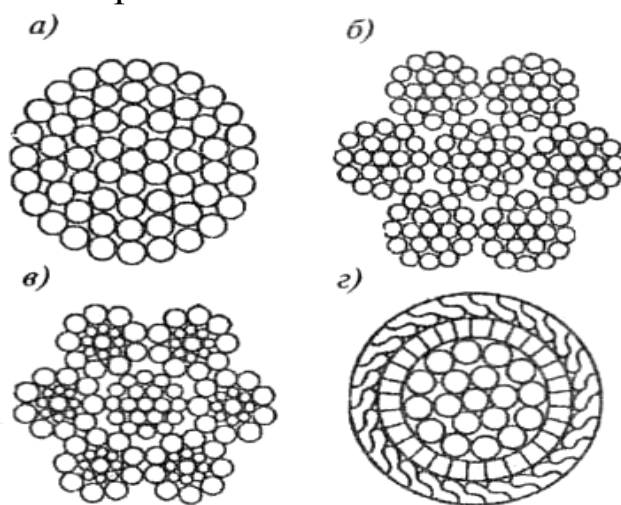
Гибкие нити всяких покрытий обычно выполняют из канатов, а при малых пролетах иногда используют круглую сталь. Жесткие нити проектируют из фасонного проката, а для мембран применяют тонколистовой прокат (3 – 6 мм). Канаты бывают витые и невитые из высокопрочной проволоки (светлой или оцинкованной) диаметром более 1,5 мм, по соображениям антикоррозионной стойкости – и до 6 мм.

При изготовлении витых канатов на центральный сердечник из стали или других материалов по спирали наматывают первый слой проволоки, затем второй и последующие слои. Направление свивки в соседних слоях может сохраняться, образуя при одинаковом шаге свивки по всем слоям линейное касание проволок (ЛК), или меняться на противоположное (либо иметь разный шаг свивки по слоям) с точечным касанием проволок (ТК), возможны

различные комбинации с точечным и линейным касаниями (ТЛК), в том числе при разных диаметрах проволок (ТЛК-РО).

Образованное в результате такой свивки изделие может поставляться в форме готовой продукции (спиральный канат), либо использоваться в качестве пряжи для последующей свивки. Из прядей путем последовательной намотки слоев могут быть изготовлены канаты тросовой конструкции (двойной свивки) или стренги для их дальнейшей свивки в канаты кабельтовой конструкции (тройной свивки).

Спиральные канаты могут быть открытого, закрытого и полужакрытого типов. Открытые канаты состоят из круглых проволок. Закрытые канаты имеют наружный слой из Z-образных проволок, которые образуют плотную поверхность, защищая внутренние слои от коррозии. Наружный слой полужакрытых канатов выполняют из чередующихся X-образных и круглых проволок. На рис. 1.7 показаны поперечные сечения витых канатов.



*Рис. 1.7. Виды стальных канатов тросовой конструкции: а – спиральный; б – семипрядный ТК 7×19; в – то же, ТЛК-РО; з – спиральный закрытый*

Невитые канаты представляют собой группы параллельно уложенных многослойных прядей ТК или проволок диаметром 2...8 мм, а также канатов закрытой либо открытой конструкций. Соединение проволок (прядей) между собой осуществляют не-

прерывной спиральной обмоткой (рис. 1.8, а), с помощью муфт или сжимов (рис. 1.8, б), путем склеивания их пластифицированными полимерными композициями (рис. 1.8, в, г).

Для строительных конструкций следует применять, как правило, стальные канаты со стальными сердечниками и с повышенным шагом свивки.

Для спиральных канатов кратность свивки принимают до 16, для канатов двойной свивки – до 14. Увеличение кратности свивки производится по соглашению с заводом-поставщиком. Основные характеристики канатов и арматурной стали для висячих покрытий приведены в табл. П1.

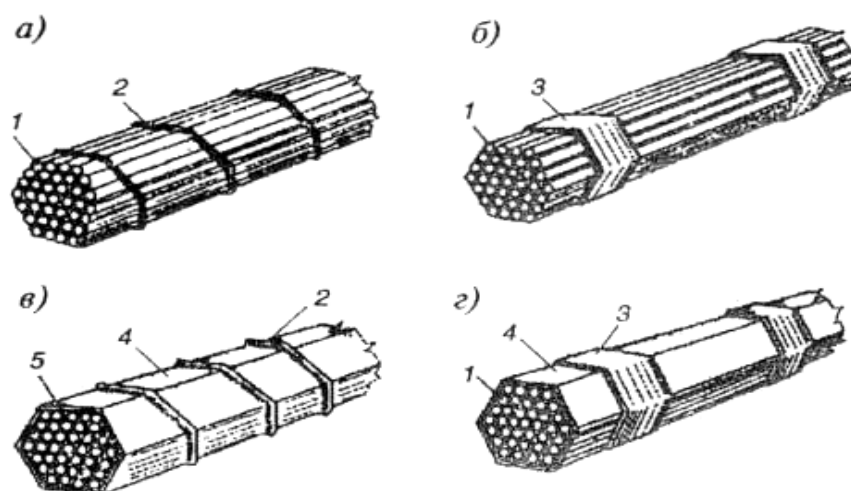


Рис. 1.8. Виды невитых проволочных канатов: а – со специальной обмоткой; б – с помощью муфт; в – с помощью сжимов; г – склеивание; 1 – стальные высокопрочные проволоки; 2 – напряжённая спиральная навивка из мягкой проволоки; 3 – сжимы для муфты; 4 – защитное покрытие; 5 – склеивающий состав

Согласно норм проектирования [7] расчетное сопротивление высокопрочной стальной проволоки  $R_{dh}$  для пучков или прядей (канатов) следует определять по формуле

$$R_{dh} = 0,63R_{un}, \quad (1.1)$$

где  $R_{un}$  – временное сопротивление проволоки разрыву.

Значение расчетного усилия растяжения стального каната следует принимать равным значению разрывного усилия каната в целом, установленному государственными стандартами или техническими условиями на стальные канаты, деленному на коэффициент надежности  $\gamma_m = 1,6$ . При использовании табл. П1 можно определять расчетное сопротивление каната, применяя значение нормативных сопротивлений проволок (временных сопротивлений проволок каната разрыву), приведенных в примечании к таблице, с учетом коэффициента  $\kappa_p$ :

$$R = (\kappa_p R_{un}) / 1,6. \quad (1.2)$$

Модуль упругости поступающих с заводов витых канатов составляет  $(9...12) \cdot 10^3$  кН/см<sup>2</sup>, что значительно ниже, чем у прокатной стали. Это объясняется неплотностью структуры каната. Для повышения упругости канат до его установки в конструкцию подвергают предварительной вытяжке усилием, превышающим на 15 – 20 % расчетное усилие. Модуль упругости предварительно вытянутых канатов, а также подверженных после выдержки технологическим воздействиям (свертыванию в бухты или намотке на барабаны, длительному хранению, перегибам и т.п.), можно принимать в соответствии с таблицей 1 приложения. Модуль упругости канатов, не прошедших предварительной вытяжки, следует принимать равным 80 % от величины модулей, приведенных в таблице.

Концы канатов закрепляют в специальных анкерных устройствах, конструкции которых должны обеспечивать надежность заделки канатов и не снижать существенно их прочность.

Наиболее простыми анкерными устройствами являются петля с коушем и самозаклинивающийся зажим (рис. 1.9, а – г). Разрывное усилие каната с такими закреплениями понижается на 10 – 25 %, поэтому применять подобные конструкции не следует для ответственных зданий.

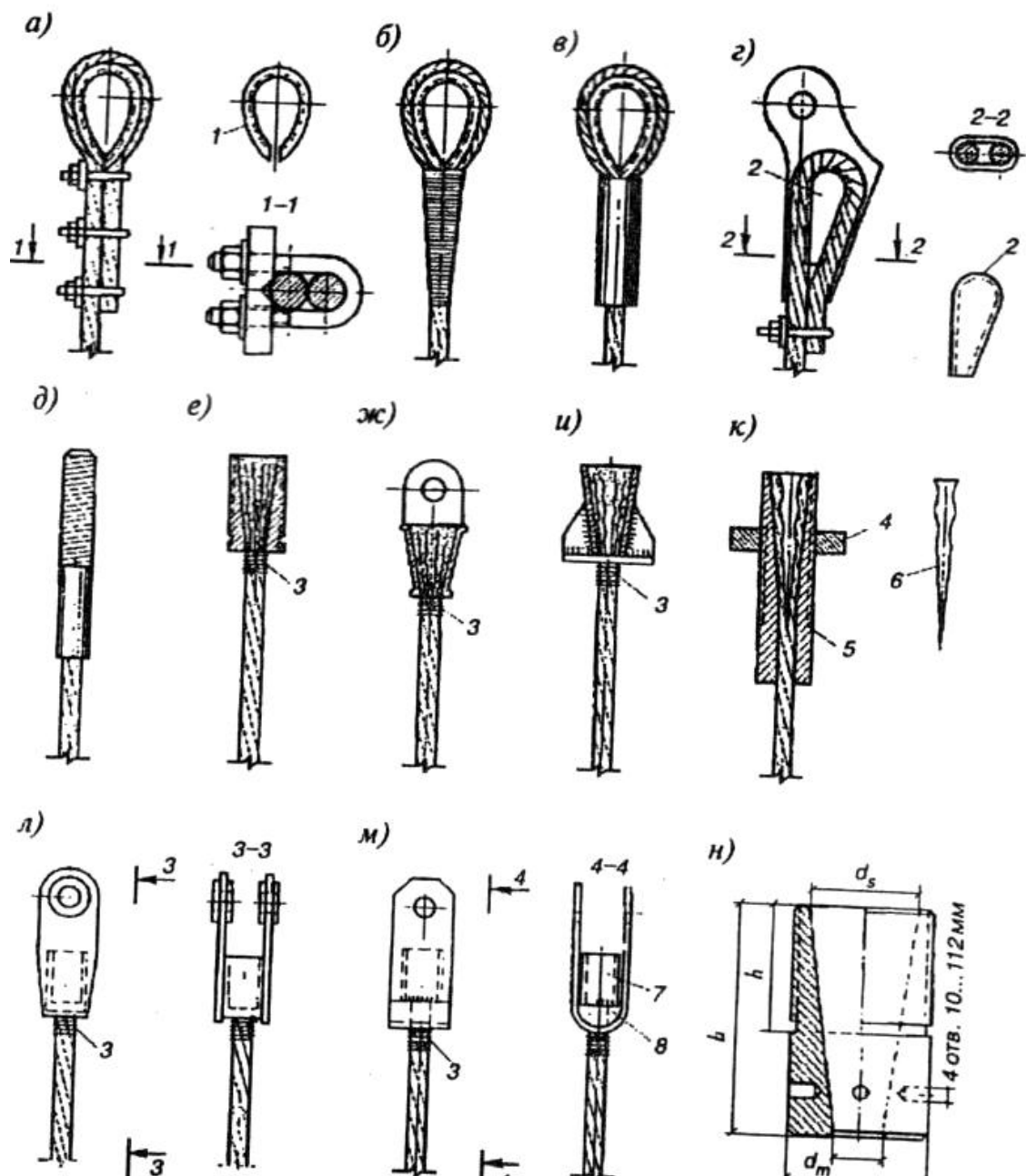


Рис. 1.9. Концевые крепления канатов тросовой конструкции: а – петля с коушем на зажимах; б – петля с вплетённым коушем; в – петля с коушем и запрессовкой; г – самозаклинивающийся зажим; д – запрессованная втулка; е – заливной натяжной стакан; ж – заливной шарнир; и – заливной упор; к – гильзоклиновой анкер; л – заливной стакан со сварной скобой; м – то же с гнутой; н – заливной стакан; 1 – коуш; 2 – подвижной клин; 3 – мягкая вязальная проволока; 4 – опорная гайка; 5 – гильза из мягкой стали; 6 – фасонный клин; 7 – круглый или квадратный стакан; 8 – гнутая скоба

В конструкциях анкера в виде дужки с планкой (рис. 1.9, *а*), петли с вплетенным коушем (рис. 1.9, *б*) место сплетки плотно обматывают мягкой вязальной проволокой диаметром 1...1,5 мм. Запрессовку конца каната с помощью стальных или алюминиевых трубок овального сечения (рис. 1.9, *в*) применяют для канатов диаметром до 20 мм с потерей прочности на 5...15 %. Самозаклинивающийся зажим (рис. 1.9, *з*) обеспечивает закрепление каната действующим в нем усилием. Корпус может быть литым или сварным. Основная ветвь каната должна располагаться на прямой части клина.

Концы канатов часто снабжают хвостиками для сопряжения с опорными конструкциями в виде гильз с запрессованными канатами (рис. 1.9, *д*) или стаканами, в которых расплетенные концы канатов залиты специальным сплавом (рис. 1.9, *е – и*). При статических нагрузках допускается применение гильзоклиновых анкеров (рис. 1.9, *к*), где сцепление с канатом обеспечивается за счет затекания между проволоками металла гильзы при ее обжатии.

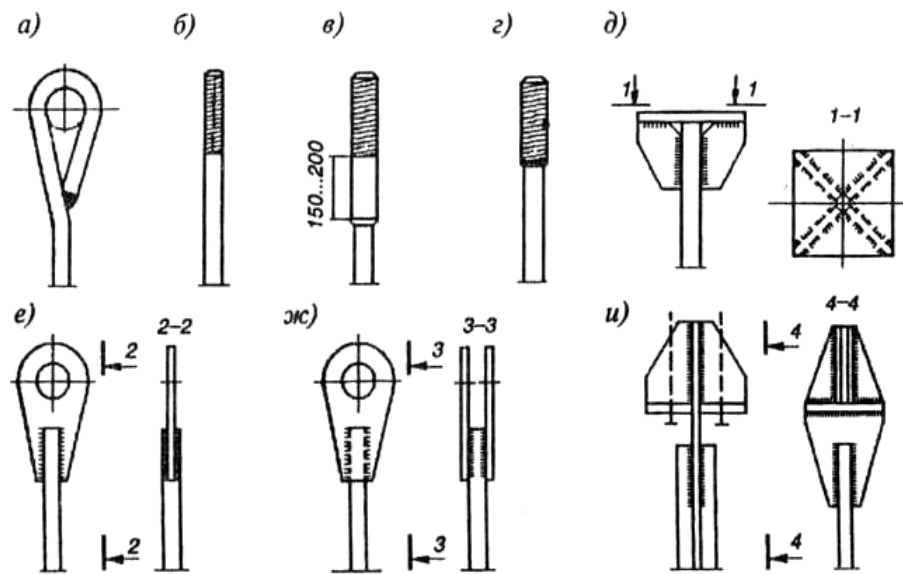
Универсальным креплением (для канатов всех типов) являются заливные стаканы (рис. 1.9, *н*). Размеры стакана можно определить приблизительно: длина стакана  $4,5 \dots 5 \text{ } \varnothing$  каната, наружный диаметр стакана  $3,5 \text{ } \varnothing$  каната, диаметр основания полости  $2 \text{ } \varnothing$  каната [16].

Для соединения каната с опорными конструкциями к стакану приваривают скобы или на поверхности круглого стакана нарезается метрическая резьба (рис. 1.9, *л, м*). Состав сплава и технология заливки даны в [3].

При использовании в качестве нитей стержневой арматуры возможно использование сварки; при диаметре до 16 мм допустимо применение петли (см. рис. 1.9, *а*).

Концевые крепления канатов из арматурных стержней бывают с петлей (рис. 1.10, *а*). Нарезной конец стержня (рис. 1.10, *б*) ослабляет его сечение, поэтому рекомендуется применять хвостовик большего диаметра (рис. 1.10, *в*), который приваривают контактной или ванной электросваркой. На конец стержня мож-

но плотно насадить муфту из обрезка трубы с резьбой и приварить ее по торцам (рис. 1.10, *з*).



*Рис. 1.10. Концевые крепления канатов из арматурных стержней: а – с петлёй; б – с нарезкой; в – с хвостовиком; г – со стальной муфтой; д – с упорной шайбой; е – с одиночной фасонкой; ж – со спаренными фасонками; и – в виде сварного башмака*

Упорную шайбу с ребрами жесткости (рис. 1.10, *д, и*) применяют для анкеровки стержней в бортовых элементах из монолитного железобетона. При шарнирном закреплении стержней используют одиночные или спаренные фасонки с отверстиями (рис. 1.10, *е, ж*). Длину швов для крепления фасонок определяют расчетом на прочность.

Для канатов из пучков высокопрочной проволоки наиболее характерны анкеры, показанные на рис. 1.11. В гильзостержневых анкерах (рис. 1.11, *а*) проволоку запрессовывают между гильзой из мягкой стали и закаленным стержнем с потерей прочности пучка на 15...25 %.

В анкерах типа «колодка с пробкой» (рис. 1.11, *б*) из мягкой стали делают колодку, а из закаленной – пробку. Возможна за-



ливка отогнутых концов проволоки высокопрочным мелкозернистым бетоном в стакане из трубы (рис. 1.11, в, г).

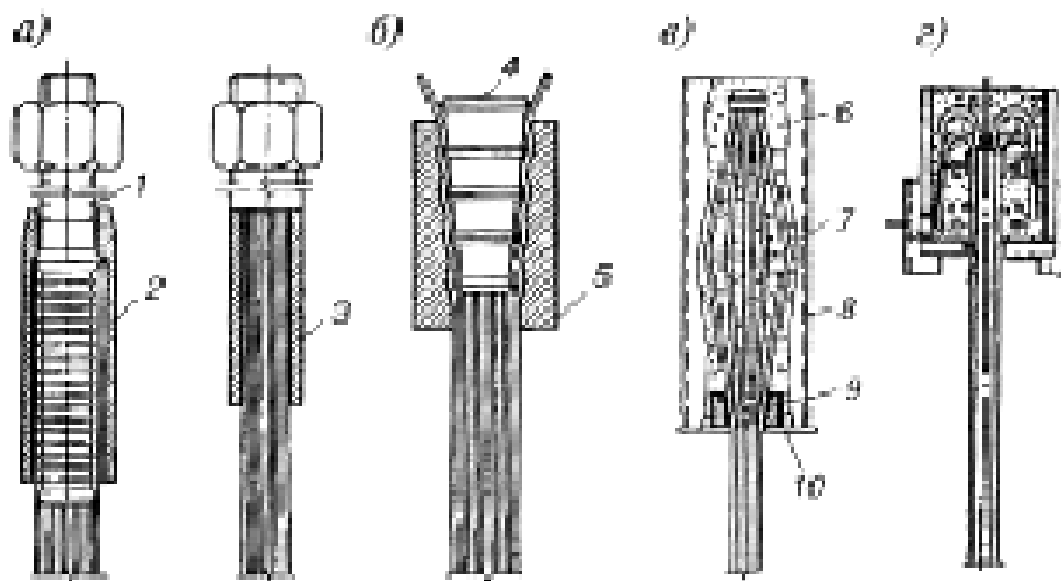


Рис. 1.11. Концевые крепления канатов из пучков высокопрочной проволоки: а – гильзостержневые анкеры; б – анкер типа «колодка с пробкой»; в, г – анкеры с заливкой бетоном; 1 – стержень из термоупрочнённой стали; 2 – обжимная гильза из мягкой стали; 3 – то же, с наружной резьбой; 4 – пробка из термоупрочнённой стали; 5 – колодка; 6 – мелкозернистый бетон; 7 – диафрагма-звёздочка; 8 – безшовная труба; 9 – стальное обжимное кольцо с коническим вкладышем; 10 – приваренное днище с отверстием

#### 1.4. Нагрузки на висячие покрытия

**Постоянные нагрузки:** собственный вес несущих и ограждающих конструкций покрытия; вес ограждающих конструкций (пароизоляции, утеплителя, выравнивающего слоя, гидроизоляционного ковра) принимают по фактическим весам составляющих элементов кровли. Вес несущих конструкций на первом этапе устанавливают ориентировочно, при этом можно использовать приведенные ниже рекомендации, если нет более точных данных.

Постоянные нагрузки обычно принимают равномерно распределенными по перекрытию.

В одноясных покрытиях с железобетонными плитами вес канатов составляет  $0,06 \dots 0,08 \text{ кН/м}^2$ , а вес железобетонных плит колеблется от  $0,8 \text{ кН/м}^2$  (для ребристых плит толщиной 2,5 см) до  $2 \text{ кН/м}^2$  (для монолитных плит толщиной 8 см). В покрытиях с жесткими нитями собственный вес нити составляет  $0,3 \dots 0,4 \text{ кН/м}^2$ . Вес щитов, поддерживающих кровлю, зависит от их конструкции. В мембранных покрытиях суммарный собственный вес оболочки и стабилизирующих конструкций составляет около  $0,4 \text{ кН/м}^2$  при толщине оболочки 4 мм и около  $0,6 \text{ кН/м}^2$  при толщине оболочки 6 мм. Для двухясных систем и седловидных сеток собственный вес нитей (без учета веса щитов) составляет  $0,05 \dots 0,12 \text{ кН/м}^2$ .

*Временные длительно действующие нагрузки:* вес подвесного потолка, вентиляционного и осветительного оборудования, смотровых площадок и т.п. Они составляют  $0,1 \dots 0,3 \text{ кН/м}^2$ .

*Кратковременные нагрузки.* Ветровую нагрузку вычисляют по общим правилам в соответствии с рекомендациями СНиП [2]. При этом аэродинамический коэффициент можно определить [3] по рис. 1.12.

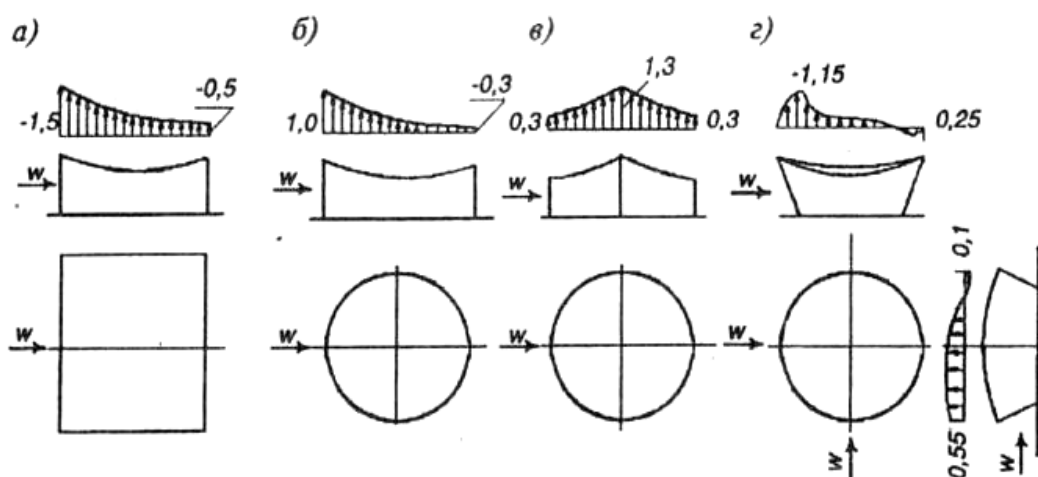


Рис. 1.12. Аэродинамический коэффициент при покрытиях:  
 а – цилиндрическом; б – чашеобразном (вогнутом); в – шатровом; г – в виде гипара

На подавляющей части поверхности большинства покрытий действует ветровой отсос, достигающий  $0,2 \dots 0,6 \text{ кН/м}^2$ . В легких покрытиях отсос ветра может привести к динамической неустойчивости вплоть до полного вывертывания покрытия.

Поэтому необходимо предусмотреть стабилизирующие конструкции, догружающие нити до эквивалентной равномерно-распределенной нагрузки, превышающей ветровой отсос. Для покрытий, постоянная нагрузка которых составляет  $1,5 \dots 2 \text{ кН/м}^2$ , а края по всему покрытию закреплены, проверку на ветровую нагрузку можно не производить.

Снеговую нагрузку на покрытие также следует принимать по СНиП [2], рассматривая ее в виде равномерно распределенной по всему покрытию и в других вариантах распределения [3], показанных на рис. 1.13.

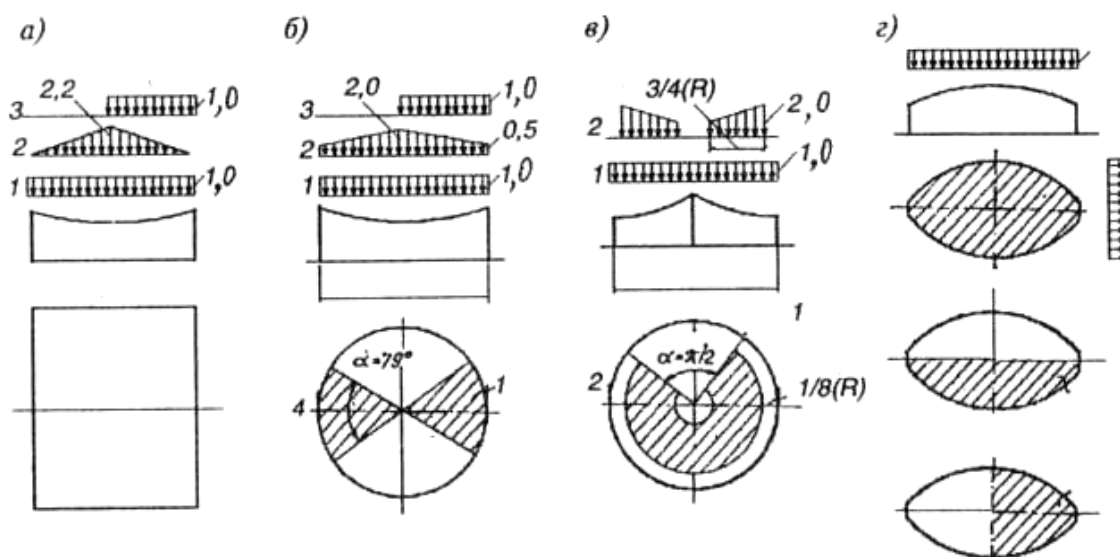


Рис. 1.13. Распределение снега по покрытию: а – цилиндрическому; б – чашеобразному (вогнутому); в – шатровому; з – в виде гиря; 1 – 4 - варианты загрузжений

### 1.5. Основы теории полой гибкой нити

Гибкие нити висячих покрытий, как правило, проектируют со стрелками провисания  $1/10 \dots 1/30$  от пролета. Такие нити назы-

вают пологими. Они принимают нагрузку, распределенную не по длине, а по пролету [5].

Расчетная схема нити показана на рис. 1.14. Нормальную силу  $T$  называют натяжением, а его горизонтальную составляющую  $H$  – распором. Вертикальные составляющие тяжения на опорах можно определить из уравнений равновесия, приравнивая к нулю моменты в опорных шарнирах. Прделав это, можно убедиться, что вертикальные составляющие равны реакциям в простой балке, загруженной той же, что и нить, нагрузкой, поэтому их называют балочными реакциями.

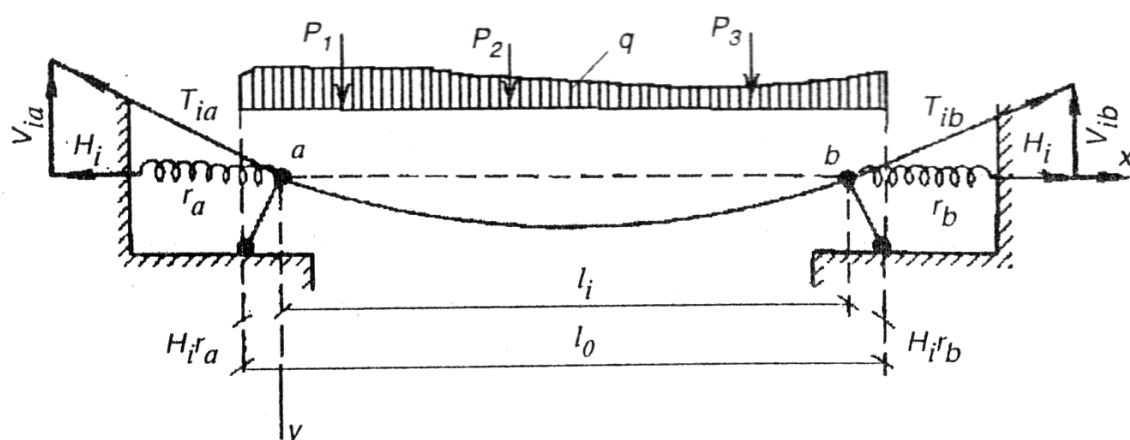


Рис. 1.14. Расчётная схема нити

При записи выражения для изгибающего момента в произвольной точке нити  $S$  можно заметить, что этот момент отличается от балочного момента  $M(x)$  наличием дополнительного члена  $H y(x)$ .

Поскольку нить не способна работать на изгиб, изгибающий момент в любой точке нити равен нулю, поэтому

$$M(x) - H y(x) = 0;$$

или

$$H = \frac{M(x)}{y(x)} \quad y(x) = \frac{M(x)}{H}. \quad (1.3)$$

Особенность расчета гибкой нити состоит в том, что для определения тяжения нити  $T$  нужно знать стрелку провеса  $f$ . Необ-

ходимо связать два состояния нити: исходное (монтажное) и расчетное, поскольку её удлинение соответственно увеличит и стрелу провеса. Следовательно, заготовка (длина нити) должна учитывать эти изменения, чтобы под нагрузкой нить работала согласно расчету [13].

Согласно В. В. Гореву [3], чтобы реализовать исходную (принятую) стрелку провеса  $f$ , длина заготовки нити при равномерно-распределенной нагрузке

$$L = l_0 \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f_0}{l_0} \right)^2 - \frac{H_0}{EA} \right], \quad (1.4)$$

где  $l_0$  – расчетный пролет нити;  $f_0$  – принятая стрелка провеса;  $H_0$  – распор нити;  $E$  – модуль упругости нити;  $A$  – площадь сечения нити.

Вторая особенность расчета нитей – для того чтобы не допустить повреждений ограждающих конструкций (кровли), ограничивают перемещения ( $\Delta f$ ) от временной нагрузки;  $\Delta f$  – стрелка предельного провеса неомоноличенного покрытия от временной нагрузки, которую принимают равной  $(1/200 \dots 1/300)l$  при последующем омоноличивании швов.

Возможна и обратная задача: площадь нити определяют, приняв предельное значение  $\Delta f(1/200 \dots 1/300)l$ .

Данные об обобщенном состоянии нити с учетом деформаций контура, изменении температуры воздуха получены В.К. Качуриным [4].

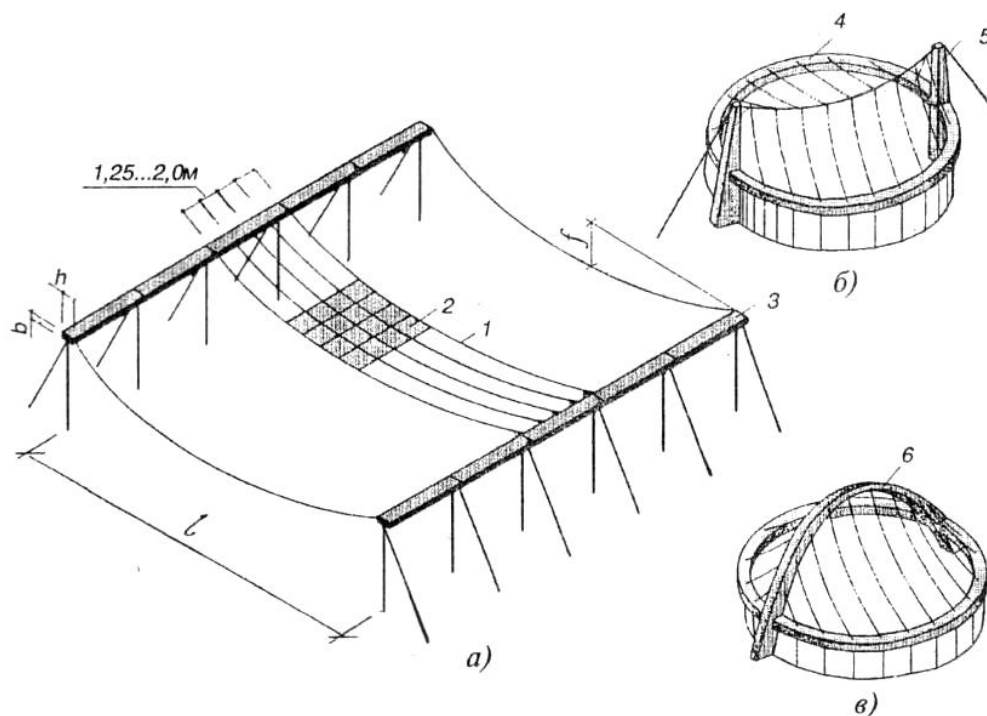
## **2. Однопоясные системы висячих перекрытий с параллельными нитями**

### **2.1. Общая характеристика**

Данную систему, как правило, принимают для зданий прямоугольных в плане (рис. 2.1, а), но принимают и решения типа на рис. 2.1, б, в.

При прямоугольном плане улучшаются эксплуатационные условия, достигается простота конструктивного решения, имеется возможность вести строительство в несколько очередей [6].

Несущие нити располагают с шагом 1,5...3 м и крепят к железобетонным бортовым балкам.



*Рис. 2.1. Схемы однопоясных систем с параллельными нитями: а – на прямоугольном в плане; б, в – на круглом плане; 1 – несущие нити; 2 – плиты кровли; 3 – балки опорного контура; 4 – опорное кольцо; 5 – пилон; 6 – арка*

Для восприятия распора эти балки развивают в горизонтальной плоскости, иногда их устраивают наклонно, так, чтобы балки были развиты в плоскости касательных к нитям. По нитям укладывают железобетонные или другие достаточно тяжелые плиты, и замоноличивают швы. В результате покрытие превращается в висячую оболочку.

Для уменьшения деформативности покрытия, главным образом с целью предупреждения повреждений ограждающих конструкций, в том числе разрывов гидроизоляционного ковра, ис-

пользуют тяжелые плиты кровли или (и) осуществляют предварительное обжатие бетона. Оно препятствует также раскрытию трещин, поэтому должно быть назначено с расчетом сохранения небольшого сжатия в оболочке после растяжения нитей под действием постоянной и максимальной временной нагрузок с учетом усадки ползучести бетона.

В настоящее время используют четыре способа предварительного напряжения висячих оболочек.

После монтажа плит осуществляют временный пригруз покрытия балластом, вес которого имитирует собственный вес утеплителя с кровлей и вес снега, увеличенный на 10 – 30 % для компенсации усадки и ползучести бетона, а также для предотвращения образования трещин.

Этот балласт можно укладывать непосредственно на плиты или подвешивать к нитям на платформах. После замоноличивания стыков (рис. 2.2, *а*) и набора бетоном прочности пригруз удаляют. Вытянутые нити будут стремиться к своим первоначальным размерам, но бетон, препятствуя этому, окажется предварительно напряженным. В стадии действия полной снеговой нагрузки в нитях реализуются монтажные условия пригрузом, однако при существенно меньших перемещениях.

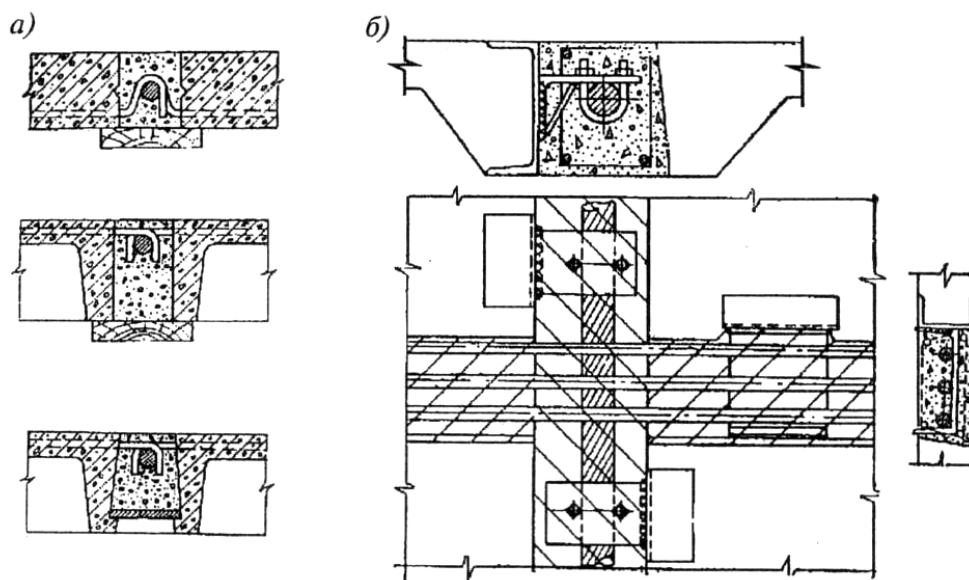
После монтажа плит замоноличивают швы, перпендикулярные к направлению нитей, а когда бетон наберет необходимую прочность, осуществляют натяжение нитей домкратами и замоноличивают оставшиеся швы (рис. 2.2, *б*). Натяжение нитей приходится производить в несколько приемов, так как происходит уменьшение натяжения очередной нити за счет обжатия бетона.

Замоноличивание швов между плитами выполняют непрерывным бетонированием с помощью расширяющегося бетона на напрягающем цементе (НЦ-40) после укладки всех плит.

По опалубке, подвешенной к нитям, укладывают монолитный бетон на напрягающем цементе (НЦ-20). Бетонируют полосами на весь пролет с оставлением швов, которые после окончания бетонирования одновременно заливают бетоном.

Существуют другие, менее распространенные способы бетонирования.

Провисание нитей назначают по архитектурным, конструктивным и экономическим соображениям в пределах  $1/10 \dots 1/30$  пролета  $l$ .



*Рис. 2.2. Сопряжение железобетонных плит с канатами:  
а – при напряжении пригрузом; б – то же, домкратами*

С уменьшением стрелок увеличивается жесткость покрытия и снижается бесполезный объем здания, но сильно возрастают усилия в вантах и опорном контуре, что приводит к увеличению расхода материалов на строительство здания. Оптимальные стрелки можно установить в каждом конкретном случае на основе вариантного проектирования, которое обычно производят по приближенным формулам компоновочных расчетов. Если не планируется такое проектирование с четкими прогнозами, то можно назначить стрелку провисания в середине пролета для нити в виде каната  $(1/15 \dots 1/20)l$ , для нитей из проката –  $(1/20 \dots 1/30)l$ . Эти отношения получены из условия равенства упругих прогибов в середине пролета и кинематических перемещений в четверти при загрузении половины пролета [9].



Балки опорного контура выполняют из железобетона, реже из стали. Высоту поперечного сечения балок принимают  $h = 1/8 \dots 1/12$  их пролета  $l_b$ , ширину —  $b \approx 1/15 l_b$  для железобетонных и  $b \approx 1/30 l_b$  — для стальных балок. К железобетонным балкам нити крепят через закладные детали или пропускают сквозь наклонные трубки, диаметр которых назначают; можно предусмотреть конические отверстия, расширяющиеся с внутренней стороны бортового элемента (рис. 2.3). Для защиты от коррозии полости внутри трубок и отверстий должны быть заделаны битумом или другим герметиком. Стальные балки в местах крепления нитей следует укреплять ребрами жесткости.

Водовод с покрытия (приблизительно с уклоном 2 %) осуществляют к торцам здания. Этого достигают путем изменения стрелок провеса нитей или наклона бортовых элементов при постоянных стрелках.

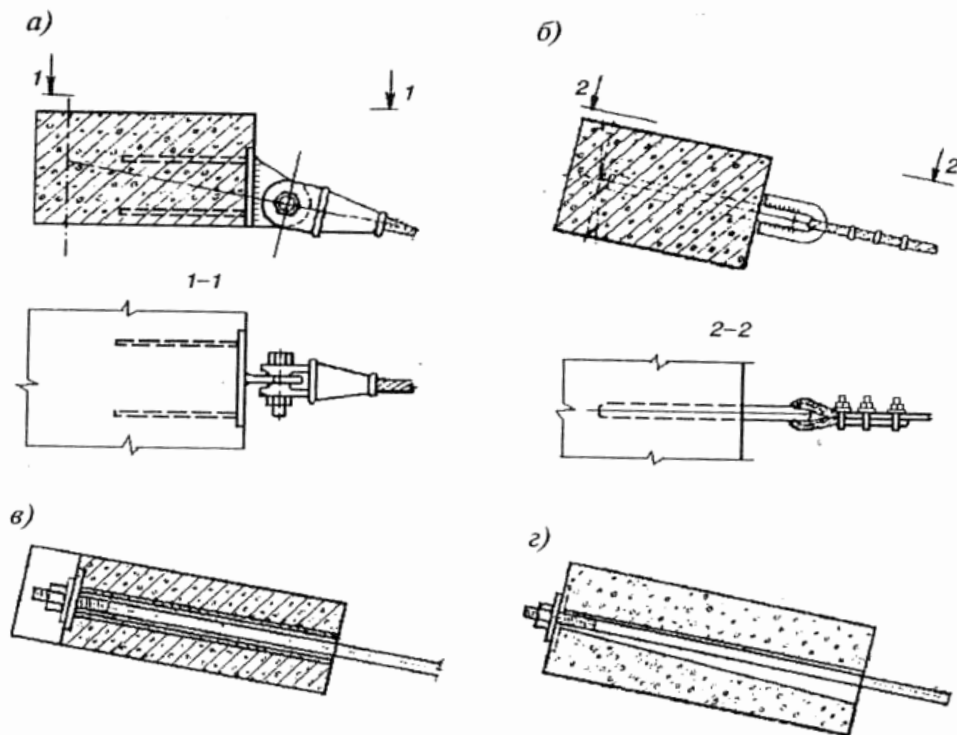


Рис. 2.3. Сопряжение нитей с опорным контуром: а, б — с помощью закладных деталей; в — то же, закладных трубок; г — то же, конических отверстий

Оттяжки крепят к анкерным фундаментам (рис. 2.4).

Плитные фундаменты (рис. 2.4, а) и открытые конические оболочки (рис. 2.4, б) воспринимают усилия от оттяжек за счет массы насыпного грунта. Винтовые сваи (рис. 2.4, в) имеют стальной пустотелый или железобетонный ствол и башмак с винтовой лопастью размером 0,4...1,2 м. Такие сваи закручивают в грунт специальной установкой, способной погружать их на глубину до 8 м, с наклоном до  $45^{\circ}$ . Бурунабивные сваи (рис. 2.4, г) различных типов изготавливают непосредственно на строительной площадке.

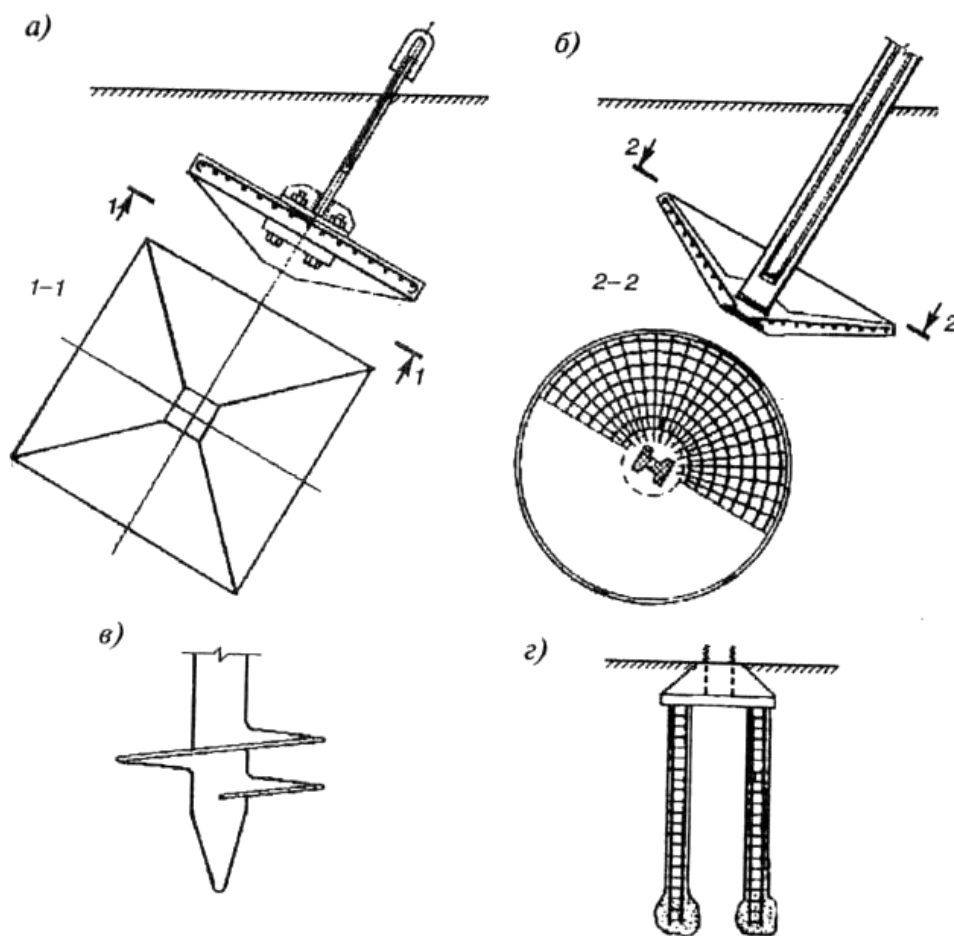


Рис. 2.4. Анкерные фундаменты: а – плитный фундамент; б – открытая коническая оболочка; в – винтовая свая; г – набивные сваи

## 2.2. Расчет системы с параллельными нитями

Последовательность расчета предполагает, что при возведении покрытия использован пригруз (балласт), который после замоноличивания стыков и достижения бетоном требуемой прочности, удаляется.

Определите нормативные и расчетные значения постоянной  $g$  нагрузки ( $g_n, g$ ) и временной (снеговой)  $p_n, p$  нагрузок на  $1\text{ м}^2$ .

Назначьте вес пригруза в пределах  $(0,1 \dots 0,3) p$ . При этом постоянная нормативная нагрузка должна быть не ниже максимального ветрового откоса  $g^H \geq W_b^{\max}$ .

Вычислите расчетную линейную нагрузку на нить:

$$q = [g + (1,1 \dots 1,3)p]a \text{ (рис. 2.5, где } a \text{ – шаг нитей).}$$

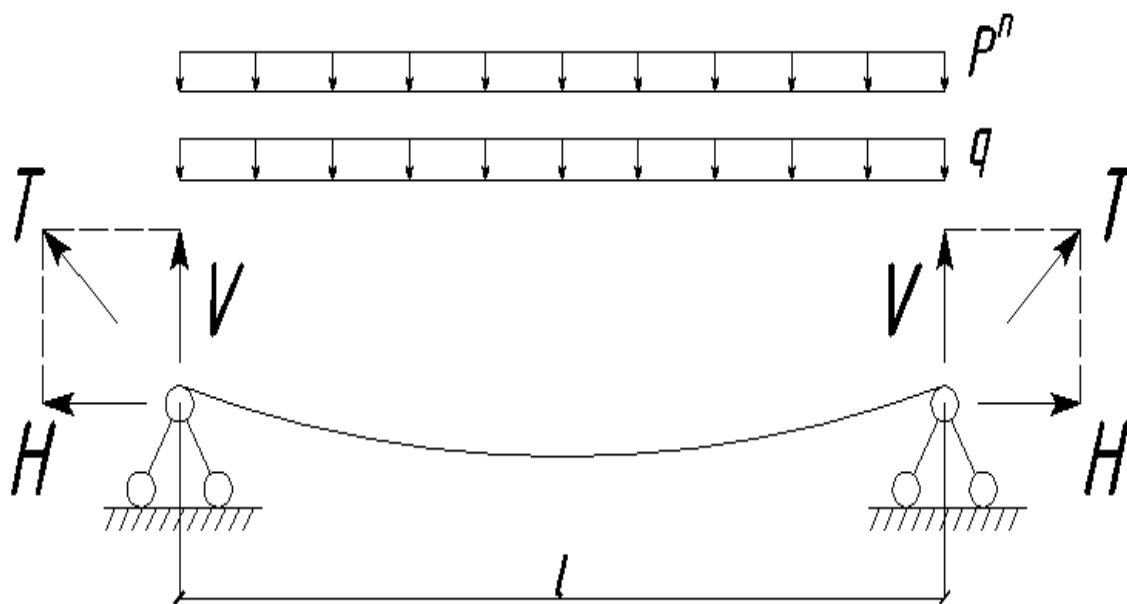


Рис. 2.5. Расчётная схема нити висячего покрытия:  
 $p^n$  – для расчёта прогиба;  $q$  – для расчёта прочности

Задайтесь стрелкой провисания в середине пролетов для нити из каната –  $(1/15 \dots 1/20)l$ , для нити из проката –  $(1/20 \dots 1/30)l$ .

Определите распор  $H$ , балочную реакцию  $V$  и тяжение нити  $T$ :

$$H = ql^2 / 8f; \quad V = 0,5ql; \quad T = \sqrt{H^2 + V^2}. \quad (2.1)$$

Требуемая площадь поперечного сечения нити  $A = T / R_y \gamma_c$ , где  $R_y$  – расчетное сопротивление каната или стали арматурного стержня (см. П. 1.3), каната; стержень или прокат подбираются по сортаменту (табл. П1 – П3) [13].

Определите длину исходной заготовки нити, чтобы обеспечить при действии расчетных нагрузок принятое значение стрелы провеса ( $f$ ):

$$L = l \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{t}{l} \right)^2 \right] - \frac{H}{EA}, \quad (2.2)$$

где  $t$  – толщина заготовки.

Проверьте деформативность покрытия, определив приращение стрелки провеса при действии нормативной снеговой нагрузки:

$$\Delta f = \frac{3}{128} \cdot \frac{m^e p_n l^4}{EA f^2}; \quad \Delta f \leq \frac{1}{200} l. \quad (2.3)$$

где  $m$  – безмерный коэффициент.

### *Обратная задача*

Требуемое сечение нити из условия обеспечения требуемой деформативности  $\Delta f \leq 1/200l$ , тогда площадь арматуры

$$A^{mp} = \frac{3}{128} \frac{m^2 p_n l^4}{E \Delta f f^2};$$
$$m = 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f}{l} \right)^2, \quad (2.4)$$

где  $\Delta f$  – стрелка предельного допустимого дополнительного провеса.

Затем проверяется прочность нити:

$$\frac{(g+p)l^2}{8fA} \left( 1 + \frac{8f^2}{l^2} \right) \leq R_y \gamma_c, \quad (2.5)$$

где  $A$  – принятое сечение нити;  $g$  и  $p$  – расчетные постоянная и временная нагрузки на 1 м пролета нити (погонная нагрузка),  $\gamma_c$  – коэффициент условия работы.

### Пример 1

Пролет здания 65 м (рис. 2.6), шаг рам 12 м. Плиты покрытия приняты железобетонные с приведенной толщиной 5 см. Нагрузки сведены в табл. 1.

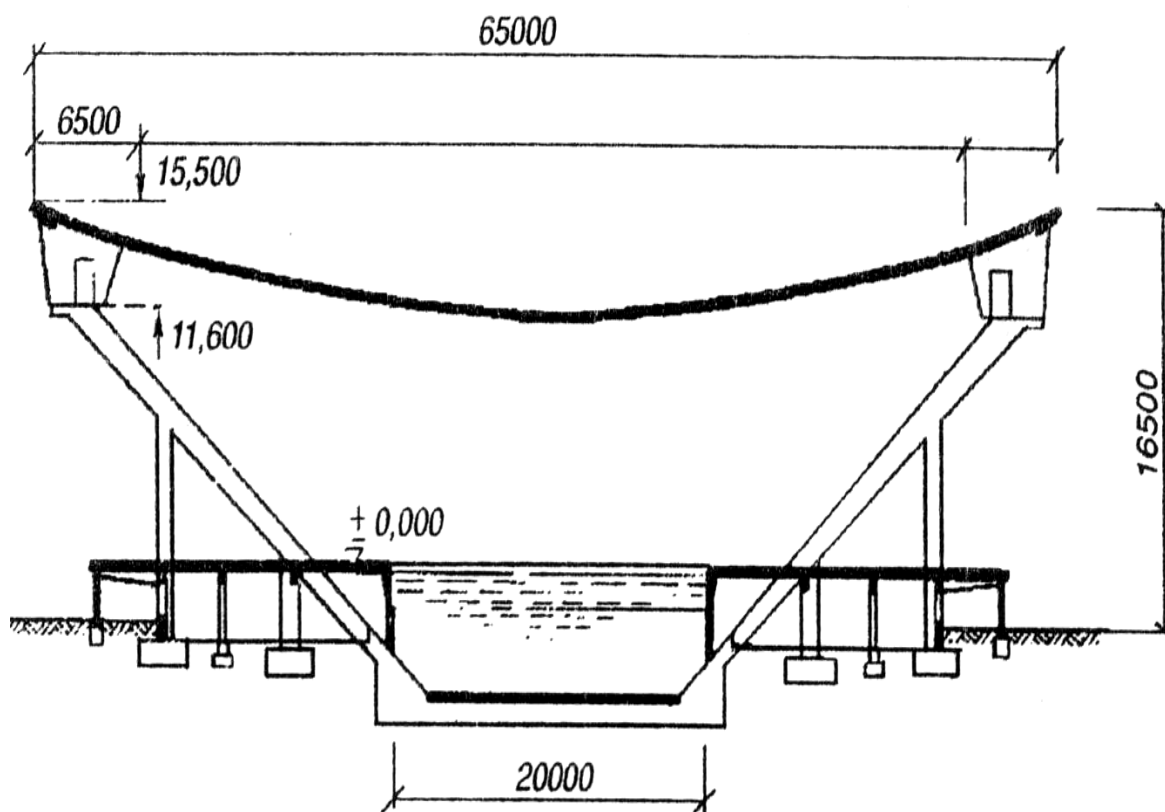


Рис. 2.6. Разрез плавательного бассейна

## 1. Подсчет нагрузки.

Таблица 1

| Состав покрытия   | Нормативная нагрузка, кН/м <sup>2</sup> | Коэффициент надежности по нагрузке | Расчетная нагрузка, кН/м <sup>2</sup> |
|---|---|------------------------------------|---------------------------------------|
| <i>Постоянная нагрузка</i>  |   |                                    |                                       |
| Гидроизоляция (трехслойный рулонный ковер)  | 0,10                                    | 1,3                                | 0,13                                  |
| Цементная стяжка 2 см, плотность 1800 кг/м <sup>3</sup><br>(1·1·0,02·1800·10 <sup>-3</sup> ·9,81=<br>=0,35кН/м <sup>2</sup> ) | 0,35                                    | 1,3                                | 0,46                                  |
| Теплоизоляция (пенобетон толщиной 15 см, плотностью 500 кг/м <sup>3</sup> )   | 0,74                                    | 1,2                                | 0,89                                  |
| Пароизоляция (один слой рубероида)  | 0,04                                    | 1,3                                | 0,89                                  |
| Сборные железобетонные плиты (приведенная толщина 5 см, плотность 2500 кг/м <sup>3</sup> )                                    | 1,23                                    | 1,1                                | 1,35                                  |
| Заливка швов бетона   | 0,2                                     | 1,1                                | 0,22                                  |
| Стальные канаты (предварительно)  | 0,1                                     | 1,1                                | 0,11                                  |
| Итого   | 2,76                                    |                                    | 3,21                                  |
| <i>Временная нагрузка</i>   |   |                                    |                                       |
| Снеговая нагрузка   | 1,0                                     | 1,4                                | 1,4                                   |

Вес пригруза принят  $1,2p = 1,2 \cdot 1,4$ .

Постоянная нагрузка  $g_p = 2,7 \cdot 6$  кН/м<sup>2</sup> больше максимального отсоса 2,0 кН/м<sup>2</sup>, следовательно, проверка покрытия на ветер не требуется.

Расчетная линейная нагрузка

$$q = [g + 1,2p]a = (3,21 + 1,2 \cdot 1,4) \cdot 1,5 = 7,335 \text{ кН/м.}$$

2. Заданная стрелка провеса в середине пролета:

$$f = 1/20l = 65/20 = 3,25 \text{ м.}$$

3. Определяем  $H$ ,  $V$  и  $T$ :

$$H = ql^2 / 8f = \frac{7,335 \cdot 65^2}{8 \cdot 3,25} = 1192 \text{ кН};$$

$$V = 0,5ql = 0,5 \cdot 7,335 \cdot 65 = 238,4 \text{ кН};$$

$$T = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{1192^2 + 238,4^2} = 1215,5 \text{ кН}.$$

4. Сечение нити. Принимаем канат ЛК-РО с временным сопротивлением проволок (см. табл. П1) разрыву  $176,4 \text{ кН/см}^2$ ,  $k_p = 0,75$ ; коэффициент надежности  $1,6$ .

Требуемая площадь нити

$$A = T / k_p R_{un} / 1,6 = 1215,6 / (0,75 \cdot 176,4) = 14,7 \text{ см}^2,$$

где  $R_{un}$  – расчетное сопротивление.

Принят канат ЛК-РО конструкции  $6 \times 36 \text{ } \emptyset 57 \text{ мм}$ , фактическая площадь  $A = 15,207 \text{ см}^2$ ,  $E = 14 \cdot 10^3 \text{ кН/см}^2$  (см. табл П1).

5. Длина исходной заготовки:

$$L = l \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f}{l} \right)^2 - \frac{H}{EA} \right] = 65 \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{3,25}{65} \right)^2 - \frac{1192}{14 \cdot 10^3 \cdot 15,207} \right] = 65,07 \text{ м}.$$

6. Проверка деформативности покрытия:

$$\Delta f = \frac{3}{128} \cdot \frac{1,006463^2}{14 \cdot 10^3 \cdot 15,207 \cdot 3,25^2} = 0,283 < \frac{65}{200} = 0,325 \text{ м}.$$

Для обеспечения работы бортовых балок в одной плоскости (без учета вертикальной нагрузки от собственного веса) балки устанавливаем наклонно (рис. 2.7), при этом угол наклона плоскости наибольшей жесткости балки

$$\cos \varphi = H / T = 1192 / 1215,6 = 0,9806;$$

$$\varphi = 11^\circ 19'.$$

Расчетная погонная нагрузка на бортовую нагрузку от тяжения канатов  $q_b = T / a = 1215,6 / 1,5 = 810,4 \text{ кН/м}$ .

Определяются усилия в вертикальной плоскости собственного веса, пренебрегая наклоном.

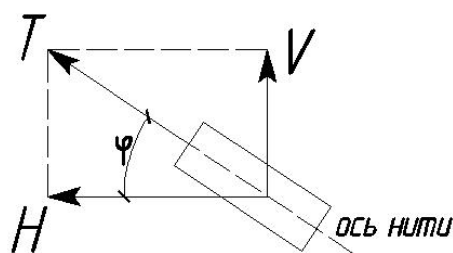


Рис. 2.7. Схема наклона опорной балки:  $\varphi$  – угол;  $H$  – распор;  $V$  – вертикальная составляющая;  $T$  – усилие нити

Расчет балок и армирование выполняется по общим правилам.

### Обратная задача

1. Определяем сечение нити из условия ограничения деформативности покрытия:

$$\Delta f = 1/200l = 65/200 = 0,325 \text{ м.}$$

Требуемое сечение нити при  $f = \frac{1}{20}l = 3,25 \text{ м}$ . Тогда

$$R_k = k_p R_{un} / 1,6 = 0,75 \cdot 174,6 / 1,6 = 81,84 \text{ кН/см}^2 ;$$

$$m = 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f}{l} \right)^2 = 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{3,25}{6,5} \right)^2 = 1,006463 ;$$

$$A^{mp} = \frac{3}{128} \frac{1,006463^2 \cdot 1,5 \cdot 65^4}{1,4 \cdot 10^3 \cdot 0,325 \cdot 3,25^2} = 13,98 \text{ см}^2.$$

Проверка прочности принятого каната ЛК-РО с  $A = 15,207 \text{ см}^2$  производится

по формуле: 
$$\sigma = \frac{(g + p)l^2}{8fA} \left( 1 + \frac{8f^2}{l^2} \right) \leq R_y \gamma_c ;$$

$$\sigma = \frac{7,335 \cdot 65^2 \cdot 10^2}{8 \cdot 3,25 \cdot 15,207} \left( 1 + \frac{8 \cdot 3,25^2}{65^2} \right) = 78,38 \cdot 1,02 = 79,94 \text{ кН/см}^2$$
$$< R_k = 81,84 \text{ кН/см}^2.$$

Условие прочности удовлетворяется. Далее переходят к пп. 5 – 6.

### Пример 2

Здание прямоугольное в плане, по назначению производственное с подвесными кранами. Система – с параллельными нитями и балкой жесткости. Наибольший распор  $H = 5822 \text{ кН}$ .

Передача распора на внешний фундамент – в виде коробчатой железобетонной балки с засыпкой пустотных объемов грунтом. Анкерные балки неразрезные; шаг оттяжек 12 м.

Поперечные сечения балки принимаем 6 м и заглублением 12 м.



Размеры балки определяем из условия  $F \leq \gamma_n G \cos \beta$ , где  $F$  – выдерживающая сила;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по нагрузке;  $\gamma_n=0,9$ ;  $G$  – вес балки и грунта;  $\beta$  – угол между оттяжкой и вертикалью.

Усилие  $F = H / \cos(90 - \beta) = H / \sin \beta$ ; при  $\beta = 30^0$ ;  $\sin \beta = 0,5$ .

Осредненный вес железобетона и грунта  $\gamma_{cp} = 20 \text{ кН/см}^3$ .

Предварительный вертикальный размер анкерной балки:

$$F \leq \gamma_n l_{\delta} l_{\phi} \gamma_{cp}; \quad h_{\phi} = F / 0,9 \cdot 12 \cdot 6 \cdot 20 = 5,2 \text{ м},$$

где  $l_{\delta}$  – длина балки на 1 оттяжку.

Принимаем толщину стенок фундаментной балки 1м.

Проверим достаточность веса балки:

$$\gamma = 25 \text{ кН/м}^3;$$

$$\gamma_{cp} = 17 \text{ кН/м}^3;$$

$$G = 4 \cdot 4,2 \cdot 17 \cdot 12 + (6 \cdot 5,2 - 4 \cdot 4 \cdot 4,2) \cdot 12 \cdot 25 = 7747,2 \text{ кН};$$

$$F = 5822,2 < 0,9 \cdot 7747,2 = 6038,2 \text{ кН}.$$

Условие устойчивости выполняется. Оттяжки приняты из широкополочных двутавров 40 К ( $A = 443 \text{ см}^2$ ).

### 3. Одноярусные системы с радиальными нитями

#### 3.1. Типы покрытий

Системы с радиальными нитями применяют в зданиях круглых, реже эллиптических в плане. Для крепления нитей предусматривают наружное и внутреннее опорные кольца. По нитям, расположенным по радиусам на одинаковых расстояниях, укладывают трапециевидные железобетонные плиты, в дальнейшем замоноличиваемые. Расстояния между нитями по параметру покрытия определяют на основе вариантного проектирования и принимают его кратным шагу колонн, поддерживающих покрытие. По конструктивной форме покрытия с радикальными нитями

делят на вогнутые (рис. 3.1, а), шатровые (3.1, б) и спиральные (рис. 3.1, в, г).

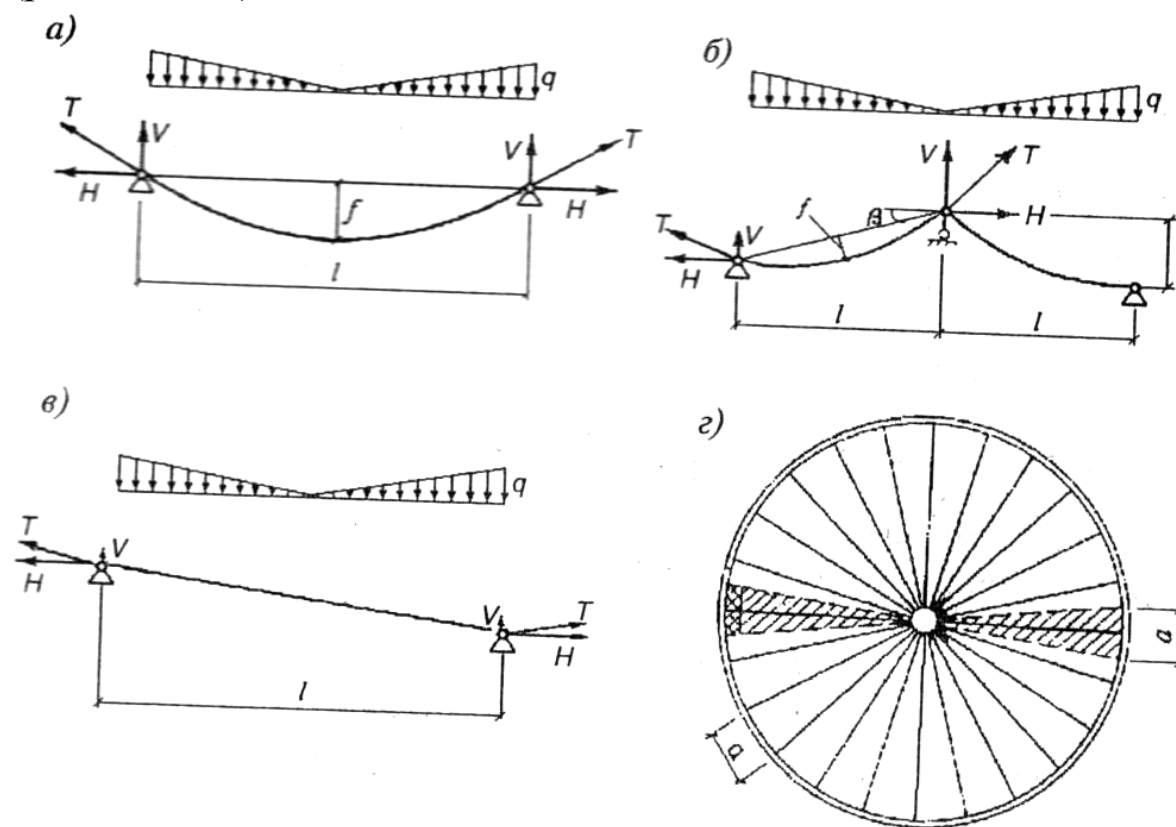


Рис. 3.1. Схемы радиальных покрытий: а – вогнутого; б – шатрового; в, г – спирального

В вогнутых покрытиях распор от нитей воспринимается кольцами, поэтому покрытие в целом является самоуравновешенной системой и на колонны передаются лишь вертикальные усилия от веса покрытия. Наружное кольцо в круглых зданиях при загрузке всего покрытия равномерной нагрузкой работает только на сжатие и его рационально делать из железобетона. Закрепление нитей в кольце осуществляют по схемам на рис. 2.3.

В эллиптических зданиях в кольце возникает изгиб; это существенно повышает его материалоемкость, что в сочетании с увеличением типоразмеров плит покрытия ограничивает применение таких зданий. Внутреннее кольцо работает на растяжение, его обычно выполняют из стали. Диаметр внутреннего кольца назначают из условия размещения конструкций крепления нитей. При

наличии фонаря размер внутреннего кольца может быть увеличен в соответствии со светотехническими и (или) аэрационными требованиями. Возможно устройство покрытия без внутреннего кольца, что достигается попарным расположением нитей вдоль хорд, равноудаленных от центра покрытия.

Недостаток вогнутых покрытий – трудность отведения атмосферных вод. Внутренний водоотвод через трубу, идущую от центра покрытия к наружным стенам, помимо конструктивных неудобств, загромождает внутреннее пространство и ухудшает интерьер. При наружном водоотводе нужно располагать покрытие наклонно или применять специальные надстройки с покато́й крышей, с которой вода стекает к периметру здания.

Эти надстройки иногда используют для вспомогательных помещений.

Наружный водоотвод может быть сооружен с помощью спиральных покрытий (см. рис. 3.1, в, г). Конструктивный недостаток: разомкнутое опорное кольцо испытывает изгиб и требует устройства мощных вставок или пилонов.

В шатровом покрытии внутреннее кольцо воспринимает не только горизонтальные силы от распора в нитях, но и передает на среднюю стойку всю или значительную часть вертикальной нагрузки от покрытия, иногда превышающую ее. Кольцо обычно опирают на центральную железобетонную опору в виде толстостенной трубы большего диаметра или на куст стоек, связанных по высоте ригелями.

Для организаций наружного водоотвода при шатровом покрытии назначают возвышение  $h$  внутреннего кольца над наружным так, чтобы выполнялось условие

$$h/l = \operatorname{tg}\beta \geq 16f/3l. \quad (3.1)$$

Если левая часть этого неравенства равна правой, то нити в местах примыкания к наружному кольцу будут расположены горизонтально, а на центральную стойку будет передана вся нагрузка от покрытия, иногда и превышающая ее. Более крутые перепады высот нерациональны. В этом случае в колоннах, поддерживающих наружное кольцо, возникнут растягивающие уси-

лия, сумма которых будет догружать внутреннюю стойку сверх полной нагрузки на покрытие. Это потребует не только применять более мощные опоры внутреннего кольца, но и предусмотреть специальные меры для предотвращения отрыва наружного кольца.

### 3.2. Конструкция и расчет опорных колец

Наружные кольца, сжатые распорами нитей, обычно делают железобетонными с прямоугольным поперечным сечением. Для крепления канатов предусматривают закладные детали или каналы (см. рис. 2.3). Мощные кольца для уменьшения их монтажного веса можно выполнить тонкостенными с последующим армированием и бетонированием (рис. 3.2, сеч. 1-1).

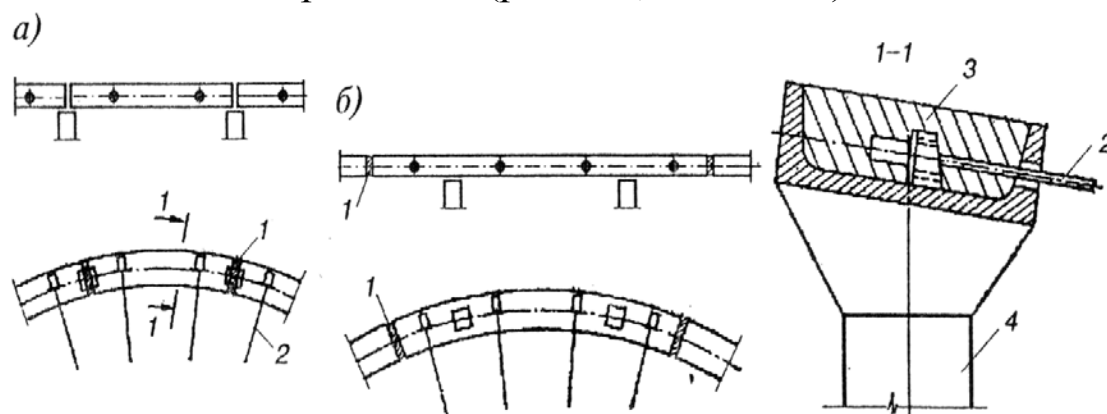


Рис. 3.2. Наружные железобетонные кольца: а – стыки колец на колоннах; б – то же, в пролёте; 1 – стыки; 2 – канаты; 3 – бетон замоноличивания; 4 – колонна

Длину сборного элемента кольца обычно назначают равной расстоянию между колоннами с устройством стыков над колоннами (рис. 3.2, а) или удвоенному расстоянию между колоннами с перенесением стыков в пролеты (рис. 3.2, б). Стыки колец нельзя совмещать с местами крепления канатов. Сечения наружных колец обычно принимают наклонными к горизонту под углом  $\beta = \arccos(V/H)$ , где  $V$  и  $H$  – вертикальная реакция и распор нитей.

Это позволяет ориентировать плоскость наибольшей жесткости кольца по направлению нитей и колонн [11].

Внутренние кольца, работающие на растяжение, делают стальными. В провисающих покрытиях можно использовать несложные сечения, например из трубы (рис. 3.3, а).

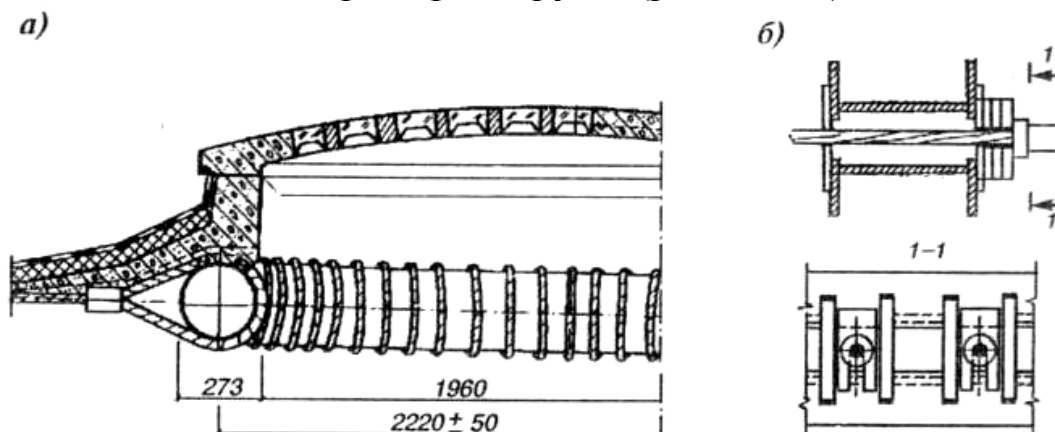


Рис. 3.3. Центральные кольца вогнутых покрытий: а – из трубы; б – сварное из листов

Если предусмотрено натяжение канатов домкратами со стороны внутреннего кольца, то следует предусмотреть устройства для фиксации анкера после натяжения. На рис. 3.3, б показан вариант фиксации анкерного стакана с помощью вилкообразных шайб. Меняя число таких шайб, можно регулировать длину каната при его натяжении домкратами во время предварительного напряжения покрытия.

Варианты конструктивного оформления внутренних колец шатровых покрытий приведены на рис. 3.4. Эти кольца, кроме распора, воспринимают и передают на среднюю опору покрытия вертикальные составляющие от тяжения канатов.

Для небольших покрытий можно принять кольцо открытого сечения с регулированием длины каната с помощью гаек. Для покрытий с большим числом мощных канатов кольцо имеет значительный диаметр, поэтому используют кольцо замкнутого сечения.

Опорные кольца в основном работают на осевое сжатие от распоров примыкающих нитей. Кроме этого, возможна работа на изгиб в горизонтальной плоскости (при несимметричном нагружении покрытия) и на изгиб в вертикальной плоскости от собственного веса и вертикальных составляющих усилий в нитях.

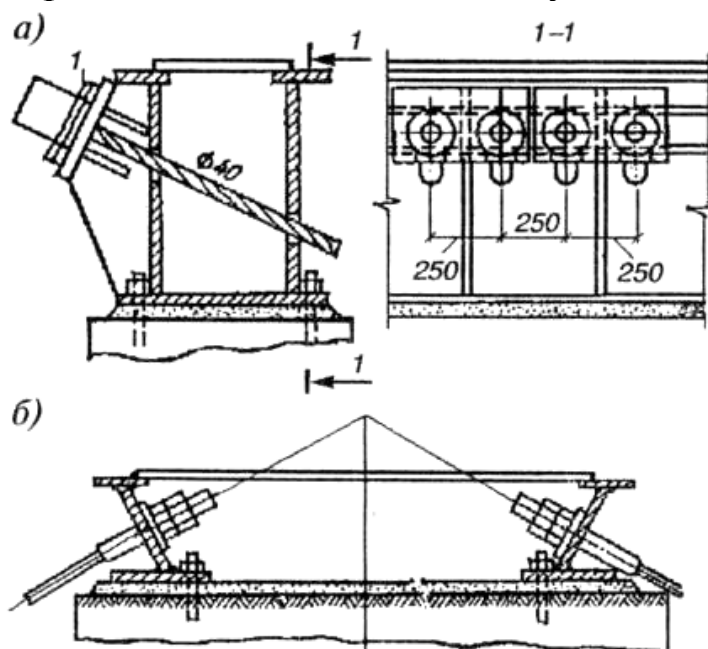


Рис. 3.4. Центральные кольца шатровых покрытий: а – коробчатого сечения; б – открытого сечения

При полном равномерном нагружении покрытия в центральном кольце и сжатия в наружном равны:

$$N = Hr/a,$$

где  $N$  – сжимающее усилие;  $H/a$  – равномерная нагрузка на кольцо;  $r$  – радиус соответствующего кольца;  $H$  – распор нити.

Размеры поперечного сечения опорного кольца предварительно назначают:  $h = (1/50 \dots 1/100)l$ ,  $b = (1/150 \dots 1/300)b$ , где  $h$  – высота сечения в плоскости кольца,  $b$  – ширина.

Сжатое железобетонное кольцо рассчитывают на прочность и на устойчивость согласно СНиП 2.03.01-84. Критическое усилие с учетом влияния нитей [15]:

$$N_{cr} = \left(2EI \cdot 100 / r^2\right) \cdot \left[1 + \sqrt{1 + cr^2 / (EI \cdot 100)}\right], \quad (3.2)$$

где  $EI$  – жесткость кольца в его плоскости, МПа·см<sup>4</sup>; для железобетонного кольца можно принять  $EI = 0,85E_b l h^3 / 12$ ;  $r$  – радиус кольца;  $C$  – упругая характеристика кольца  $c = N_k / \left[ \varepsilon + \frac{\mu^2 - 1}{\cos^2 \beta} \right]$ , где  $N_k$  – сжимающее усилие в кольце;  $\mu$  – коэффициент перехода от мегапаскалей ньютон на квадратный сантиметр,  $\mu = L/l$ ;  $\beta$  – угол наклона кольца.

### 3.3. Расчет вогнутых покрытий с радиальными нитями

В основном применяют покрытия с железобетонными плитами, которые до замоноличивания швов загружают балластом (пригрузом), а затем снимают.

Порядок расчета:

1. Определение нормативных и расчетных постоянных  $g$  и временной (снеговой)  $p$  нагрузок на 1 м<sup>2</sup> (в табличной форме).
2. Назначение пригруза в пределах  $0,1 \dots 0,3 p$ .
3. Постоянная нагрузка  $g_n$  должна быть больше или равна максимальному ветровому отсосу ( $1,5 \dots 2,0$  кН/м<sup>2</sup>).

Расчетная нагрузка на 1 м нити у наружного кольца с учетом пригруза равна (рис. 3.5)  $q = [g + (1,1 \dots 1,3)p]a$ .

4. Задайтесь стрелой провисания нити в середине пролетов  $l$ :

$$f = (1/15 \dots 1/20)l - \text{для канатов,}$$

$$f = (1/20 \dots 1/30)l - \text{для нитей из проката.}$$

5. Определение усилий  $H, V$  и  $T$ :

$$H = ql^2 / 24f; V = 0,25ql; T = \sqrt{H^2 + V^2}. \quad (3.3)$$

6. Требуемая площадь сечения нити:

$$A^{mp} = T / R_y \gamma_c,$$

где  $R_y$  – расчетное сопротивление каната (см. табл. П1 – П4) или проката.

7. Длина исходной заготовки для обеспечения при действии расчетных нагрузок принятого значения стрелки провеса  $f$

$$L = l \left[ 1 + \frac{18}{5} \left( \frac{f}{l} \right)^2 - \frac{H}{EA} \right], \quad (3.4)$$

где  $A$  – принятое сечение нити.

8. Критерий проверки деформативности покрытия: –  $\Delta f$  (приращение  $f$  при действии нормативной снеговой нагрузки  $p_n$ ):

$$\Delta f = \frac{5}{864} \frac{m^2 P_n l^4}{EA f^2}, \quad (3.5)$$

где  $m = \frac{S}{l} = 1 + \frac{18}{5} \left( \frac{f}{l} \right)^2$ .

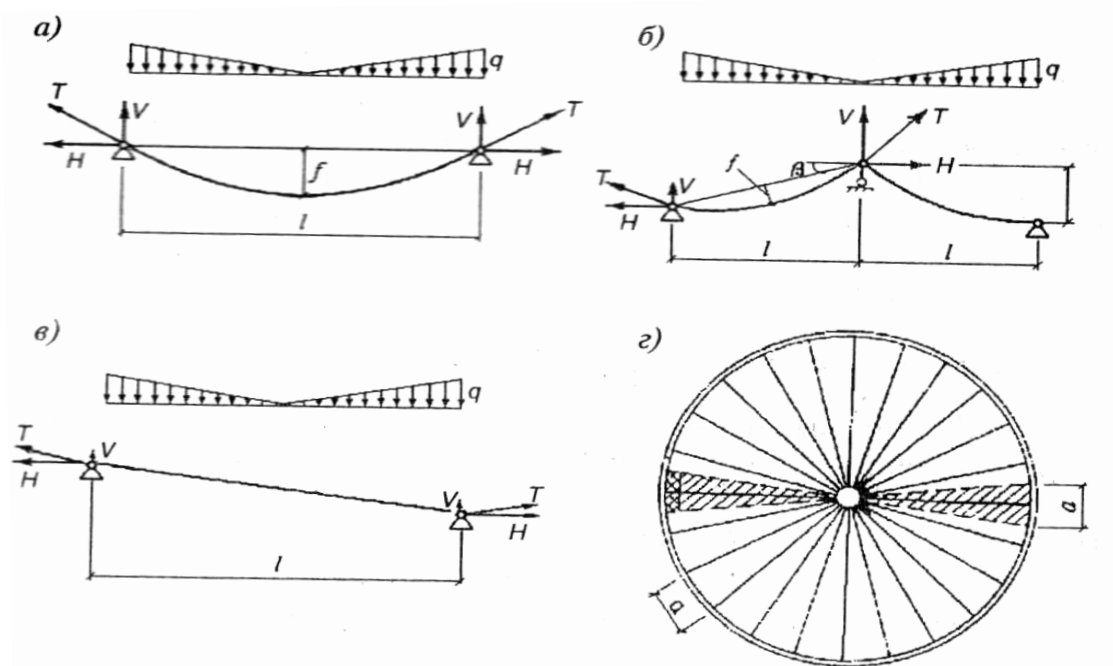


Рис. 3.5. Расчётные схемы нитей в круглых покрытиях: а – вогнутых; б – шатровых; в – спиральных; г – грузовая площадь

### Пример 3

Значение постоянных нагрузок примем по примеру 2:

$$g = 3,21 \text{ кН/м},$$

$$\text{временная снеговая (III р-н)} \bar{p}_n = 1,1 \text{ кН/м}^2, \quad p = 1,6 \text{ кН/м}^2.$$



Пригруз  $0,2p_n = 0,32 \text{ кН/м}^2$ . Постоянная нагрузка  $g = 3,21 > 2,0 \text{ кН/м}^2$  (больше наибольшего ветрового отсоса).

Расчетная нагрузка на 1 п. м нити при  $a = 1,5 \text{ м}$  (шаг нитей у кольца)

$$q = (3,21 + 1,6 + 0,32) \cdot 1,5 = 7,695 \text{ кН/м.}$$

1. Задаемся стрелой провеса  $f = \frac{1}{20}l = 3 \text{ м}$  (расчетную схему см. на рис. 3.5, а).

2. Определим усилия распора  $H$ , балочной реакции  $V$ , тяжести нити  $T$ :

$$H = ql^2 / 24f = 7,695 \cdot 60^2 / 24 \cdot 3 = 384,75 \text{ кН};$$

$$V = 0,25ql = 0,25 \cdot 7,695 \cdot 60 = 115,425 \text{ кН};$$

$$T = \sqrt{384,75^2 + 115,425^2} = 396,87 \text{ кН.}$$

3. Принимаем канат типа ЛК-РО  $6 \times 12$  с  $K_p = 0,82$ ,  $R_{un} = 186,2 \text{ кН/см}^2$ .

Требуемое сечение нити

$$A^{mp} = T / K_p R_{un} / 1,6 = 396,87 \cdot 1,6 / 0,82 \cdot 186,2 = 4,159 \text{ см}^2.$$

Из-за отсутствия канатов ЛК-Р с требуемой площадью принимаем ЛК-РО  $\varnothing 30 \text{ мм}$  с  $A = 4,2278 \text{ см}^2$ ,  $E = 14 \cdot 10^3 \text{ кН/см}^2$ .

4. Длина исходной заготовки каната:

$$L = l \left[ 1 + \frac{18}{3} \left( \frac{f}{l} \right)^2 - \frac{H}{EA} \right];$$

$$L = 60 \left[ 1 + \frac{18}{5} \left( \frac{3}{60} \right)^2 - \frac{396,87}{14 \cdot 10^3 \cdot 4,2278} \right] = 60 \cdot 1,00753 = 60,45 \text{ м.}$$

5. Проверку деформативности по критерию  $\Delta f$  проводим по формуле (3.5):

$$m = 1 + \frac{18}{5} \left( \frac{f}{l} \right)^2 = 1,009;$$

$$\Delta f = \frac{5}{864} \cdot \frac{1,009^2 \cdot 1,65 \cdot 60}{14 \cdot 10^3 \cdot 4,2278 \cdot 32} = 0,236 \text{ м} < \frac{1}{200}l = 0,3 \text{ м,}$$

следовательно, деформативность находится в пределах требования.

б. Расчет наружного сжатого железобетонного кольца:

а) сжимаемое усилие в кольце при  $r = 30$  м

$$N = Hr / a = 396,87 \cdot 30 / 1,5 = 7937,4 \text{ кН.}$$

б) предварительные размеры:

$$h = 1/60l = 1 \text{ м; } b = \frac{1}{150}l = \frac{1}{150} \cdot 60 \cong 0,4 \text{ м.}$$

в) жесткость кольца при классе бетона В35,  $R_b = 1,73 \text{ кН/см}^2$ ;  $E_b = 3,16 \cdot 10^3 \text{ кН/см}^2$ :

$$I = bh^3 / 12 = 1^3 \cdot 0,4 / 12 = 333 \cdot 10^4 \text{ см}^4; E_b I = 894,4 \cdot 10^7 \text{ кН} \cdot \text{см}^2.$$

г) критическое усилие рассчитываем по формуле относительного удлинения нити в плоскости кольца:

$$\varepsilon = N / (EA) = 396,87 / 14 \cdot 10^3 \cdot 4,2278 = 6,705 \cdot 10^{-3},$$

$$c = N_k / \left[ \varepsilon + \frac{m^2 - 1}{\cos^2 \beta} \right],$$

где  $m = S/l$  – отношение длины нити к пролету,  $m = 1,009$ ;  $\beta$  – угол наклона к горизонту линии, соединяющей опорные точки нити для вогнутой нити и плоского кольца,  $\beta = 0$ ,  $\cos \beta = 1$ .

$$c = 7937,4 / \left( 6,705 \cdot 10^{-3} + \frac{1,018 - 1}{1} \right) = 321,287 \cdot 10^3;$$

$$N_{cr} = \left( 2 \cdot 894,4 \cdot 10^7 / 30^2 \cdot 10^4 \right) \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + 321,287 \cdot 10^3 \cdot 30^2 \cdot 10^4 / 894,4 \cdot 10^7} \right] = 13893 \text{ кН}$$

$$13893 \text{ кН} > N_k = 7937,4 \text{ кН.}$$

Критическое усилие  $N_{cz}$  больше действующего усилия  $N_k$  в кольце, следовательно, устойчивость обеспечена.

д) расчет прочности наружного железобетонного кольца. Расчет выполняем в двух плоскостях: в горизонтальной как условно центрально сжатый элемент; в вертикальной – на изгиб на действие веса кольца и составляющей  $V$ , которую заменяем равномерной нагрузкой:

$$P_v = v / a = 115,425 / 1,5 = 76,95 \text{ кН/м.}$$

Усилие сжатия  $N_k = 7937,4$  кН.

Гибкость  $l_0 / h$ , где  $l_0 = 0,9l_{ш}$ , где  $l_{ш}$  – шаг колонн, равный 6 м,  $l_0 / h = 15$ . Расчет показал, что сечение кольца при условии использования бетона В35 может быть уменьшено до  $0,8 \times 0,4$  м. Определяем площадь арматуры:

$$A_s = A_s^1 = \frac{N}{\varphi R_{sc}} - A \frac{R_b}{R_{sc}} = \frac{7937,4}{0,8 \cdot 37,5} - 40 \cdot 80 \frac{1,78}{37,5} = 80,1 \text{ см}^2;$$

$$\varphi = 0,8, R_{sc} = 37,5 \text{ кН/см}^2; A_s = A_s^1 = 40,05 \text{ см}^2.$$

Принимаем:  $(10\text{Ø}25+10 \text{ Ø } 25)\text{A-500}$ ;  $A_s = A_s^1 = 44,9 \text{ см}^2$ ,  $\mu = 1,1 \%$ .

Расчет в вертикальной плоскости:

$$P_v = 76,95 \text{ кН/м}; \text{ собственный вес } g_k = 1 \cdot 0,4 \cdot 1,1 \cdot 2,5 = 1100 \text{ кН/см} = 11,0 \text{ кН/м}.$$

Кольцо, опирающееся на колонны с шагом 6 м, рассчитываем как неразрезную балку по упругой схеме  $l = 5,9$  м. Вычисляем требуемые моменты:

$$M_{np} = 0,046ql^2 = (76,95 + 11,0) \cdot 0,046 \cdot 5,9^2 = 140,83 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_{on} = 0,079ql^2 = 87,95 \cdot 5,9^2 \cdot 0,079 = 204,96 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$R_b = 1/73 \text{ кН/см}^2; \text{ арматура A-500, } R_s = 37,50 \text{ кН/см}^2,$$

$$\alpha = M^{np} / R_b b h_0;$$

$$h_0 = h - a = 40 - 5 = 35 \text{ см}; b = 100 \text{ см}; \alpha = 0,001.$$

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha} = 0,001.$$

Следовательно, величины сжатой зоны  $x = 0,0035$ .

$$A_s^{np} = M / R_s (h_0 - 0,5x) = 140,83 \cdot 100 / 37,5 \cdot 34,98 = 10,74 \text{ см}^2.$$

Для опорных сечений аналогично получаем –  $A_s^{on} = 15,63 \text{ см}^2$  (пролет  $4 \text{ Ø } 20$ , опора –  $5 \text{ Ø } 20 \text{ A-500}$ ). При этом шаг хомутов равен 150 мм на длине  $0,25l$  у опор.

Вывод: сечение кольца может быть уменьшено, целесообразно применение арматуры А-500 с  $R_s = 45 \text{ кН/см}^2$ .

Расчёт сечения наружного кольца следует вести по имеющимся компьютерным программам.

7. Расчет внутреннего кольца:

Кольцо стальное. Примем простейшее сечение из трубы.

Требуемый диаметр стали  $d_b = a_b l / a$  (из условия размещения крепления нитей),

где  $a_b$  – шаг нитей на внутреннем кольце,  $a_b = 0,1$  м,  $l$  – пролет,  $a = 1,5$  м.

$$d_b = 0,1 \cdot 60 / 1,5 \cong 4 \text{ м.}$$

Сечение трубы при  $R_y = 24,5 \text{ кН/см}^2$ ,  $r_1 = 2$  м.

Кольцевое усилие  $N_k^b = H r_1 / a = 396,87 \cdot 211,5 = 529,16 \text{ кН}$ .

$$A_{mp} = N_k^b / R_y \cdot \gamma_c = 529,16 / 24,5 \cdot 0,9 = 23,998 \text{ см}^2.$$

В итоге получаем трубу  $\text{Ø}168$  мм с  $A_\phi = 30,5 \text{ см}^2$ .

### 3.4. Расчет шатровых покрытий

Расчетная схема нити шатрового покрытия показана на рис. 3.5, б. Распор нити вычисляются по формуле:

$$H = q l^2 / 16 f. \quad (3.6)$$

Вертикальные составляющие усилий по концам нити зависят от угла наклона к горизонту линии, соединяющей опоры:

$$V_n = q l / 3 - H \text{tg} \beta; \quad V_b = q l / 6 - H \text{tg} \beta, \quad (3.7)$$

а тяжения нити у нижней и верхней опор будут соответственно равны:

$$T = \sqrt{H^2 + V_n^2} = H \sqrt{1 + [16 f / (3 l) - \text{tg} \beta]^2};$$

$$T = \sqrt{H^2 + V_b^2} = H \sqrt{1 + [8 f / (3 l) - \text{tg} \beta]^2} \quad (3.8)$$

Усилие, растягивающее центральное кольцо и сжимающее наружное, вычисляются по формуле:

$$N_k = H l / a, \quad (3.9)$$

где  $a$  – шаг нитей у наружного кольца.

Длину исходной заготовки можно определить по формуле:

$$L = l \left[ 1 / \cos \beta + 128 f^2 \cos^2 \beta / (45 l^2) - H / (EA \cos^2 \beta) \right]. \quad (3.10)$$

Проверка деформативности покрытия:

$$\Delta f = \frac{5}{364} \cdot \frac{m^2 P_n l^4}{EA f^2}, \quad (3.11)$$

где  $m = 1 + \frac{18}{5} \left( \frac{f}{l} \right)^2$ , предельное значение  $\Delta f$  равно  $1/200l$ . Далее расчет наружного и внутреннего колец осуществляется по пп. 5–7.

#### Пример 4

Шатровое покрытие здания спортивного комплекса пролетом 120 м, шаг рам 12 м, центральная опора в виде пространственной этажерки на круглом плане с перекрытиями.

Плиты покрытия – железобетонные, утеплитель – газобетон, гидроизоляция – трехслойный ковер.

1. Подсчет нагрузок в табличной форме.

Имеем

$$g^n = 2,75 \text{ кН/м}^2; \quad g = 3,21 \text{ кН/м}^2; \quad p_n = 1 \text{ кН/м}^2; \quad p_{сн} = 1,4 \text{ кН/м}^2.$$

Постоянная нагрузка  $g$  больше максимального значения отсоса, равного  $2 \text{ кН/м}^2$ .

Расчетная линейная нагрузка на канат у внешнего кольца с учетом пригруза  $q = [g + p(1,1\dots 1,3)]a$ , где  $a$  – шаг нитей у внешнего кольца принят кратным  $\pi$ , т.е.  $a = 1,57 \text{ м.}$ ,  $q = (3,21 + 1,2 \cdot 1,4) \cdot 1,57 = 7,68 \text{ кН/м.}$

2. Заданная стрелка провеса (для канатов):

$$f = 1/20l = 60/20 = 3 \text{ м.}$$

Перепад  $h = \frac{1}{8}l = 7 \text{ м.}$

3. Угол наклона линии соединяющей опоры к горизонту:

$$\operatorname{tg} \beta = h/l = 7/60 = 0,117 \text{ (см. рис. 3.5, б).}$$

4. Усилия  $H$ ,  $V$ ,  $T$  равны:

$$H = ql^2 / 16f = 7,68 \cdot 60^2 / 16 \cdot 3 = 576 \text{ кН.}$$

На внешнем кольце:

$$V_n = ql/3 - H \operatorname{tg} \beta = 7,68 \cdot 60/3 - 576 \cdot 0,117 = 86,21 \text{ кН;}$$

$$V_g = ql/6 - H \operatorname{tg} \beta = 7,68 \cdot 60/3 - 576 \cdot 0,117 = 9,41 \text{ кН};$$

$$T_H = \sqrt{H^2 + V_H^2} = \sqrt{576^2 + 86,21^2} = 582,42 \text{ кН};$$

$$T_g = \sqrt{H^2 + V_g^2} = \sqrt{576^2 + 9,41^2} = 576,08 \text{ кН}.$$

Принимаем канаты типа ЛК-РО с  $R_{un} = 166,6 \text{ кН/см}^2$  для про-  
волоки.

5. Расчетное сопротивление каната:

$$R_k = k_p R_{un} / 1,6 = 0,8 \cdot 166,6 / 1,6 = 83,3 \text{ кН/см}^2.$$

6. Требуемое сочетание нити:

$$A = T_H / R_k = 6,992 \text{ см}^2.$$

Принят канат  $\varnothing 39 \text{ мм } 6 \times 36$ .

Фактическое сечение:  $A = 716,29 \text{ мм}^2$ ,  $E = 14 \cdot 10^3 \text{ кН/см}^2$ .

7. Проверка деформативности перекрытия по критерию вели-  
чины стрелки провеса от нормативной снеговой нагрузки в сере-  
дине пролета:

$$m = 1 + \frac{18}{5} \left( \frac{f}{l} \right)^2 = 1 + \frac{18}{5} \left( \frac{3}{60} \right)^2 = 1,009, \quad m_2 = 1,0181,$$

$\Delta f$  высчитываем по формуле (3.5):

$$\Delta f = \frac{5}{864} \cdot \frac{1,018 \cdot 1 \cdot 60^4}{14 \cdot 10^3 \cdot 7,1629 \cdot 32} = 0,085 \quad m < \frac{1}{200} l = 0,3 \text{ м}.$$

8. Длину исходной заготовки каната находим по формуле

$$L = l \left[ 1 / \cos \beta + 128 f^2 \cos^2 \beta \right] \cdot \left( 45 l^2 \right) - H / \left( EA \cos^2 \beta \right);$$

$$L = 60 \left[ 1,067 + 128 \cdot 3^2 \cdot 0,9866 / 45 \cdot 60^2 - 576 / 14 \cdot 10^3 \cdot 7,16 \cdot 0,9866 \right];$$

$$\cos \beta = 0,9433 \quad L = 60,273 \text{ м}.$$

9. Усилие в наружном и внутреннем кольцах от распора

$$N_k = Hl/a = 576 \cdot 60/1,57 = 22012,74 \text{ кН}.$$

Далее расчет колец производится по примеру 2.

## 4. Висячие покрытия с нитями конечной изгибной жесткости

### 4.1. Общая характеристика и конструктивные особенности

Изгибная жесткость нити способствует сохранению проектной формы нити (покрытия), уменьшает местные деформации, позволяет применять для нитей обычную сталь и традиционную технологию изготовления и защиту их от коррозии.

Сплошное или сквозное сечение нити выполняют из прокатных или сварных профилей.

Жесткость нити оценивается по соотношению напряжений от изгиба  $\sigma_u$  и растяжения  $\sigma_p$ : при  $k = \sigma_u / \sigma_p < 0,05$  нить считают гибкой, при  $k > 0,05$  нить конечной жесткости и жесткость  $EI$  учитывают в расчете нити.

Жесткие нити применяют двух типов:

1) нити, изгибающиеся под действием постоянной и временной нагрузок;

2) нити, в которых начальная (постоянная) нагрузка не вызывает изгиба ( $k < 5\%$ ). Последний возникает только при действии дополнительной (например, временной) нагрузки.

Схема работы по второму типу обеспечивается конструктивно и с помощью монтажных приемов.

Так, если нить сквозного сечения в виде двухпоясной фермы, то нижний пояс проектируют разрезанным на отдельные панели и постоянная нагрузка воспринимается верхним поясом, работающим как обычная гибкая нить.

После монтажа конструкций и приложения всей постоянной нагрузки узлы нижнего пояса замыкают и нить превращается в ферму – нить конечной жесткости.

## 4.2. Нити, изгибающиеся под действием постоянной и временной нагрузок

Эти нити обычно имеют сплошное сечение с  $h = (1/200 \dots 1/350)l$ , их выполняют из прокатных профилей и применяют для параллельных и радиальных нитей.

Порядок расчета:

1. Определение нагрузок (постоянных, временных).

2. Принять марку стали ( $R_y, E$ ).

3. Задаться высотой сечения  $h$  и стрелой провеса  $f = (1/20 \dots 1/30)l$ .

4. Найти напряжения изгиба  $\sigma_u = 24fEh/5l^2$ . (4.1)

5. Площадь сечения нити  $A^{mp} = ql^2/8f(R_y - \sigma_u)$ . (4.2)

6. Определение жесткости нити из условия загрузки покрытия временной нагрузкой, приняв допустимой прогиб в четверти пролета:

$$[\Delta f] = \frac{1}{200}l.$$

7. Требуемый момент инерции нити ( $E$  – известно):

$$I^{mp} = \frac{5}{384}pl^4/32[\Delta f]. \quad (4.3)$$

8. По сортаменту принимается профиль ( $A^T, I^Tp$ ).

Фактически по сортаменту:  $A$  и  $I_x$ .

9. Уточнение стрелы провеса при равномерной нагрузке для определения напряженного состояния нити:

$$\Delta f = \frac{3}{128}p \frac{l^4 m^2}{EAf^2}, \quad (4.4)$$

где  $m = 1 + \frac{8}{3}(f/l)^2$ .

10. Определение напряжений:

$$\sigma_p = \left[ ql^2/8(f + \Delta f)A \right] - 48EI/5l^2 A, \quad (4.5)$$

$$\sigma_u = 48Eh(f + \Delta f)/10l^2. \quad (4.6)$$



11. Суммарное краевое напряжение от растяжения и изгиба:

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_u \leq R_y \gamma_c \text{ — проверка прочности.}$$

12. Тип нити:

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_r} \cdot 100 < 5 \% \text{ — гибкая}$$
$$\frac{\sigma_u}{\sigma_r} \cdot 100 \geq 5 \% \text{ — конечной жесткости.}$$

### Пример 5

Висячее покрытие пролетом  $l = 65$  м. Нити из фасонного проката с  $R_y = 36,5$  кН/см<sup>2</sup>.

Нагрузки: постоянная  $g = 3,5$  кН/м, временная — 1,5 кН/м (снеговая).

Нить из двутавра с  $R_y = 36,5$  кН/см<sup>2</sup>.

1. Задаемся высотой сечения и  $f$ :

$$h = 1/300l = 6500/300 = 20 \text{ см.}$$

Стрела провеса  $(1/20 \dots 1/30)l$ : принимаем  $f = \frac{1}{20} \cdot 65 = 3,25$  м.

2. Напряжения от изгиба:  $\sigma_u = \frac{24fEh}{5l^2} = \frac{24 \cdot 3,25 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 20}{5 \cdot 65 \cdot 10^4} = 15,21$

Н/см<sup>2</sup>.

3. Площадь сечения нити:

$$A = \frac{ql^2}{8f(R_y - R_u)} = \frac{5 \cdot 65^2}{8 \cdot 3,25 \cdot 21,3} = 38,14 \text{ см}^2.$$

4. Определим жесткость нити из условия загрузки покрытия временной нагрузкой на половине пролета:

$$EI = \frac{5 \cdot 0,5P(0,5l^4)}{384EI[\Delta f]} = \frac{5l^4}{384 \cdot 32[\Delta f]}.$$

5. Допускаемый прогиб в четверти пролета:

$$\Delta f = \frac{1}{200}l = \frac{1}{200} \cdot 65 = 0,325 \text{ м;}$$

$$EI = \frac{5 \cdot 1,5 \cdot 65^4 \cdot 10^8}{384 \cdot 100 \cdot 3,25} = 44,68 \cdot 10^6 \text{ кН} \cdot \text{см;}$$

$$I = \frac{44,68 \cdot 10^6}{E} = \frac{44,68 \cdot 10^6}{2,06 \cdot 10^4} = 2169 \text{ см}^4.$$

6. Принимаем нить из двутавра № 20 с площадью сечения  $A = 38,95 \text{ см}^2$  и моментом инерции  $I = 2660 \text{ см}^4$ .

7. Для определения напряженного состояния нити необходимо уточнить стрелу провеса. Приблизенно величина прогиба при равномерной временной нагрузке по всему пролету равна:

$$\Delta f = \frac{3}{128} \cdot \frac{Pl^4}{EA} \frac{\mu^2}{f^2}, \quad (4.7)$$

где  $\mu \cong 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f}{l} \right)^2 = 1,0066$ ;  $\mu^2 = 1,0132$ .

$$\Delta f = \frac{3 \cdot 1,5 \cdot 65^4 \cdot 10^8 \cdot 1,0132}{128 \cdot 100 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 38,95 \cdot 3,25^2 \cdot 10^4} = 7,3 \text{ см.}$$

$$8. \sigma_p = \frac{ql^2}{8(f + \Delta f)A} - \frac{48EI}{5l^2 A} = \frac{5 \cdot 65^2}{8(3,25 + 0,073) \cdot 38,95} - \frac{48 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 2660}{5 \cdot 65^2 \cdot 10^4 \cdot 38,95} = 20,1 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_u = \frac{48E(f + \Delta f)h}{10l^2} = \frac{48 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 332 \cdot 20}{10 \cdot 65^2 \cdot 10^4} = 15,54 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_u = 20,1 + 15,54 = 35,64 \text{ кН/см}^2 < R_y = 36,5 \text{ кН/см}^2.$$

9.  $\sigma_u / \sigma_p = (35,64 / 20,1) \cdot 100 \cong 70 \% \geq 5 \%$  — нити конечной жесткости.

При известных параметрах поперечного сечения нити можно определить стрелу провеса, обеспечивающую минимальные напряжения в несущих элементах.

Полные напряжения в нити [3]

$$\sigma = \frac{ql^2}{8fA} - \frac{48EI}{5l^2 A} + \frac{48Efh}{10l^2},$$

по формуле

$$f = \sqrt{\frac{5ql^2}{192EAh}}. \quad (4.8)$$

### Пример 6

Площадь сечения  $A = 39,95 \text{ см}^2$ , высота сечения  $h = 20 \text{ см}$ , пролет  $l = 65 \text{ м}$ , нагрузка по всему пролету  $q = 5 \text{ кН/м}$ .

$$f = \sqrt{\frac{5 \cdot 5 \cdot 64 \cdot 10^8}{192 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 38,95 \cdot 20}} = 380,578 \text{ см}.$$

Напряжения в нити в этом случае будут равны:

$$\sigma_u = 17,8 \text{ кН/см}^2; \sigma_r = 17,5 \text{ кН/см}^2; \sigma = 35,31 \text{ кН/см}^2.$$

### 4.3. Нити, не испытывающие изгиба под влиянием постоянной нагрузки

В нити не возникают изгибающие моменты, если очертание ее оси определяется уравнением квадратной параболы:

$$y_0 = \frac{4fx(1-x)}{l^2}. \quad (4.9)$$

Распор от постоянной нагрузки  $H_q = \frac{ql^2}{8f}$ . Высоту проката таких нитей назначают в пределах  $h = (1/60 \dots 1/90)$  пролета, если сечение сплошное и  $h = (1/25 \dots 1/40)$  пролета при сквозных сечениях.

Если нить выполнена в виде фермы или балки параболического очертания, то ее при расчете разбивают на отдельные участки.

Порядок расчета.

1. Определение нагрузок  $q$  и  $p$ .
2. Задаются стрелой провеса  $f$  и высотой сечения нити.
3. Определяют требуемую площадь сечения нити. Деформации и перемещения нити при загрузке ее временной нагрузкой по всему пролету невелики, поэтому наибольшее растягивающее усилие и площадь сечения можно определить по формулам:

$$T = \frac{H}{\cos \varphi} = \frac{(q+p)l^2}{8f} \left( 1 + \frac{8f^2}{l^2} \right); \quad A = \frac{T}{0,9R_y}. \quad (4.10)$$

Жесткость нити и необходимый момент инерции определяют по формуле при загрузке половины пролета временной нагрузкой с учетом допускаемых прогибов в четверти пролета:

$$EI = 5pl^4 / 384 \cdot 32[\Delta f], \text{ при } [\Delta f] = l / 200.$$

4. Определяют требуемый момент инерции  $J$ .

5. По сортаменту принимаются номер профиля (двутавр) по требуемым значениям  $A_{mp}$  и  $I_{mp}$ .

Определяют увеличение стрелы провеса при действии временной нагрузки:

$$\Delta f = pl^4 m^2 / 128 \cdot E \cdot Af^2. \quad (4.11)$$

Напряжения от изгиба и растяжения

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \Delta f 24Eh / 5l^2; \\ \sigma_p &= \frac{(g+p)l^2}{8(f+\Delta f)} - \frac{48EJ\Delta f}{5(f+\Delta f)l^2 A}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

*Пример 7*

Нить пролетом  $l = 65$  м загружена постоянной нагрузкой  $q = 12$  кН/м и временной нагрузкой  $p = 8$  кН/м. Стрела провеса нити принята  $f = 3,20$  м, расчетное сопротивление материала  $R_y = 24$  кН/см<sup>2</sup>.

Высота сечения нити:  $h = (1/50 \dots 1/90) \cdot 65 = 0,7$  см.

Площадь сечения нити:

$$A = \frac{(g+p)l^2}{8f \cdot 0,9R_y} \left( 1 + \frac{8f^2}{l^2} \right) = \frac{20 \cdot 65^2}{8 \cdot 3,20 \cdot 0,9 \cdot 24} \cdot \left( 1 + \frac{8 \cdot 3,20^2}{65^2} \right) = 155,71 \text{ см}^2.$$

Жесткость нити и ее момент инерции, которые обеспечивают допустимое приращение прогиба  $[\Delta f] = \frac{1}{200 \cdot l}$  от действия временной нагрузки на половине пролета, равны:

$$EI = \frac{5pl^2}{384 \cdot 32[\Delta f]};$$

$$I = \frac{5 \cdot 8 \cdot 65^4 \cdot 10^8 \cdot 200}{384 \cdot 100 \cdot 32 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 65 \cdot 10^2} = 86792 \text{ см}^4.$$

Принимаем сечение нити из двутавра с площадью  $A = 164,7 \text{ см}^2$  и моментом инерции  $I = 125930 \text{ см}^4$ . Увеличение стрелы провеса от временной нагрузки  $p = 8 \text{ кН/м}$ :

$$\Delta f = \frac{3 \cdot 8 \cdot 65^4 \cdot 10^8 \cdot 1,013}{128 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 164,7 \cdot 3,2 \cdot 10^4 \cdot 2} = 9,92 \text{ см.}$$

Напряжение от изгиба и растяжения высчитываем по формулам:

$$\sigma_u = y''E \frac{h}{2} = \frac{9,92 \cdot 192 \cdot 70 \cdot 2,06 \cdot 10^4}{20 \cdot 65 \cdot 10^4 \cdot 2} = 1,62 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_p = \frac{20 \cdot 65^2}{8 \cdot (3,2 + 0,092) \cdot 164,7} - \frac{48 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 125930 \cdot 9,92}{5(3,2 + 0,092)65^2 \cdot 10^4 \cdot 164,7 \cdot 10^2} = 19,39 \text{ кН/см}^2$$

;

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_u = 19,39 + 1,62 = 21,01 \text{ кН/см}^2 < 0,9 \cdot 24 = 21,6 \text{ кН/см}^2;$$

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{r2}} 100 = \frac{1,62}{19,39} \cdot 100 \gg 5 \% \text{ — имеем нить конечной жесткости.}$$

Точные расчеты конструкций с нитями конечной изгибной жесткости приводятся в литературе [8,17,19].

## **5. Двухпоясные системы покрытий**

### ***5.1. Общая характеристика и конструктивные особенности***

Двухпоясными называют конструкции покрытий, состоящие из двух систем нитей, расположенных параллельно или радиально. Одна из них является несущей и ее работа, по существу, не отличается от работы однопоясных систем. Другая система нитей, связанная с помощью тяжей или распорок с первой, обеспечивает стабилизацию покрытия за счет предварительного напряжения (рис. 5.1).

Стабилизирующие нити путем натяжения несущих как бы имитируют действие временной нагрузки и при отсутствии такой не позволяют несущим нитям вернуться в исходное положение, что дает возможность существенно снизить деформативность покрытия от временной нагрузки.

Взаимное расположение несущих и стабилизирующих нитей может быть осуществлено по трем схемам, показанным на рис. 5.2.

При расположении несущей нити выше стабилизирующей (рис. 5.2, *a*) соединяющие нити элементы работают на растяжение, что дает возможность выполнить их из тросов или круглой стали. Однако при таком решении покрытия увеличивается строительная высота помещения и возникает необходимость организации двух опорных контуров отдельно для несущих и стабилизирующих нитей.

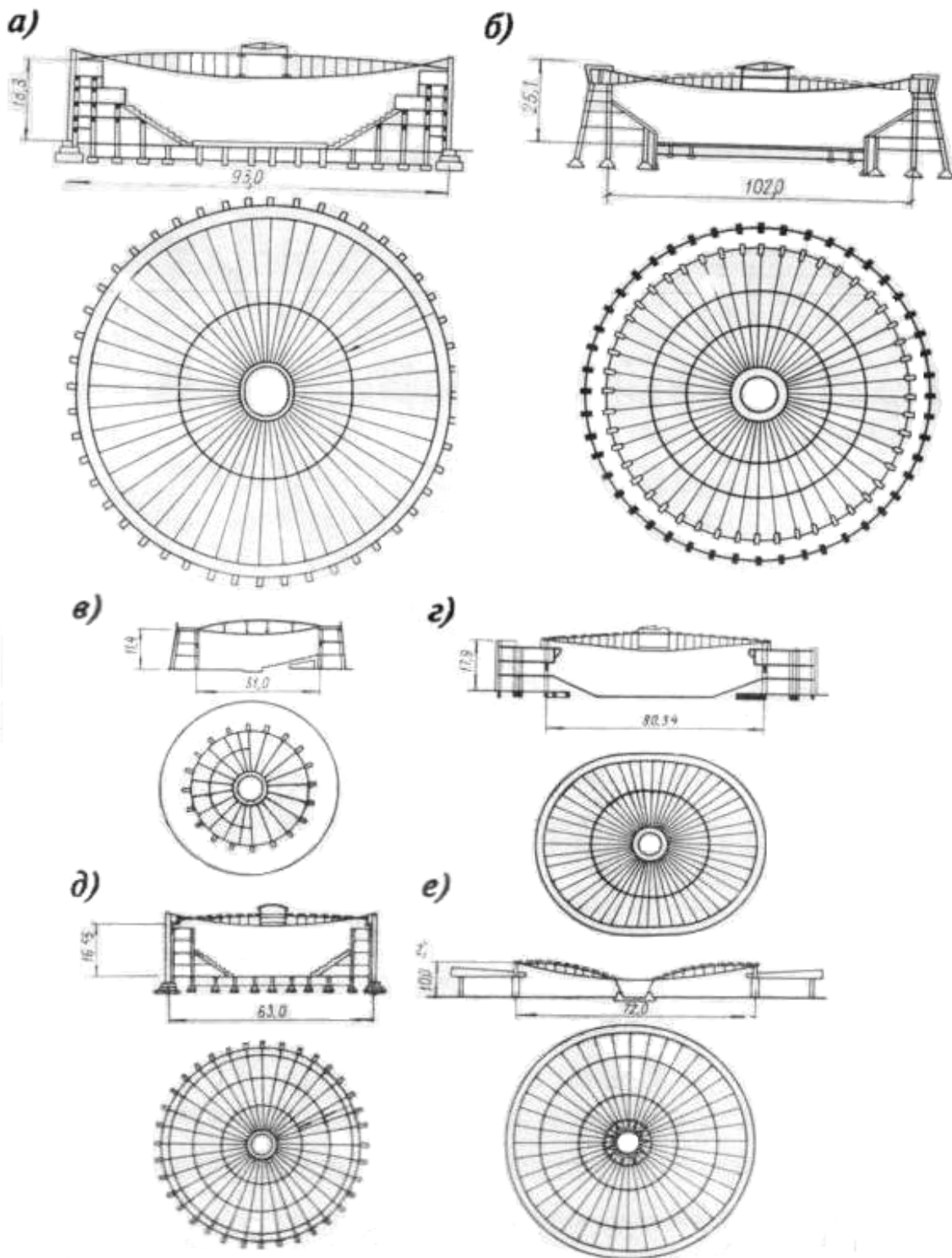
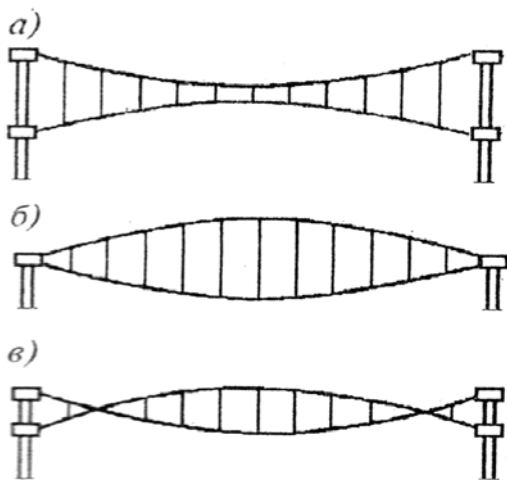


Рис. 5.1. Двухпоясные вантовые системы покрытий: а – Дворца спорта «Юбилейный» в Санкт-Петербурге; б – Дворца спорта в Баку; в – конференц-зала; г – городского зала в г. Зуль; д – спортзала в Берлине; е – здания рынка в Ульяновске

Расположение нитей по схеме рис. 5.2, б позволяет устроить один общий опорный контур и организовать наружный водоот-

вод.



Вместе с тем элементы, соединяющие пояса в этой системе, разрабатывают на сжатие, что существенно усложняет их конструкцию и приводит к повышению металлоемкости.

Схеме рис. 5.2, в присущи как преимущества, так и недостатки первых двух схем. Длина сжатых элементов здесь может быть уменьшена.

Рис. 5.2. Схемы двухпоясных систем: а – со стягивающим элементом; б – с распорами; в – комбинированная

в – комбинированная

Очертание нитей выбирают в соответствии с характером распределения внешней нагрузки. Основная нагрузка на покрытие (равномерно распределенная линейная  $q$ ) и очертание несущей нити, которые должны следовать квадратной параболе, зависят от:

$$y_x = 4f \frac{x}{l} \left( 1 - \frac{x}{l} \right),$$

где  $f$  – стрелка провеса в середине пролета.

Для исключения кинематических перемещений от сил взаимодействия несущих и стабилизирующих нитей, передаваемых через растяжки (распорки), необходимо, чтобы эти силы были равномерно распределены по пролету. Это может быть достигнуто с помощью придания стабилизирующей нити также очертания по квадратной параболе с той же или иной стрелой провеса.

При радиальном расположении нитей линейная нагрузка будет треугольной, следовательно, очертания несущих и стабилизирующих нитей должны следовать кубическим параболам вида



$$y(x) = 6f \frac{x}{l} \left[ 1 - 2 \frac{x}{l} + \frac{4}{3} \left( \frac{x}{l} \right)^2 \right].$$

Количество растяжек (распорок) должно быть достаточно большим, чтобы они имитировали равномерно распределенную нагрузку. Расстояние между ними назначают 1,5...6 м и более, обычно увязывая его с размерами панелей покрытия или с шагом прогонов.

Варианты крепления растяжек к нитям показаны на рис. 5.3, а распорок – на рис. 5.4. При взаимном расположении несущих и стабилизирующих нитей (см. рис. 5.2, в) они оказываются в разных плоскостях. Для обеспечения пространственной работы покрытия и закрепления сжатых распорок от смещений из плоскостей нитей могут быть предусмотрены вертикальные связи между распорками [3].

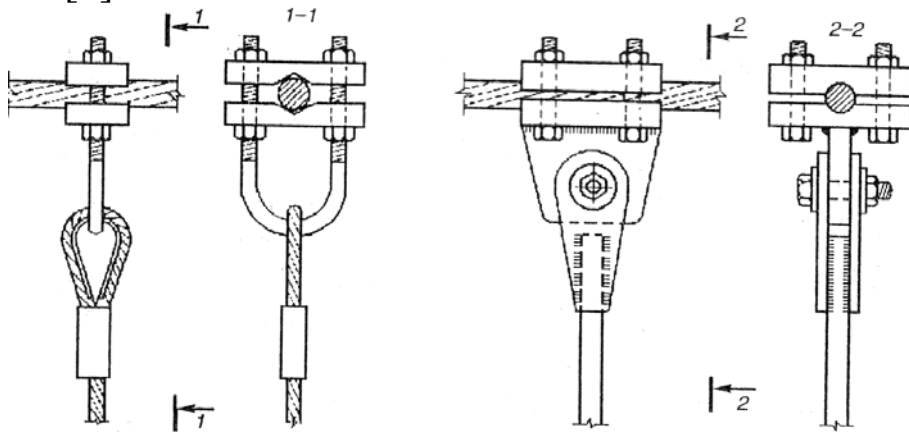


Рис. 5.3. Крепления растяжек к нитям

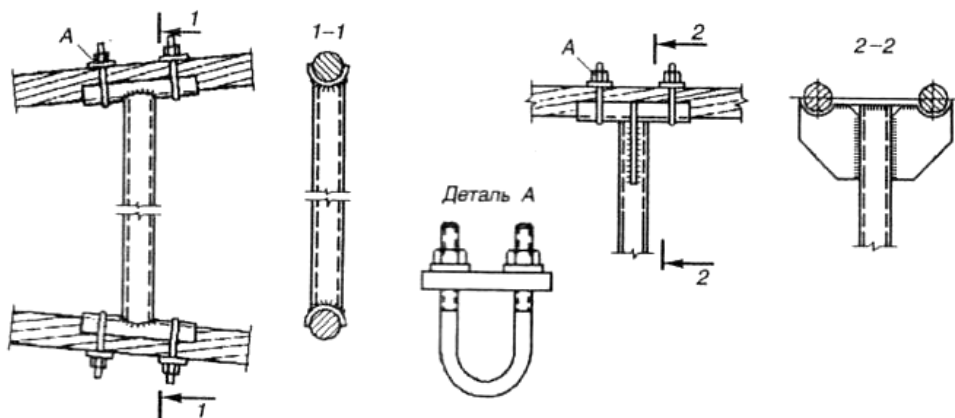


Рис. 5.4. Крепления распорок к нитям

Предварительное напряжение покрытия можно создать путем натяжения домкратами, либо путем напряжения растяжек (распорок). В последнем случае напрягающие усилия будут незначительны и их можно реализовать без применения домкратов, используя винтовые муфты с правой и левой резьбой (рис. 5.5). Чтобы муфты не раскручивались, их после напряжения затягивают контргайками.

В двухпоясных системах покрытий применяют легкие ограждающие конструкции в виде настилов и панелей на основе профилированных листов из стали, алюминиевых сплавов, стеклопластиков и других материалов. В случае использования для холодного покрытия прозрачного полиэфирного стеклопластика или органического стекла в здании обеспечивается естественное освещение.

Настил укладывают непосредственно на нити, реже на прогоны (рис. 5.6, а). Обычно утеплитель располагают над настилем и предусматривают защиту его кровельным ковром (рис. 5.6, б).

Если профилированный настил, кроме несущей функции, выполняет роль гидроизоляции, то утеплитель располагают под настилем (рис. 5.6, в).

В этом случае при использовании минерального утеплителя пароизоляцию выполняют из фольги, наклеенной на картон, а снизу предусматривается сетка.

Панели и плиты покрытия (прямоугольной формы для систем с параллельными нитями и трапециевидной – с радиальными) не имеют принципиальных особенностей по сравнению с обычными панелями. Узлы сопряжения и стыки панелей показаны на рис. 5.7.

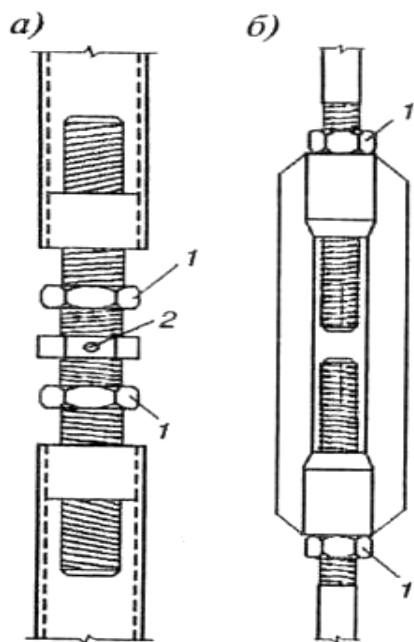


Рис. 5.5. Винтовые муфты для напряжения двухпоясных систем: а – в распорках; б – в растяжках; 1 – контргайка; 2 – отверстие под штырь для вращения болта

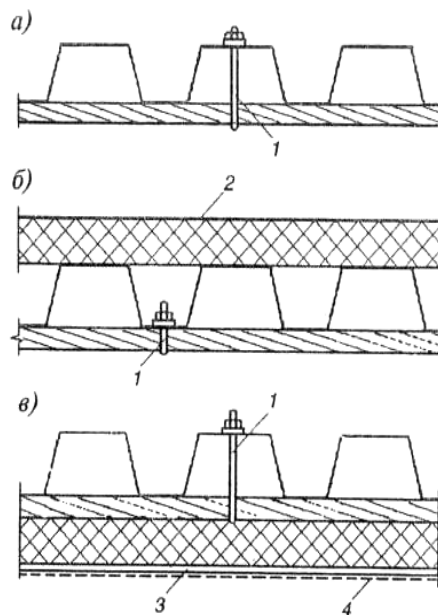


Рис. 5.6. Конструкция кровли из профилированных листов: а – без утеплителя; б – с верхним расположением утеплителя; в – с размещением утеплителя под настилом; 1 – болт с крючком; 2 – гидроизоляционный ковёр; 3 – пароизоляция; 4 – поддерживающая сетка

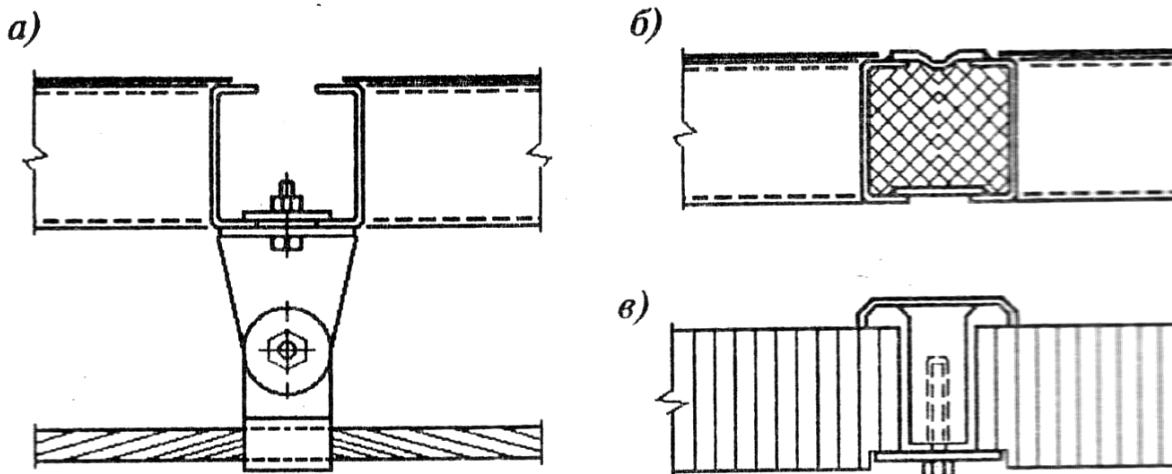


Рис. 5.7. Детали стыков плит: а – опирание плит на столлик; б – сварной стык стальных плит; в – стык с нащельником для стеклопластиковых плит

## 5.2. Основы расчета двухпоясных систем

Расчетная схема нитей до их загрузки временной нагрузкой приведена на рис. 5.8, а.

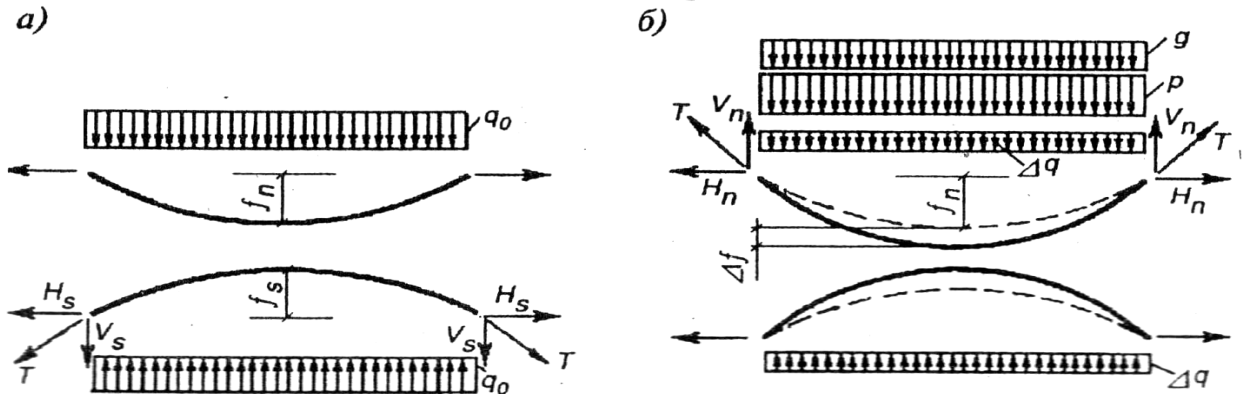


Рис. 5.8. Расчётная схема двухпоясной системы: а – в стадии предварительного напряжения; б – в стадии действия расчётных нагрузок

За счет предварительного напряжения системы растяжки (распорки) передают на несущую и стабилизирующие нити равномерно распределенную линейную нагрузку интенсивностью  $q_0$ . Величину этой контактной нагрузки назначают так, чтобы при появлении временной нагрузки  $p$ , которая будет догружать несущую нить и разгружать стабилизирующую, как показано на схеме рис. 5.8, б, последняя не выключалась из работы.

Изменение распора стабилизирующей нити  $\Delta H_s$  при загрузке системы какой – нибудь нагрузкой  $p$  будет пропорционально изменению распора несущей нити  $\Delta H_u$  от этой нагрузки, т.е.

$$\Delta H_s = -\alpha \Delta H_u. \quad (5.1)$$

Стрелки дополнительных провесов нитей, объединенных растяжками (распорками), изменяются на одинаковую величину. Из этого условия коэффициент  $\alpha$  равен (8.72 [3]):

$$\alpha = \frac{m_n^2 E_s A_s f_s}{m_s^2 E_n A_n f_n}. \quad (5.2)$$

Остаточное натяжение стабилизирующей нити  $\Delta T_s \approx \Delta H_s$  принимают в пределах 20 ... 30 % от возможного изменения ее на-

чального распора  $\Delta H_s$ , т.е. остаточную  $\Delta q$  и начальную  $q_0$  контактные нагрузки назначают равными.

$$\Delta q = (0,2 \dots 0,3)q ;$$
$$q_0 = q + \Delta q = (1,2 \dots 1,3)q .$$

Далее нити рассчитывают независимо друг от друга: несущую нить – по вышеизложенным правилам на нагрузку  $(g+p+\Delta q)$ , стабилизирующую – на  $q_0$ .

Если  $g < p_w$ , где  $p_w$  – линейная ветровая нагрузка отсоса, то стабилизирующая нить рассчитывается на  $q_0 + (p_w - g)$ .

Расчет распорок и растяжек производится соответственно как сжатых и растянутых элементов [1, 3, 4].

Точный расчет выполняют на ЭВМ, в частности по формулам, приведенным в [3].

### ***5.3. Последовательность расчета двухножных систем***

1. Назначьте состав ограждающих конструкций, определите постоянную и временные нагрузки.

2. Задайтесь стрелками провесов несущей и стабилизирующей нитей в пределах  $1/8 \dots 1/20$  пролета, ориентируясь на аналог, либо выполните вариантное проектирование для разных стрелок, всякий раз повторяя приведенный ранее расчет.

3. Задайтесь коэффициентом  $\alpha = 0,1 \dots 0,15$  в первом приближении; определите падение контактной нагрузки.

Если покрытие выполнено по схеме рис. 5.2, а, то предварительное напряжение целесообразно осуществлять после монтажа ограждающих конструкций, т.е. после приложения постоянной нагрузки  $g$ . В этом случае величину контактной нагрузки нужно назначать из условия невыключения из работы стабилизирующих нитей после приложения нагрузки. Тогда падение контактной нагрузки будет равно:

$$q = p \frac{\alpha f_s}{f_n + \alpha f_s} .$$

В покрытиях, выполненных по схемам (рис. 5.1 б, в), предварительное напряжение удобно производить до монтажа ограждающих конструкций, при этом величину контактной нагрузки приходится назначать несколько больше, исходя из ее падения при загрузке покрытия собственным весом и снегом:

$$q = (g + p) \frac{\alpha f_s}{f_n + \alpha f_s}.$$

Определив падение контактной нагрузки тем или иным способом, назначьте ее величину:

$$q_0 = q + \Delta q,$$

где  $\Delta q = (0,2 \dots 0,3)q$ .

4. Подберите в первом приближении сечение стабилизирующей нити из расчета восприятия ею распора от контактной нагрузки (принято, что преднапряжение системы выполняется до приложения постоянной нагрузки  $g$ , а  $p_w < g$ ):

$$T_n = \sqrt{H_n^2 + V_n^2}; \quad A_s > 1,6T_n / (k_p R_{un}).$$

а) в покрытиях нитями

$$H_s = q_0 l^2 / 8 f_s; \quad V_s = q_0 l / 2;$$

б) в покрытиях с радиальными нитями

$$H_s = q_0 l^2 24 f_s; \quad V_s = q_0 l / 4.$$

5. Подберите в первом приближении сечение несущей нити:

$$T_n = \sqrt{H_n^2 + V_n^2}; \quad A_n > 1,6T_n / (k_p R_{un}).$$

а) в покрытиях с параллельными нитями

$$H_n = (g + p + \Delta q) l^2 / 8 f_n; \quad V_n = (g + p + \Delta q) l / 2;$$

б) в покрытиях с радиальными нитями

$$H_n = (g + p + Dq) l^2 / 24 f_n; \quad V_n = (g + p + Dq) l / 4.$$

При малых стрелках, выполняя первое приближение расчетов по примеру 5, вы можете подобрать сечение нити по распору  $H$ , не вычисляя вертикальной составляющей тяжения  $V$ . Однако при точных проверках нужно ориентироваться на тяжение  $T$ .

6. Вычислите коэффициент  $\alpha$  и уточните контактную нагрузку:

$$\alpha = \frac{m_n^2 E_s A_s f_s}{m_s^2 E_n A_n f_n};$$

$$q = p \frac{\alpha f_s}{f_n + \alpha f_s};$$

$$\Delta q = (0,2 \dots 0,3); q_0 = q + \Delta q.$$

Здесь под  $p$  понимается временная нагрузка или суммарная нагрузка  $q + p$ , (в зависимости от условий предварительного напряжения системы).

7. Вернитесь к примеру 5 и повторите вычисления при новых значениях контактных нагрузок. Выберите канаты для несущей и стабилизирующей нитей. Найдите длины исходных заготовок для этих нитей по формуле

$$L = l \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f}{l} \right)^2 - \frac{H}{EA} \right].$$

8. Оцените деформативность покрытия в приближенном варианте по формуле

$$\Delta f_1 = k \frac{p_i l^4}{(1 + \alpha f_s / f_n) E A_n f_n^2} \leq \frac{1}{200} l$$

или выполните более обстоятельный анализ.

9. Определите усилия в распорках и подберите их сечение:

$$N = q_0 a,$$

где  $a$  – шаг распорок (растяжек).

10. Определите линейную нагрузку на балки (кольца) опорного контура от распоров несущей и стабилизирующей нитей, назначьте конструкцию и подберите размеры поперечного сечения элементов опорного контура, выполните необходимые проверки на прочность и устойчивость.

### Пример 8

Рассчитайте двухпоясное покрытие плавательного бассейна, рассмотренного в примере 1, но с иным составом ограждающих конструкций, которые примем из профилированного настила, фенольного пенопласта и рулонного ковра (табл. 2) [15]. Поперечный разрез здания приведен на рис. 5.9. Шаг нитей – 3 м, шаг распорок – 3 м.

Расчетная постоянная нагрузка составляет  $0,52 \text{ кН/м}^2$ . Линейная постоянная нагрузка на нити  $g = 0,52 \cdot 3 = 1,56 \text{ кН/м}$ ,  $p_{сн}^n = 1 \text{ кН/м}^2$ ,

$g_n / p_{сн}^n = 0,52 / 1 < 8$ , поэтому  $\gamma_f = 1,6$ ; расчётная снеговая на один метр нити  $p = p_{сн}^n \gamma_f a = 1 \cdot 1,6 \cdot 3 = 4,8 \text{ кН/м}^2$ .

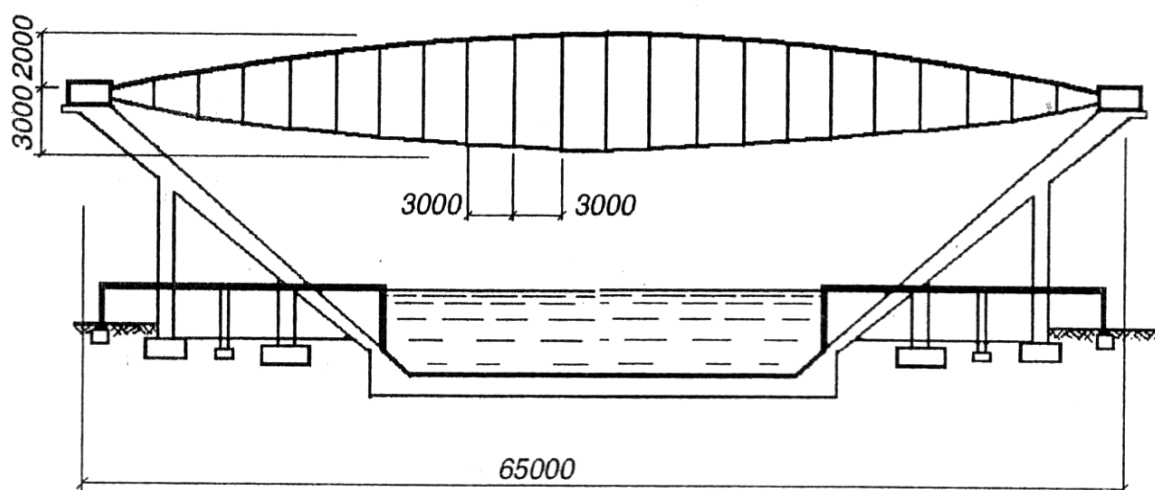


Рис. 5.9. Поперечный разрез плавательного бассейна

Назначим стрелки несущей нити  $f_n = (1/20)l = 3,25 \approx 2$  м. Принимаем в первом приближении коэффициент  $\alpha = 0,1$ .

Определяем падение контактной нагрузки при загрузке покрытия постоянной и снеговой нагрузками

$$q = (g + p)\alpha f_s / (f_n + \alpha f_s) = 6,36 \cdot 0,1 \cdot 2 / (3 + 0,1 \cdot 2) = 0,4 \text{ кН/м}.$$



1. Принимаем остаточную контактную нагрузку при полном загрузении покрытия  $\Delta q = 0,25q = 0,25 \cdot 0,4 = 0,1$  кН/м, тогда начальная контактная нагрузка будет равна  $q_0 = q + \Delta q = 0,4 + 0,1 = 0,5$  кН/м.

2. Подбираем ориентировочную площадь сечения нитей.

Несущая нить:

$$H_n = (g + p + \Delta q)l^2 / (8f_n) = (1,56 + 4,8 + 0,1) \cdot 65^2 / (8 \cdot 3) = 1137 \text{ кН}.$$

3. Требуемая площадь сечения каната  $R_{un}$  двойной свивки ЛК-РО при нормативном сопротивлении проволок равна  $156,8 \text{ кН/см}^2$ :

$$A_n = 1,6H_n / k_p R_{un} = 1,6 \cdot 1137 / (0,75 \cdot 156,8) = 15,47 \text{ см}^2 = 1547 \text{ мм}^2.$$

Назначаем канат диаметром  $61,5$  мм с площадью сечения  $A_n = 1782,25 \text{ мм}^2$ . Модуль упругости (табл. П4)  $E = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Н/см}^2$ .

Стабилизирующая нить:

$$H_s = q_0 l^2 / (8f_s) = 0,5 \cdot 65^2 / (8 \cdot 2) = 132 \text{ кН}.$$

Требуемая площадь поперечного сечения спирального каната ЛК-Р при  $R_{un} = 137,2 \text{ кН/см}^2$ :

$$A_s = 1,6 \cdot 132 / (0,81 \cdot 137,2) = 1,9 \text{ см}^2 = 190 \text{ мм}^2.$$

Назначаем канат диаметром  $20,5$  мм, для которого  $A = 1,9211 \text{ см}^2$ ;  $E = 1,5 \cdot 10^5 \text{ кН/см}^2$ .

4. Для уточнения коэффициента  $\alpha$  предварительно находим отношение длин нитей к пролету:

$$m_n = 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f_n}{l} \right)^2 = 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{3}{65} \right)^2 = 1,0057;$$

$$m_s = 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{3}{65} \right)^2 = 1,0025.$$

Таблица 2

| Состав покрытия   | Нормативная нагрузка, кН/м <sup>2</sup> | Коэффициент надежности на нагрузке | Расчетная нагрузка, кН/м <sup>2</sup> |
|---|---|------------------------------------|---------------------------------------|
| <i>Постоянная нагрузка</i>  |   |                                    |                                       |
| Гидроизоляция (двухслойный, рулонный ковер)   | 0,08                                    | 1,3                                | 1,04                                  |
| Слой припенного рубероида   | 0,012                                   | 1,2                                | 0,014                                 |
| Теплоизоляция (фенольный пенопласт толщиной 5 см, плотностью 60 кг/м <sup>3</sup> ) | 0,30                                    | 1,2                                | 0,36                                  |
| Стальной профилированный настил Н60-782-1   | 0,133                                   | 1,1                                | 0,22                                  |
| Стальные канаты и распорки  | 0,2                                     | 1,1                                | 0,22                                  |
| <i>Итого</i>  | 725                                     | –                                  | 1,85                                  |
| <i>Временная нагрузка</i>   |   |                                    |                                       |
| Снеговая нагрузка для III района  | 1,0                                     | 1,6                                | 1,6                                   |
| <i>Итого</i>  | 1,725                                   |                                    | 3,45                                  |

Коэффициент  $\alpha$  по формуле равен:

$$\alpha = \frac{m_n^2 A_s f_s}{m_s^2 A_n f_n} = \frac{1,0057^2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot 2}{1,0025^2 \cdot 15,47 \cdot 10^{-4} \cdot 3} = 0,0824.$$

5. Уточняем значение контактных нагрузок:

$$q = (1,56 + 4,8) \frac{0,0824 \cdot 2}{3 + 0,824 \cdot 2} = 0,331 \text{ кН/м};$$

$$\Delta q = 0,25 \cdot 0,331 = 0,083 \text{ кН/м};$$

$$q_0 = (1,56 + 4,8) \frac{0,0824 \cdot 2}{3 + 0,824 \cdot 2} = 0,331 \text{ кН/м}.$$

Производим повторный подбор сечений нитей.

6. Расчет несущей нити:

$$H_n = 1134 \text{ кН};$$

$$V_n = 209,4 \text{ кН};$$

$$T_n = 1153,2 \text{ кН};$$

$$A_n = 1570 \text{ мм}^2.$$

Назначаем канат ЛК-РО конструкции  $6 \times 36$  диаметром 61,5 мм с временным сопротивлением проволок  $156,8 \text{ кН/см}^2$  ( $A=1782,55 \text{ мм}^2$ ).

Расчет стабилизирующей нити:

$H_s = 109,3 \text{ кН}; V_s = 13,46 \text{ кН}; T_s = 110,13 \text{ кН}; A_n = 158,6 \text{ мм}^2$ . Назначаем канат ЛК-РО конструкции  $6 \times 19$  диаметром 19 мм с временным сопротивлением проволок  $137,2 \text{ кН/см}^2$  ( $A = 165,68 \text{ мм}^2$ ).

7. Для оценки деформативности покрытия находим дополнительную стрелку провеса в середине пролета от нормативной снеговой нагрузки:

$$\Delta f_1 = k \frac{p_i l^4}{(1 + \alpha f_s / f_n) E A_n f_n^2} = \frac{3}{128} \frac{(1 \cdot 10^{-4} \cdot 300) \cdot 6500^4}{(1 + 0,824 \cdot 2,00 / 300) 15 \cdot 10^3 \cdot 17,8 \cdot 300^2} = 49,51,$$

$$49,51 \text{ см} > (1/200)l = 32,5 \text{ см}.$$

Покрытие не удовлетворяет условию жесткости, а это может привести к снижению его долговечности.

8. Увеличим нагрузку до  $q_0 = 0,7 \text{ кН/м}^2$ . Падение контактной нагрузки при загрузке покрытия постоянной нагрузкой и снегом сохранит прежнее значение, поэтому остаточная контактная нагрузка будет равна  $\Delta q = 0,7 - 0,4 = 0,3 \text{ кН/м}^2$ . Повторяя подбор сечений нитей при новом значении  $q_0$ , и, следовательно, расפור, обратите внимание, что предпочтение нужно отдавать канатам с меньшими значениями временного сопротивления проволок разрыву. Это связано с тем, что жесткость системы зависит от площади сечения канатов и не зависит от их прочности. Поэтому условие прочности канатов ( $1,6 T/A, K_p, R_{un}$ ) следует обеспечить путем увеличения их диаметров при одновременном снижении предела прочности проволок.

Выбирая  $R_{y,n} = 117,6 \text{ кН/см}^2$  и повторяя расчет, назначаем канаты: для несущей нити – ЛК-РО диаметром 72 мм ( $A_n = 23,16 \text{ см}^2$ ); для стабилизирующей нити – ЛК-Р диаметром 27 мм ( $A_s = 3,28 \text{ см}^2$ ).

9. Дополнительная стрелка провеса в середине пролета от нормативной снеговой нагрузки будет равна 37,4 см. Таким образом, деформативность покрытия существенно уменьшена, но новое значение стрелки превышает нормируемую величину 32,5 см.

10. Увеличим начальную стрелку несущей нити до 3,3 м. Тогда

$$m_n = 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{3,3}{65} \right)^2 = 1,0069;$$

$$\alpha = \frac{1,0069^2 \cdot 3,38 \cdot 14^{-4} \cdot 2}{1,0025^2 \cdot 23,16 \cdot 10^{-4} \cdot 3,3} = 0,089;$$

$$\Delta f = \frac{3 \cdot 3 \cdot 65^4}{128(1 + 0,089 \cdot 2/3,3) 15000 \cdot 10^4 \cdot 23,16 \cdot 10^{-4} 3,3^2} = 0,315 < 0,325 \text{ м.}$$

Условие жесткости обеспечено. При проектировании повторите расчёт и проверьте прочность канатов при новом значении стрелки провеса несущей нити.

11. Определим длины исходных заготовок для нитей, для чего предварительно вычислим распоры в нитях от контактной нагрузки:

$$H_n = q_0 l^2 / (8 f_n) = 0,414 \cdot 65^2 / (8 \cdot 3) = 72,88 \text{ кН};$$

$$H_s = q_0 l^2 / (8 f_s) = 0,414 \cdot 65^2 / (8 \cdot 2) = 109,32 \text{ кН.}$$

12. Искомые длины исходных заготовок будут равны:

$$L_n = l \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f_n}{l} \right)^2 - \frac{H_n}{EA_n} \right] = 6500 \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{330}{6500} \right)^2 - \frac{72,88}{15 \cdot 10^2 \cdot 17,8} \right] = 6542,9 \text{ см};$$

$$L_s = l \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f_s}{l} \right)^2 - \frac{H_s}{EA_n} \right] = 6500 \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{200}{6500} \right)^2 - \frac{109,32}{15 \cdot 10^2 \cdot 16,57} \right] = 6513,55 \text{ см.}$$

13. Подбор сечения распорок.

Сжимающее усилие при шаге распорок 3 м равно

$$N = (q + p + \Delta q)a = (1,56 + 4,8 + 0,3)3 = 19,98 \text{ кН.}$$

Назначаем сечение распорки по предельной гибкости  $\lambda_{\text{lim}} = 150$ . Требуемый радиус инерции сечения  $i = l_0 / \lambda_{\text{lim}} = 500 / 150 = 3,33$  см. По сортаменту выбираем гнuto-сварной замкнутый профиль  $100 \times 100 \times 3$ /ТУ 36-2287-80 ( $A=11,64$  см<sup>2</sup>;  $I=3,96$  см). Проверяем устойчивость распорки:

$$\lambda = 500 / 3,96 = 126,26; \varphi = 0,39;$$

$$N / (\varphi A) = 19,98 / (0,36 \cdot 11,64) = 4,4 < R_y \gamma_c,$$

$\varphi$  принято по табл. 72 [1].

Условие устойчивости обеспечено.

## 6. Вантовые предварительно напряженные фермы

### 6.1. Общие сведения

Напряжение при монтаже производят с таким расчетом, чтобы самые интенсивные снеговые и ветровые нагрузки не снижали до конца эффекта предварительного напряжения и в элементах, работающих на сжатие, оставались небольшие растягивающие усилия. В этом случае усилия от внешней нагрузки в растянутых элементах будут суммироваться с весьма значительными усилиями предварительного напряжения. Однако некоторое повышение металлоемкости растянутых элементов с избытком компенсируется отсутствием значительно более металлоемких сжатых элементов.

Тросовые фермы применяют для перекрытия однопролетных и многопролетных зданий с прямоугольным планом, а также круглых зданий (рис. 6.1).

Фермы обычно располагают на расстоянии 3...6 м друг от друга в зависимости от несущей способности кровель-

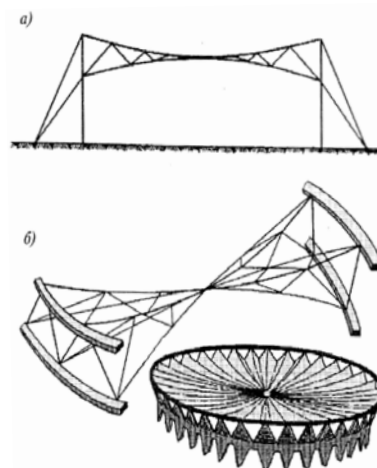


Рис. 6.1. Вантовые фермы:  
а – в прямоугольных зданиях;  
б – в круглых зданиях

ных панелей или настила. Прикрепленный к канатам настил или кровельные панели заменяют поперечные связи между фермами. Кровля, уложенная по провисающему верхнему канату, получает цилиндрическое очертание, что дает простое решение отвода атмосферных вод вдоль здания путем изменения отметок расположения соседних ферм. Размеры панелей ферм назначают независимо от размеров кровельных плит покрытия, так как внеузловая передача сравнительно небольшой нагрузки на мощный растянутый трос практически не отражается на его работе. Стрелки провесов поясов вантовых ферм благодаря их относительно высокой жесткости назначают несколько большими, чем в двухпоясных системах.

## 6.2. Основы расчета вантовых ферм

При расчете вантовых ферм обычно пренебрегают измерением их геометрии от кинематических перемещений, что позволяет рассчитывать тросовую ферму как стержневую систему; не учитывают работу рилонов на изгиб и в целях увеличения жесткости верхний и нижние пояса соединяют в одном узле (рис. 6.2). В результате имеем две лишние неизвестных: распор  $X_1$  и поперечную силу  $X_2$  (подробно см. в [10]).

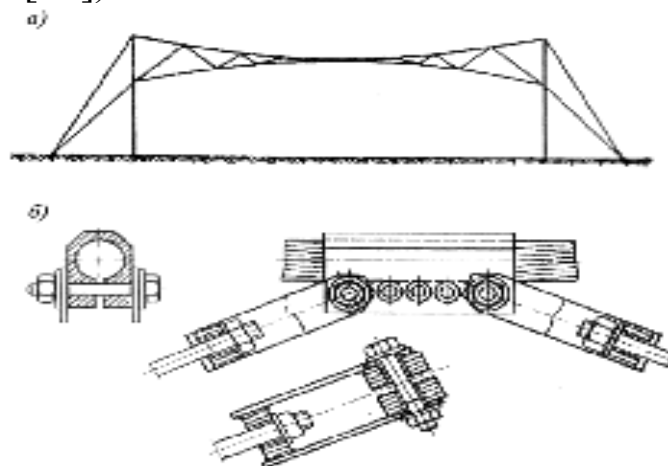


Рис. 6.2. Вантовая ферма: а – схема фермы; б – узел фермы

Расчет преднапряженных вантовых ферм, являющихся статически неопределимыми системами, выполняется при различных упрощениях, что снижает неопределимость с пяти до двух. Расчет удобно производить по программе LIRA.

## 7. Перекрестные системы двойкой кривизны

### 7.1. Компоновка и работа несущих систем

Такие системы образуются двумя взаимно перпендикулярными семействами параллельных нитей (несущих и стабилизирующих); поверхность покрытия при этом имеет седловидную форму (см. рис. 1.2, в). Усилия предварительного напряжения в стабилизирующих нитях передаются на несущие нити в виде сосредоточенных сил, приложенных в узлах пересечения. Эти силы назначаются такими, чтобы при отсутствии временной нагрузки они имитировали ее действие и не позволили несущим нитям вернуться к первоначальной форме. Этим обеспечивается стабилизация формы покрытия (рис. 7.1).

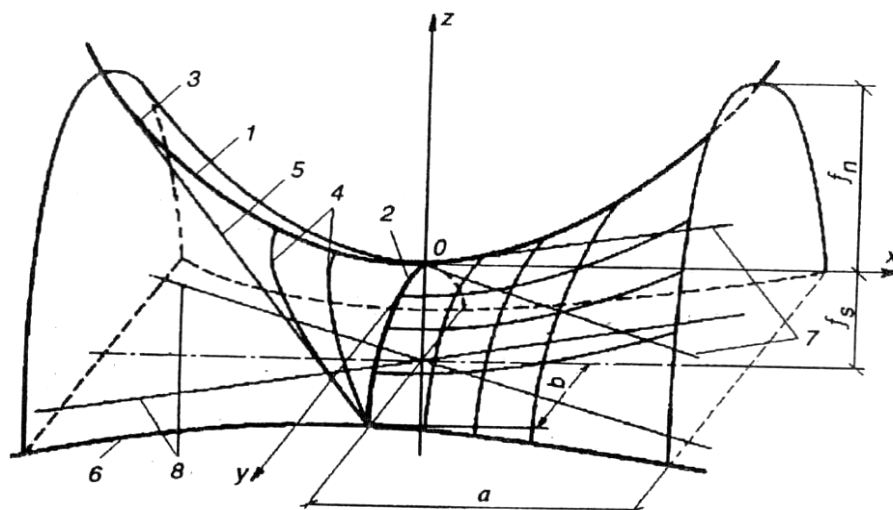


Рис. 7.1. Гиперболический параболоид: 1 – главная несущая парабола; 2 – главная стабилизирующая парабола; 3 – точка касания секущей плоскости с главной несущей параболой; 4 – гиперболы; 5 – след секущей плоскости с прямолинейной образующей; 6 – главная гипербола; 7 – прямолинейные образующие в точке “ноль”; 8 – асимптоты главной гиперболы

Постоянная нагрузка на покрытие – равномерно распределенная, снег также распределен по покрытию примерно одинаково, поэтому форма несущей нити должна соответствовать квадратной параболе. Стабилизирующие нити, призванные имитировать временную и, следовательно, равномерно распределенную нагрузку, также должны иметь формы квадратных парабол. Этому отвечает поверхность  $Z$  в виде гиперболического параболоида – «гипара» (см. рис. 7.1):

$$z = f_n \frac{x^2}{a^2} + f_s \frac{y^2}{b^2},$$

где  $f_n$  – стрелка провеса несущих нитей;  $f_s$  – стрелка подъема стабилизирующих нитей;  $a$  и  $b$  – полупролеты в направлении  $x$  и  $y$ .

На рис. 1.4, 1.5 показаны различные виды покрытий с опорными контурами в виде арок, которым придают форму плоской параболы, а выполняют обычно из железобетона.

Гипар является лучшей формой поверхности из нитей. Нити в сетке располагают с одинаковым шагом, величина которого зависит от конструкции кровли, обычно 2...3 м, для пленочных покрытий от 1 м. В узлах пересечения нити скрепляются (рис. 7.2).

Стрелки провеса по главным осям поверхности принимают для несущих нитей  $f_n = (1/8... 1/15)l_n$ , для стабилизирующих  $f_s = (1/10... 1/25)l_s$ .

Увеличение стрелки несущих и уменьшение стабилизирующих уменьшает прогибы покрытия и усилия в несущих нитях, однако увеличивает изгибающие моменты в опорном контуре.



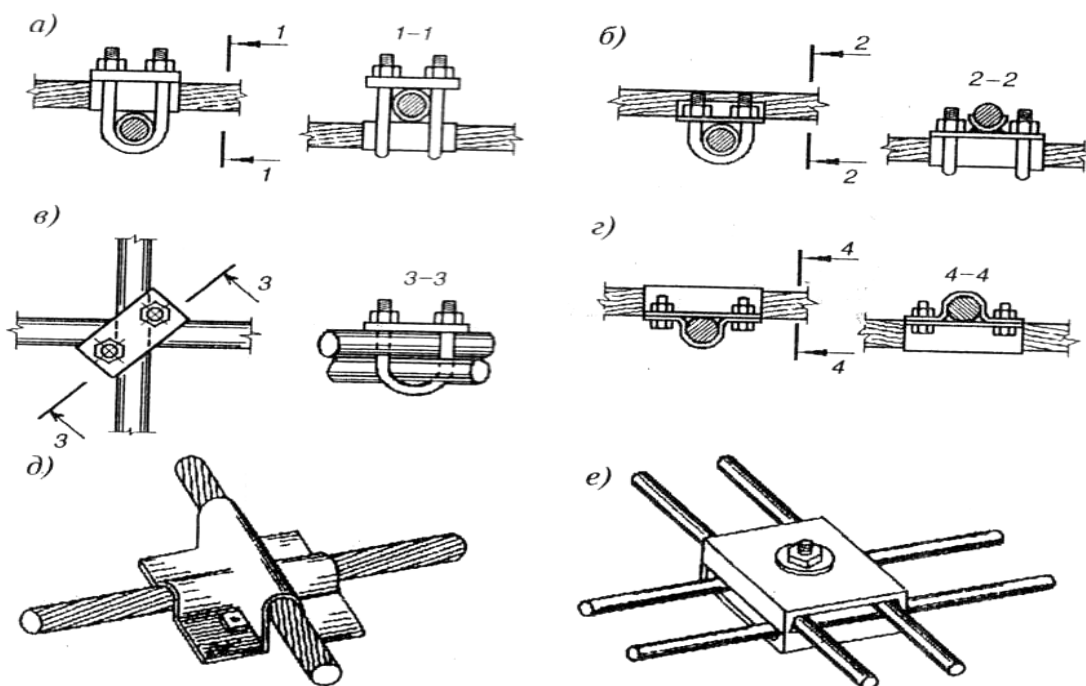


Рис. 7.2. Сопряжения нитей в перекрёстных системах: а – на двух хомутах; б – на двойных хомутах с «седлом»; в – на одиночных хомутах; г – с двумя штампованными накладками; д – с одиночной штампованной накладкой; е – при парных нитях

## 7.2. Особенности расчета

Особенностями расчета универсальным способом расчета сетей произвольного вида являются численные методы.

Приближенно расчет перекрестных систем в форме гипара может выполняться в следующей последовательности при соблюдении условий (см. рис. 7.1):

$$\frac{f_{n,i}}{l_{n,i}} = const; \quad \frac{f_{s,f}}{f_{s,f}} = const. \quad (7.1)$$

1. Назначьте состав ограждающих конструкций.
2. Определите постоянные и временные нагрузки  $g_n; g; p_n; p$ .
3. Задайтесь стрелой провесов несущей и стабилизирующей нитей в пределах  $1/8 \dots 1/20$  пролета.
4. Задайтесь коэффициентом  $\alpha$  в пределах  $0,5 \dots 1,0$ , созданным натяжением.
5. Падение контактной нагрузки равно:

$$q_k = (g + p) \frac{\alpha f_s a_s}{f_n \left( l_s^2 / l_n^2 + \alpha f_s a_n \right)}, \quad (7.2)$$

где  $a_s, a_n$  – шаги стабилизирующих и несущих нитей.

6. Значение контактной нагрузки  $q_0 = q_k + \Delta q = (1,2, \dots 1,3)q_k$ .

7. Сечение стабилизирующих нитей в первом приближении:

$$T_s = \sqrt{H_s^2 + V_s^2};$$

$$A_s = 1,6T_s / K_p R_{un}.$$

При параллельных нитях  $H_n = (g + p + q_k)l^2 / 8f_n$ ;

Сечение несущей нити

$$V_n = 0,5(g + p + q_k)l^2;$$

$$T_n = \sqrt{H_n^2 + V_n^2};$$

$$A_n = 1,6T_n / K_p R_{un}.$$

По сортаменту принимают канаты.

8. Уточните значение  $\alpha, q_k$  и определите (оцените) деформативность покрытия:

$$\alpha = \frac{m_n^2 E_s A_s f_s \left( \frac{l_n^2}{l_s^2} \right)}{m_s^2 E_n A_n f_n \left( \frac{l_n^2}{l_s^2} \right)}; \quad (7.3)$$

$$q = (g + p) \frac{\alpha f_s}{f_n \left( \frac{l_n^2}{l_s^2} \right) + \alpha f_s} \cdot \frac{a_s}{a_n}; \quad (7.4)$$

$$\Delta f = \frac{3}{128} \cdot \frac{pl_n^4}{\left[ 1 + \alpha \frac{f_s}{f_n} \left( \frac{l_n^2}{l_s^2} \right) \right] EA_n f_n^2} \leq \frac{1}{200} l_n. \quad (7.5)$$

*Пример 9.*

Здание круглое в плане, диаметром 65 м перекрыто перекрестной системой нитей. Форма поверхности покрытия – гиперболический параболоид.

1. Нагрузки:  $\bar{g} = 0,52$  кН/м<sup>2</sup> (расчетная); нормативная снеговая 1,0 кН/м<sup>2</sup>;  $\gamma_f = 1,6$ ;  $\bar{p} = 1,6$  кН/м<sup>2</sup>.

2. Шаг несущих нитей – 3 м; стабилизирующих – 2 м.

3. Линейная нагрузка на несущую нить  $g = \bar{g}a_n = 0,52 \cdot 2 = 1,04$  кН/м, расчетная снеговая –  $p = \bar{p}a_n = 1,6 \cdot 1,2 = 3,2$  кН/м.

4. Задаемся стрелами провеса (подъема) нитей:  $f_n = l_n / 20 = 65 / 20 = 3,25$  м;  $f_s = l_s / 10 = 65 / 10 = 6,5$  м.

Задаемся коэффициентом  $\alpha = 0,5$ , тогда падение контактной нагрузки – взаимное влияние несущих и стабилизирующих нитей – равно:

$$q_k = (1,04 + 3,2) \cdot \frac{0,5 \cdot 65 \cdot 3}{(3,25 + 0,5 \cdot 6,5) \cdot 2} = 3,18 \text{ кН/м};$$

$$l_n = l_s = 68;$$

$$\Delta q_c = 0,3q_k = 0,3 \cdot 3,18 = 0,95 \text{ кН/м}$$

$$q_0 = q_k + \Delta q = 3,18 + 0,95 = 4,13 \text{ кН/м}.$$

Подбираем канат для стабилизирующей нити:  $H_s = 4,13 \cdot 65^2 / (8 \cdot 6,5) = 336$  кН;  $V_s = 4,13 \cdot 65 / 2 = 135$  кН;

$T = (336^2 + 135^2)^{1/2} = 362$  кН. Требуемая площадь сечения каната ЛК-Р (см. табл. П1) при временном сопротивлении разрыву его проволоки  $R_{un} = 176,4$  кН/см<sup>2</sup> и  $k_p = 0,81$ .

$$A_s = \frac{1,6 \cdot 362}{0,81 \cdot 176,4} = 4,053 \text{ см}^2 = 405,3 \text{ мм}^2.$$

Назначаем канат диаметром 29,5 мм ( $A = 491,5$  мм<sup>2</sup>).

5. Подбираем канат для несущей нити:

$$H_n = (1,04 + 3,2 + 0,95)65^2 / (8 \cdot 3,25) = 843,4 \text{ кН};$$

$$V_n = (1,04 + 3,2 + 0,95)65 / 2 = 168,7 \text{ кН};$$

$$T = (843,4^2 + 168,7^2)^{1/2} = 860,1 \text{ кН};$$

$$A = 1,6 \cdot 860,1 / (0,81 \cdot 176,4) = 9,63 \text{ см}^2.$$

Назначаем канат ЛК-Р диаметром 46,5 мм ( $A = 988,71$  мм<sup>2</sup>).

6. Уточняем коэффициент  $\alpha$  по формулам:

$$m_n = 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{3,5^2}{65} \right) = 1,0067;$$

$$m_s = 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{6,5^2}{65} \right) = 1,027;$$

$$\alpha = \frac{1,0067^2 \cdot 4,91 \cdot 6,5 \cdot 65^2}{1,027^2 \cdot 9,89 \cdot 3,25 \cdot 65^2} = 0,95.$$

Коэффициент  $\alpha$  весьма сильно отличается от первоначально заданного, поэтому требуется повторный расчет при  $\alpha = 0,95$ . Опуская вычисления, приведем окончательные результаты расчетов:  $q_k = 4,17$  кН/м;  $\Delta q = 1,24$  кН/м;  $q_0 = 5,41$  кН/м;  $H_s = 439,6$  кН/м;  $V_s = 175,8$  кН;  $T_s = 473$  кН;  $A_s = 5,31$  см<sup>2</sup>.

Назначаем канат диаметром 49,5 мм ( $A = 111,711$  мм<sup>2</sup>);  $\alpha = 1,01$ .

На этом можно прекратить дальнейшие уточнения, приняв назначенные во втором приближении канаты. Некоторое увеличение  $\alpha = 1,01$  по сравнению с  $\alpha = 0,95$  приведет к небольшому росту усилий в канатах, но оно должно компенсироваться значительным увеличением сечений принятых по сортаменту канатов по сравнению с расчетными. Тем не менее для определенности оценим величину напряжений в канатах, приняв за основу  $\alpha = 1,01$ ,  $q = 4,25$  кН/м;  $\Delta q = 1,27$  кН/м;  $q_0 = 5,5$  кН/м.

$$\begin{aligned} H_s &= 447 \text{ кН}; V_s = 178,8 \text{ кН}; T_s = 481,4 \text{ кН}; \\ \sigma &= 1,6 \cdot 481,4 / (0,81 \cdot 5,9) = 161 < 176,4 \text{ кН/см}^2; \\ H_n &= 893,7 \text{ кН}; V_n = 179 \text{ кН}; T_n = 911,4 \text{ кН}; \\ \sigma &= 1,6 \cdot 911,4 / (0,81 \cdot 11,2) = 160,7 < 176,4 \text{ кН/см}^2. \end{aligned}$$

Имеющийся запас по несущей способности позволяет принять канаты прежних диаметров, но с меньшим временным сопротивлением проволок разрыву  $R_{un} = 166,6$  кН/см<sup>2</sup>, что снижает деформативность покрытия.

Оценим деформативность по формуле (7.5):

$$\Delta f = \frac{3}{128} \cdot \frac{2 \cdot 65^4}{\left[ 1 + 1,01 \frac{6,5}{3,25} \right] \left( 16 \cdot 10^3 \cdot 10^4 \right) \cdot 11,17 \cdot 10^{-4} \cdot 3,25} = 0,147 < \frac{65}{200} = 0,325 \text{ м.}$$

## 8. Металлические висячие оболочки-мембраны

### 8.1. Конструкции мембран

Мембранные покрытия выполняют из тонких провисающих листов (полос), исполняющих несущие и ограждающие функции [18].

Конструкция мембраны обычно состоит из монтажных элементов – гибких нитей – объединенных в сетку с заданной поверхностью, на которые раскатывают полосы, заранее раскроенные, сваренные и свернутые в рулоны на заводе.

Если монтажные элементы включают в работу и используют для стабилизации мембраны, то их выполняют в виде нитей конечной жесткости или вантовых ферм. Возможна сборка мембраны на земле с последующим подъемом на проектную отметку. Толщина мембран 4 – 6 мм. Благодаря малой толщине мембранные оболочки в основном испытывают растяжение, поэтому их называют безмоментными.

Все мембранные покрытия, кроме цилиндрических, работают в двух направлениях и сопротивляются деформациям сдвига, поэтому их жесткость существенно выше жесткости аналогичных висячих конструкций с гибкими нитями. К недостаткам мембран относятся большая поверхность металла, подверженного коррозии, и относительно невысокая (0,78 ч) огнестойкость, что иногда требует принятия соответствующих мер и увеличивает стоимость покрытия.

Кровлю мембранных покрытий выполняют по обычной схеме: утеплитель, выравнивающий слой, рулонный ковер. Если утеплитель, кроме основного назначения, используют для стабилизации покрытия, то его делают в виде бетонной рубашки или жесткий плитный утеплитель укладывают с зазорами 10...12 см, которые затем в короткий промежуток времени заливают расширяющимся раствором. Мембрану можно использовать в качестве гидроизоляции, выполняя ее из атмосферостойкой стали 10 ХНДП или алюминиевых сплавов. В этом случае утеплитель

крепят к мембране снизу, устраивают пароизоляцию из фольгоизола или другого подобного материала и предусматривают защитную сетку.

По способу формообразования мембранные оболочки разделяют на покрытия с первоначально заданной стрелой провеса и первоначально плоские. Покрытия с заданной стрелой провеса собирают навесным способом на предварительно смонтированной системе вспомогательных элементов («постели»), которая должна быть выверена и прикреплена к опорному контуру. Раскатку свернутых в рулон полотнищ мембраны производят с помощью лебедок.

По другой схеме мембрану собирают на площадке или подмостях, а затем целиком поднимают. После подъема покрытие провисает под действием собственного веса.

## 8.2. Особенности расчета

Мембраны рассчитывают по безмоментной теории, учитывая только нормальные усилия  $N_1, N_2$ ,  $N_1$  – в направлении меридиана, соответствующее напряжение  $\sigma_1 = N_1 / t \cdot 1$ ; кольцевое усилие (напряжение)  $N_2$ , рассчитываемое из формулы  $\sigma_e = N_2 / t \cdot 1$ .

Уравнение Лапласа:

$$N_1/R_1 + N_2/R_2 = P, \quad (8.1)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – меридиональный и кольцевой радиусы кривизны оболочки;  $P$  – проекция внешней нагрузки на нормаль к поверхности мембраны.

Таким образом, в общем случае мембрана находится в двухосном напряженном состоянии, поэтому прочность проверяют по формулам:

$$\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^0} \leq R_y\gamma_c; \quad (8.2)$$

$$\sigma_1 \leq R_y\gamma_c, \quad (8.3)$$

где  $\gamma_c = 1$  при пролетах до 120 м и 0,8 при  $l \geq 120$  м.

Расчет мембран можно выполнять аналитическим и численным методами [14], в частности методом конечных элементов (МКЭ).

### **8.3. Провисающие мембраны на круглом (эллиптическом) плане**

Поверхность покрытия может быть выполнена в форме параболоида вращения, сферы, эллиптического параболоида. Как и цилиндрические мембраны, все перечисленные типы оболочек для уменьшения деформативности требуют стабилизации. Кроме указанных для цилиндрических оболочек способов, в оболочках на круглом плане широко практикуют использование технологических нагрузок.

На рис. 8.1 представлена схема сферической мембраны покрытия (г. Санкт-Петербург) из стального листа толщиной 6 мм. Мембрана дополнительно стабилизирована (кроме плиты) 56 тросовыми фермами с верхними поясами из швеллера. Нижний пояс ферм соединен с кольцом диаметром 72 м, свободно подвешенным к мембране.

*Основы безмоментного расчета.*

Для круглых в плане зданий при равномерно распределенной по покрытию нагрузке равновесной формой будет параболоид:

$$z = f\left(\frac{x}{a}\right)^2 + f\left(\frac{y}{a}\right)^2, \quad (8.4)$$

где  $a$  – радиус покрытия;  $f$  – стрела провеса мембраны.

Такая форма поверхности обеспечивает равномерное распределение меридиональных и кольцевых усилий по поверхности мембраны, что позволяет делать всю её одинаковой толщины.

Определяем радиусы кривизны:

$$R_1 = \frac{\left[1 + (z')^2\right]^{3/2}}{z''} = \frac{\left[a^4 + (2fx)^2\right] \sqrt{1 + \left(\frac{2fx}{a^2}\right)^2}}{2fa^2}; \quad (8.5)$$

$$R_2 = x / \sin \varphi.$$

Нормальная к поверхности мембраны составляющая нагрузки

$$p = q \cos \varphi.$$

Функции угла  $\varphi$ , входящие в равенства (8.5), можно определить по известным формулам:

$$\sin \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}; \quad \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = z' = \frac{2f}{a^2} x. \quad 8.6$$

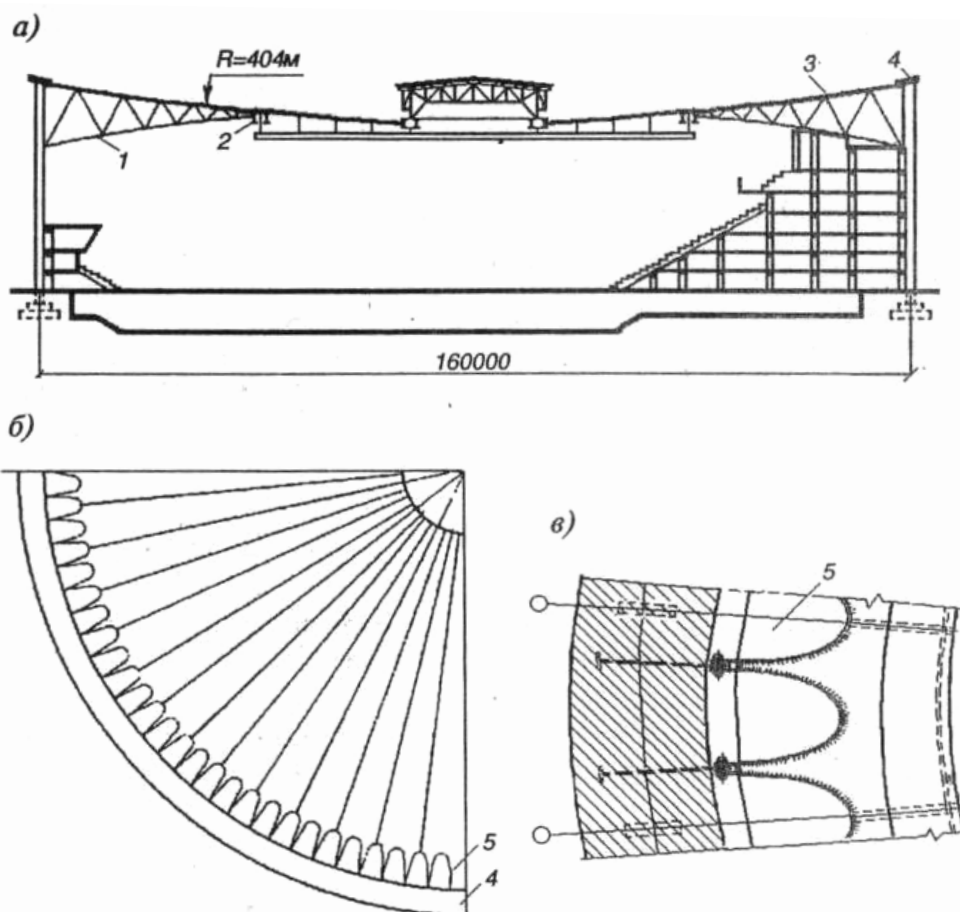


Рис. 8.1. Мембранное покрытие спортивного зала: 1 – стабилизирующая ферма; 2 – промежуточное кольцо; 3 – мембрана; 4 – опорное кольцо; 5 – вырезы в мембране; 6 – железобетонная плита

Расчетная схема параболоида вращения представлена на рис. 8.2, а.

Определим усилия в мембране от равномерно распределенной нагрузки (рис. 8.2, б).



Меридиональное усилие найдем из условия равновесия отсеченной горизонтальной плоскостью части мембраны:  
 $2\pi x N_1 \sin \varphi = G = \pi x^2 q$ . Отсюда

$$N_1 = qx / (2 \sin \varphi); \quad (8.7)$$

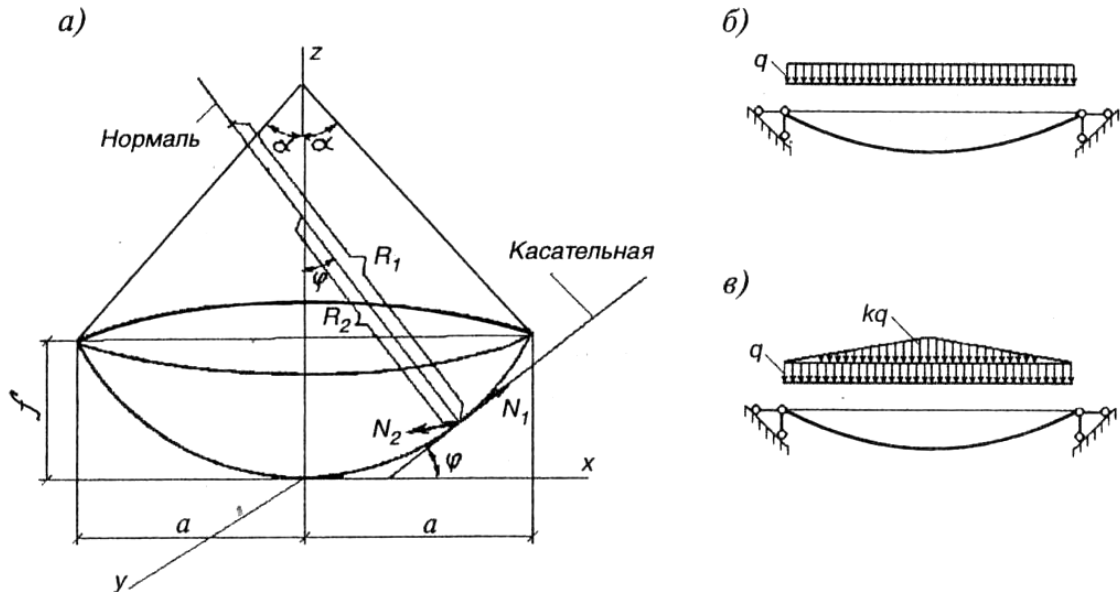


Рис. 8.2. Параболоид вращения: а – расчётная схема; б – загрузка постоянной нагрузкой; в – то же, снеговой

кольцевое усилие высчитываем по следующей формуле:

$$N_2 = \left( p - \frac{N_1}{R_1} \right) R_2. \quad (8.8)$$

Усилия в мембране от снеговой нагрузки (рис. 8.2, в), нормальная к поверхности составляющая которой распределена по закону

$$p = q \left[ 1 + k \left( 1 - \frac{x}{a} \right) \right] \cos \varphi; \quad (8.9)$$

$$N_1 = \frac{qx}{2 \sin \varphi} \left[ 1 + k \left( 1 - \frac{2x}{3a} \right) \right]. \quad (8.10)$$

Кольцевое усилие определим по формуле (8.8) с подстановкой  $p$  и  $N$  по (8.1).

Перемещение оболочки по нормали  $w$  [3] от действия равномерно распределенной нагрузки

$$w = \frac{a^4}{4f^2} \frac{q}{Et} \left[ \nu \left( 1 - \frac{\cos \varphi}{\cos \alpha} + \frac{1}{2 \cos^2 \varphi} \right) - \frac{3}{4 \cos \varphi} - \frac{\cos \varphi}{4 \cos^2 \alpha} + \frac{1}{2 \cos^2 \varphi} \right] \quad (8.11)$$

Стрелка перемещения в середине оболочки при  $\varphi = 0$  будет равна:

$$w = \frac{a^4}{4f^2} \frac{q}{Et} \left[ \nu \left( \frac{3}{2} - \frac{1}{\cos \alpha} \right) - \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{1}{\cos^2 \alpha} \right) \right]. \quad (8.12)$$

### Пример 10

Рассчитайте мембранное покрытие диаметром 200 м в форме гиперболического параболоида. Район строительства – Москва. Материал покрытия – сталь С235. Стрела провеса мембраны принята 12 м.

1. Подсчет нагрузок (табл. 3.).

Таблица 3

| Состав покрытия   | Нормативная нагрузка, кН/м <sup>2</sup> | Коэффициент надежности по нагрузке | Расчетная нагрузка, кН/м <sup>2</sup> |
|---|---|------------------------------------|---------------------------------------|
| <i>Постоянная нагрузка</i>  |   |                                    |                                       |
| Гидроизоляция (трехслойный рулонный ковер)                                  | 0,1                                     | 1,3                                | 0,13                                  |
| Цементная стяжка 2 см, плотностью 1800 кг/м <sup>3</sup>                    | 0,36                                    | 1,3                                | 0,468                                 |
| Теплоизоляция (пенобетон толщиной 12 см, плотностью 600 кг/м <sup>3</sup> ) | 0,60                                    | 1,2                                | 0,72                                  |

Окночание табл. 3

| Состав покрытия  | Нормативная нагрузка, кН/м <sup>2</sup> | Коэффициент надежности по нагрузке | Расчетная нагрузка, кН/м <sup>2</sup> |
|--|---|------------------------------------|---------------------------------------|
| Стальная мембрана толщиной 6 мм (плотностью стали 7850 кг/м <sup>3</sup> ) | <i>Постоянная нагрузка</i>              |                                    |                                       |
|  | 0,471                                   | 1,1                                | 0,518                                 |
| <i>Итого</i>   | 1,531                                   | –                                  | 1,836                                 |
| Снеговая нагрузка для III района   | 2,531                                   | 1,0                                | 1,4                                   |
| Итого  |   | 1,4                                |                                       |

2. Определим усилия в средней части мембраны на окружности радиусом 15 м.

Предварительно находим геометрические характеристики мембраны по формулам:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \cdot 12}{100^2} 15 = 0,036; \quad \sin \varphi = \frac{0,036}{\sqrt{1 + 0,036^2}} = 0,036;$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,036^2}} = 1.$$

Радиусы кривизны

$$R_1 = \frac{\left[ 100^4 + (2 \cdot 12 \cdot 15)^2 \right] \sqrt{1 + \left( \frac{2 \cdot 12 \cdot 15}{100^2} \right)^2}}{2 \cdot 12 \cdot 100^2} = 417,47 \text{ м};$$

$$R_2 = 15 / 0,036 = 416,67 \text{ м}.$$

3. Рассмотрим расчет покрытия только при первом варианте его загрузки снеговой нагрузкой (см. рис. 8.2), т.е. принимая ее равномерно распределенной по всему покрытию. Полная (постоянная и временная) расчетная нагрузка будет равна  $p = q \cos \varphi = 3,236 \text{ кН/м}^2$ . Нормальную к поверхности мембраны

составляющую внешней нагрузки определим по формуле  $p = q \cos \varphi \approx q = 3,236 \text{ кН/м}^2$ .

Меридиональное и кольцевое усилия найдем по формулам (8.7), (8.8):

$$N_1 = qx / (2 \sin \varphi) = 3,236 \cdot 15 / (2 \cdot 0,036) = 674,17 \text{ кН/м};$$

$$N_2 = \left( p - \frac{N_1}{R_1} \right) R_2 = \left( 3,236 - \frac{674,17}{417,47} \right) 416,67 = 675,47 \text{ кН/м}.$$

В данном примере можно было сразу найти  $N_1$ ,  $N_2$ , поскольку радиусы кривизны приблизительно равны:

$$R_1 \approx R_2 = R_{\max} = 417,47 \text{ м}.$$

Тогда в соответствии с уравнением Лапласа

$$N_1 \approx N_2 = pR_{\max} / 2 = 3,236 \cdot 417,47 / 2 = 675,47 \text{ кН/м}.$$

4. Определим усилия в районе кольца мембраны, для чего повторим все вычисления при  $x = 100 \text{ м}$ . Будем иметь:

$$\operatorname{tg} \varphi = 0,24; \quad \sin \varphi = 0,2334; \quad \cos \varphi = 0,9724; \quad p = 3,15 \text{ кН/м}^2;$$

$$R_1 = 453,18 \text{ м}; \quad R_2 = 428,45 \text{ м}; \quad N_1 = 674,81 \text{ кН/м}; \quad N_2 = 711,63 \text{ кН/м}.$$

5. Найдем толщину мембраны по наибольшему усилению  $N_2 = 711,63 \text{ кН/м}$ ;  $t \geq N_2 / (R_y \gamma_c) = 711,63 / (23 \cdot 0,8 \cdot 100) = 0,387 \text{ см}$ . Назначаем толщину мембраны 4 мм.

6. Проверим прочность мембраны по приведенным напряжениям:

$$\sigma_1 = N_1 / t = 674,81 / (0,4 \cdot 100) = 16,87 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_2 = 711,63 / (0,4 \cdot 100) = 17,79 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_{np} = \sqrt{16,87^2 - 16,87 \cdot 17,79 + 17,79^2} = 17,35 \text{ кН/см}^2 < 23 \cdot 0,8 = 18,4 \text{ кН/см}^2.$$

7. Определим по формуле (8.9) перемещение оболочки в середине пролета от нормативной нагрузки:

$$w = \frac{10000^4}{4 \cdot 1200^2} \frac{1 \cdot 10^{-4}}{21000 \cdot 0,4} \left[ 0,3 \left( \frac{3}{2} - \frac{1}{0,9724} \right) - \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{1}{0,9724^2} \right) \right] = -7,7 \text{ см},$$

что значительно меньше величины  $1/200$ .

Малая величина перемещения оболочки объясняется тем, что оно вызвано снеговой нагрузкой с таким же законом распределения ее по покрытию, как и постоянная нагрузка, поэтому обусловлено лишь упругими деформациями без кинематических перемещений. Перемещение оболочки от нагрузки, расположенной на части перекрытия, может быть существенно большим, поэтому на стадии рабочего проектирования следует оценить деформативность покрытия при всех возможных видах загрузки его снеговой нагрузкой, что можно сделать на основе численных расчетов.

#### **8.4. Шатровые мембраны**

Шатровые мембраны, как и шатровые покрытия с гибкими нитями, имеют центральную опору, на которую опирается внутреннее кольцо. Опору выполняют из толстостенной железобетонной трубы большего диаметра или из расположенных по кругу стоек, объединенных ригелями. К стальному кольцу крепят мембрану. В направлении меридиана оболочке придают форму кубической параболы:

$$z = x \operatorname{tg} \beta + \frac{8}{3} \frac{f}{a} x \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} \right), \quad (8.13)$$

для чего длины исходных заготовок для направляющих монтажных элементов принимают равными

$$L \approx a \left[ 1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \beta}{2} + \frac{128}{45} \left( \frac{f}{a} \right)^2 \right]. \quad (8.14)$$

Приводим приближенный метод расчета [3]:

1. Подсчет нагрузок  $g, p$ .
2. Задаемся стрелой провеса:  $f = (1/20 \dots 1/25)a$ .
3. Определяем геометрические характеристики поверхности (рис. 8.3):

$$\operatorname{tg} \varphi = z' = \operatorname{tg} \beta + \frac{8f}{3a} \left[ 1 - 3 \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]; \quad (8.15)$$

$$\sin \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}; \quad \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} \quad (8.16)$$

4. Радиусы кривизны в меридиональном и кольцевом направлениях равны:

$$R_1 = \frac{\left[ 1 + (z')^2 \right]^{3/2}}{z''} = \frac{a^3 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{16fx} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}; \quad (8.17)$$

$$R_2 = x / \sin \varphi;$$

если  $h/a < (16/3) \left( \frac{f}{a} \right)$ . (8.18)

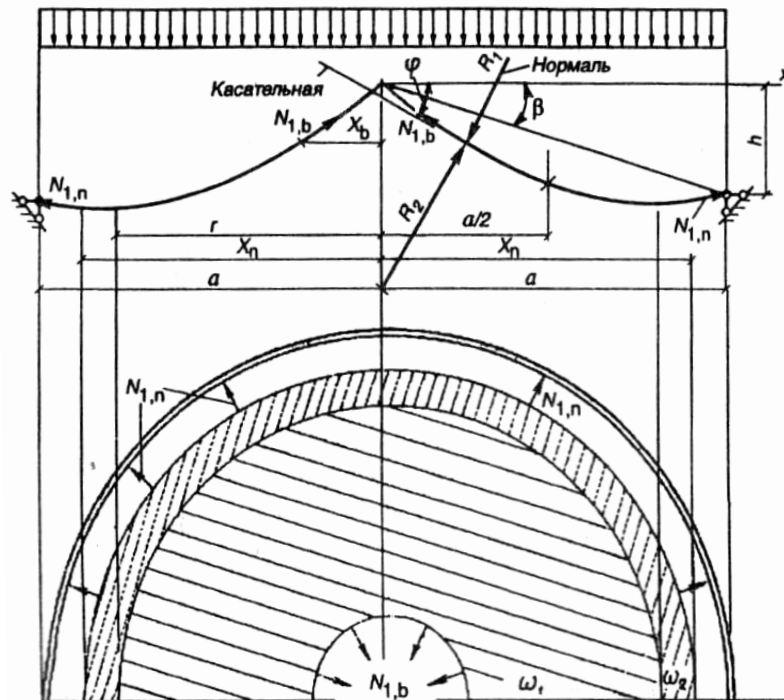


Рис. 8.3. Расчётная схема шатровой мембраны

Таким образом, оболочка разделится на две части: внутреннюю, передающую свою нагрузку на верхнее кольцо и центральную опору, и наружную, передающую свою нагрузку на нижнее

кольцо и колонны. На рис. 8.3 эти области выделены соответственно редкой и частой штриховками. Граница разделения может быть определена из выражения (8.18) при  $\operatorname{tg}\varphi = 0$ , т.е.:

$$x = r = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{4}{3} + \frac{\operatorname{atg}\beta}{2f}}. \quad (8.19)$$

Дальнейший расчет производят отдельно для внутренней и наружной частей мембраны.

При расчете внутренней части мембраны или покрытия в целом, если выполняется условие (8.17), нагрузку с площади  $\omega_1$  (или со всего покрытия) передают на центральную опору с помощью меридиональных усилий, при этом меридиональное усилие

$$N_1 = \frac{q(r^2 - x_b^2)}{2x_b \sin \varphi}. \quad (8.20)$$

В наружной части мембраны при  $r < x_n < a$  нагрузка с помощью  $\omega_2$  передается на наружное кольцо с помощью также меридиональных усилий в этой части оболочки  $2\pi x_n N_1 \sin \varphi = G = q\pi(x_n^2 - r^2)$ , поэтому

$$N_1 = \frac{q(x_n^2 - r^2)}{2x_n \sin \varphi}. \quad (8.21)$$

Кольцевые усилия в соответствии с уравнением Лапласа

$$p = q \cos \varphi, \quad (8.22)$$

где  $p$  – нормальная составляющая нагрузки и меридиональных усилий в соответствующих частях оболочки:

$$N_2 = \left( p - \frac{N_1}{R_1} \right) R_2. \quad (8.23)$$

### Пример 11

Определите усилия в оболочке шатровой мембраны по данным примера 8 ( $a = 100$  м,  $q = 3,236$  кН/м<sup>2</sup>). Диаметр верхнего опорного кольца 18 м.

1. Назначаем возвышение внутреннего кольца над наружным  $h = 22$  м при стрелке провеса  $f = 6$  м. В соответствии с условием

(8.102) [3] при таких размерах необходимо устраивать внутренний водосток с расположением воронок на границе раздела оболочки на две части. Расстояние этой границы от центра покрытия можно определить по формуле (8.107) [3]:

$$x = r = \frac{100}{2} \sqrt{\frac{4}{3} + \frac{22}{2 \cdot 6}} = 88,971 \text{ м.}$$

2. Определяем усилия во внутренней части мембраны у внутреннего опорного кольца при  $x_b = 9$  м:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \phi + \frac{8f}{3a} \left[ 1 - 3 \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right] = \frac{22}{100} + \frac{8 \cdot 6}{3 \cdot 100} \left[ 1 - 3 \left( \frac{9}{100} \right)^2 \right] = 0,376;$$

$$\sin \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = \frac{0,376}{\sqrt{1 + 0,376^2}} = 0,352;$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = 0,936;$$

$$R_1 = \frac{a^3 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{16fx} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi} = \frac{100^3 (1 + 0,376^2)}{16 \cdot 6 \cdot 9} \sqrt{1 + 0,376^2} = 1411,33 \text{ м};$$

$$R_2 = x / \sin \varphi = 9 / 0,352 = 25,27 \text{ м};$$

$$p = q \cos \varphi = 3,236 \cdot 0,936 = 3,029 \text{ кН/м}^2;$$

$$N_1 = \frac{q(r^2 - x_b^2)}{2x_b \sin \varphi} = \frac{3,236(88,971^2 - 9^2)}{2 \cdot 9 \cdot 0,352} = 4001,41 \text{ кН/м};$$

$$N_2 = \left( p - \frac{N_1}{R_1} \right) R_2 = \left( 3,029 - \frac{4001,41}{1411,33} \right) 25,27 = 4,955 \text{ кН/м.}$$

3. Для определения усилий в наружной части мембраны повторим эти вычисления при  $x = 95$  м. Будем иметь:

$$\operatorname{tg} \varphi = -0,0532; \quad \sin \varphi = -0,0531; \quad \cos \varphi = 0,998;$$

$$R_1 = 110,11 \text{ м}; \quad R_2 = -1788,2 \text{ м}; \quad p = 3,23 \text{ кН/м}^2; \quad N_1 = 351,4 \text{ кН/м};$$

$$N_2 = 16,12 \text{ кН/м.}$$

По этим условиям надо подобрать толщины листов мембраны для ее внутренней и наружных частей, а также запроектировать кольца. Этот компоновочный расчет может быть уточнен на основе численных методов.



4. Толщина мембраны по наибольшему усилению

$$t = N_1 / R_y \gamma_c;$$

$$R_y = 36 \cdot 0,8 = 28,8 \text{ кН/см}^2;$$

$$t = 4001,41 / 28,8 \cdot 100 = 1,39 \text{ см}; t = 14 \text{ мм}.$$

Следует использовать сталь повышенной прочности, например 18Г2 с  $R_y = 41 \text{ кН/см}^2$ ;  $\gamma_c = 0,85$

$$t = 4001,41 / 41 \cdot 0,85 \cdot 100 = 1,128 \text{ см (принимаем 12 мм)};$$

$$\sigma_1 = N_1 / t100 = 4000 / 1,2 \cdot 100 = 33,34 \text{ кН/см}^2 < R_y \gamma_c;$$

$$\sigma_2 = N_2 / t100 = 0,041 \text{ кН/см}^2.$$

5. Проверка прочности мембраны по приведенным напряжениям:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 - \sigma_2^2} = \sqrt{33,34^2 - 33,34 \cdot 0,041 + 0,041^2} = 33,32 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_{np} = 33,32 < R_y \gamma_c = 34,85 \text{ кН/см}^2.$$

### Пример 12

Определим усилия в стальной мембране.

Расчет мембраны в виде параболоида вращения (рис. 8.4) может иметь некоторые различия в зависимости от принятых упрощений.

1. Расчет выполняется на безмоментной линейной теории С.П. Тимошенко.

2. Расчетная нагрузка  $g = 3,5 \text{ кН/м}^2$ .

3. Значение  $a = 102 \text{ м}$ ; принята стрелка провеса:

$$f = t(1/16)d = 204/16 = 12,5 \text{ м}.$$

4. Геометрические параметры мембраны:  $\text{tg} \varphi = fx / a^2$ ;

$$\sin \varphi = \text{tg} \varphi / \sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi};$$

где  $a = 0,5l$ ,  $x$  – расстояние до сечения оси (при  $x = 14 \text{ м}$  – средняя часть мембраны),  $\text{tg} \varphi = 0,03364$ ;  $\sin \varphi = 0,033622$ ,  $\cos \varphi = 1$ .

5. Радиусы кривизны поверхности мембраны

$$R_1 = \frac{[a^4 + (2fx)^2] \sqrt{1 + (2fx/a^2)^2}}{2f/a^2};$$

$$R_1 = \frac{[102^2 + (2 \cdot 12,5 \cdot 14)^2] \sqrt{1 + (2 \cdot 12,5 \cdot 14 / 102)^2}}{2 \cdot 12,5 / 102^2};$$

$$R_2 = x / \sin \varphi = 14 / 0,033622 = 416,394 \text{ м.}$$

Меридиональные усилия

$$N_1 = qx / 2 \sin \varphi = 728,689 \text{ кН/м.}$$

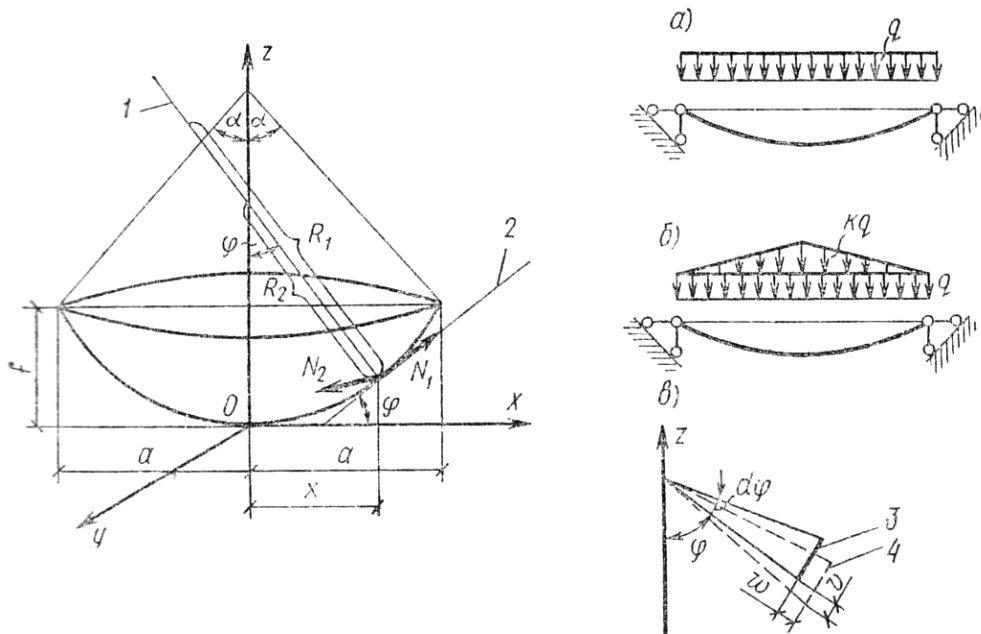


Рис. 8.4. Параболоид вращения: а – загрузка постоянной нагрузкой; б – то же, снеговой; в – деформация оболочки после нагружения; 1 – нормаль; 2 – касательная; 3 – оболочка до деформации; 4 – то же, после деформации

6. Определяем усилия  $N_1$ ,  $N_2$  опорного кольца по тем же формулам при  $x=a=102$  м, соответственно

$$\operatorname{tg} \varphi = 0,245098; \sin \varphi = 0,238052, \cos \varphi = 0,971252.$$

По тем же формулам получаем  $R_1 = 454217$  м;  $R_2 = 428,477$  м.

Составляющая нагрузки нормальная к поверхности мембраны

$$p = q(1 + \kappa(1 - x/a)) \cos \varphi; \quad p = 3,399 \text{ кН/см}^2.$$

7. Усилия высчитывают по формулам (8.21) и (8.23):

- меридиональное:  $N_1 = 749,836$  кН/м;
- кольцевое:  $N_2 = 749,215$  кН/м,

т.е.  $N_1 \approx N_2$ , следовательно, вся мембрана испытывает почти одинаковые усилия (напряжения) и может быть выполнена из листов одной толщины.

При  $R_y \gamma_c = 23 \cdot 0,8 = 18,4 \text{ кН/см}^2$ ,  $t^{mp} = N_1 / 18,4 \cdot 100 = 0,41 \text{ см}$   
 принимаем толщину листа  $t = 5 \text{ мм}$ .

Напряжения в металле  $\sigma = 14,5 \text{ кН/см}^2 < R_y \gamma_c$ .

Прогиб в середине пролета

$$w = \frac{a^4 q}{4f^2 Et} \left[ v \left( \frac{3}{2} - \frac{1}{\cos \alpha} \right) - \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{1}{\cos^2 \alpha} \right) \right];$$

$$v = 0,3, \sin \alpha = a / R_2 = 0,2318; \cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = 0,9727;$$

имеем:  $w = 21,54 \text{ см}$ ;

$$w / 2a = 1 / 887 < \frac{1}{200} \text{ или } w = 21,5 \text{ см} < \frac{1}{200} 2a = \frac{204}{200} \approx 1,0 \text{ м.}$$

Покрытие обладает достаточной жесткостью.

## 9. Техничко-экономические показатели висячих покрытий

Выбор типа покрытия выполняют сравнением ТЭП не менее трех – четырех вариантов решения покрытия.

По данным проектных организаций и анализа показателей построенных сооружений относительная стоимость висячего покрытия стадиона на овальном плане составляет:

- а) 58 % стоимости сборной железобетонной оболочки;
- б) 42 % стоимости покрытия по стальным аркам;
- в) 37 % стоимости решётчатого стального покрытия.

На рис. 9.1 даны усреднённые относительные расходы стали и бетона для трёх видов покрытий.

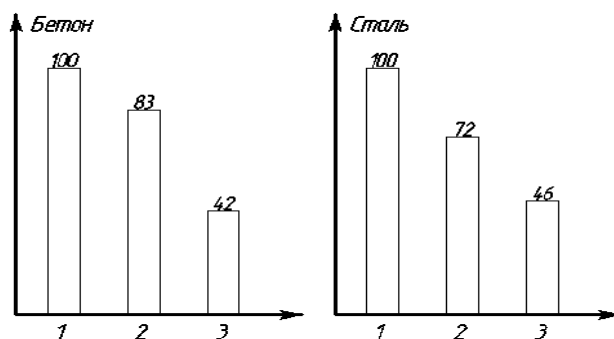


Рис. 9.1. Относительный расход бетона и стали: 1 – покрытие из типовых балочных элементов; 2 – покрытие из сборных железобетонных сводов-оболочек; 3 – висячее покрытие

По данным «Киев ЗНИИЭП» для крытых рынков на 300–400 торговых мест строительный объем на одно место составляет:

- висячие покрытия на круглом плане –  $55 \text{ м}^3$ ;
- купольные покрытия на круглом плане –  $56 \text{ м}^3$ ;
- висячие покрытия на прямоугольном плане –  $60,2 \text{ м}^3$ ;
- покрытия из типовых конструкций на прямоугольном плане –  $67,7 \text{ м}^3$ . На рис. 9.2, 9.3 приведен расход стали и бетона для различных систем покрытий общественных зданий.

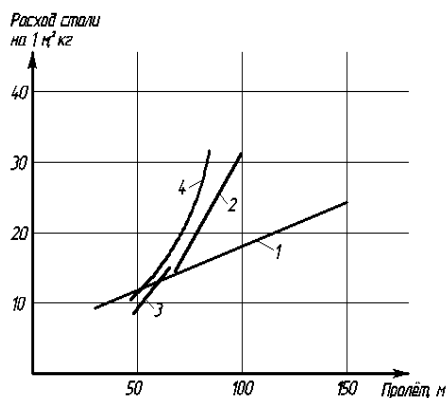


Рис. 9.2. Расход стали на  $1 \text{ м}^2$  пола для различных систем покрытий общественных зданий: 1 – висячие покрытия на криволинейном контуре; 2 – железобетонные оболочки; 3 – балочные железобетонные конструкции; 4 – покрытия по стальным фермам

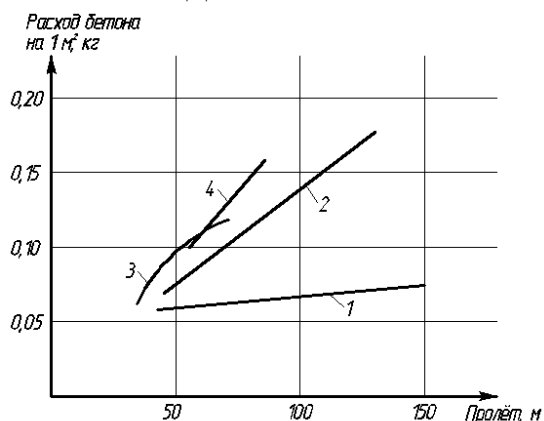


Рис. 9.3. Расход бетона на  $1 \text{ м}^2$  пола для различных систем покрытий общественных зданий: 1 – висячие покрытия на криволинейном контуре; 2 – железобетонные оболочки; 3 – балочные железобетонные конструкции; 4 – покрытия с железобетонными плитами

Из графиков следует, что:

- с увеличением пролётов зданий вдвое для различных типов, кроме висячих покрытий, расход бетона и стали растёт почти пропорционально: на 1 см приведённой толщины бетона расход стали составляет (округлённо) 1 кг, а для висячих покрытий – значительно меньше;

- при увеличении пролётов висячих покрытий расход стали возрастает от 10 до 45 кг на  $1 \text{ м}^2$ , а приведённая толщина бетона – от 6 до 25 см, что существенно ниже, чем для других видов покрытий;

- с возрастанием пролёта висячих покрытий в 6 – 8 раз расход стали и бетона увеличивается лишь в 3 – 4 раза; при этом в зданиях

на круглом и овальном плане расход материалов в среднем в 2 раза меньше, чем для зданий такой же площади с прямоугольным планом;

- расход стали для висячих покрытий и сферических куполов (монолитных) при диаметре от 30 до 192 м составляет от 7–10 до 31–34 кг/м<sup>2</sup>, что меньше, чем для других типов покрытий;

- расход стали на мембранные покрытия составляет 17,5–56 кг/м<sup>2</sup>; на стальные сферические купола 28,3 – 82 кг/м<sup>2</sup>; для ферм из проката, расположенных радиально (при круглом плане и центральной колонне), – 41–196 кг/м<sup>2</sup>.

Из приведённых данных следует:

- здания с висячими покрытиями на криволинейном плане (круглом, овальном) имеют расход стали и бетона на 20 – 30 % меньше, чем при других видах покрытий;

- висячие покрытия имеют меньший собственный вес по сравнению с другими решениями;

- стоимость сооружения с учётом стоимости инженерного оборудования снижается на 5 – 15 %;

- сроки строительства сокращаются по сравнению с балочными конструкциями, оболочками за счёт упрощения производства работ по возведению покрытия – наиболее трудоёмкой части зданий.

Выше указывалось два основных недостатка висячих покрытий, однако их применение рационально особенно для больших пролётов.

### **Заключение**

В методических указаниях рассмотрены основные виды висячих систем, дан порядок их расчета с последующим рассмотрением конкретных примеров.

Стоит подчеркнуть, что сложные висячие системы при детальном проектировании следует рассчитывать, используя программные комплексы. Однако и в этом случае для получения характеристик жесткости целесообразно использовать приведенную методику расчета и практические рекомендации.

## Приложение

Таблица ПП

| <i>Канаты стальные для висячих покрытий</i>                                   |  |                                   |  |  |                                   |
|---|--|-----------------------------------|--|--|-----------------------------------|
| Диаметр каната, мм  | Расчетная площадь сечения всех проволок, мм <sup>2</sup> | Расчетная масса 1000 м каната, кг | Диаметр каната, мм                                 | Расчетная площадь сечения всех проволок, мм <sup>2</sup> | Расчетная масса 1000 м каната, кг |
| <i>Канаты одинарной свивки типа ТК (<math>k_p = (0,81 \dots 0,85)</math>)</i> |  |                                   |  |  |                                   |
| 12/1,7*   | 84,26  | 719                               | 20/2,8*  | 228,74   | 1956                              |
| 12,5/1,8  | 94,44  | 806                               | 21/3   | 262,51   | 2240                              |
| 14/2  | 116,89   | 993,6                             | 22,5/3,2   | 298,52   | 2550                              |
| 15,5/2,2  | 141,37   | 1200                              | 24/3,4   | 337,03   | 2875                              |
| 17/2,4  | 168,17   | 1425                              | 27/3,8   | 420,84   | 3590                              |
| 18,5/2,6  | 197,29   | 1685                              | <i>Конструкции 1×37(1+6+12+18) по ГОСТ 3064-80</i> |  |                                   |
| <i>Канаты двойной свивки типа ЛК-РО <math>k_p = (0,75 \dots 0,80)</math></i>  |  |                                   |  |  |                                   |
| <i>7669-80</i>  |  |                                   |  |  |                                   |
| 28  | 373,25   | 3495                              | 45,5   | 991,84   | 9045                              |
| 30  | 422,76   | 3890                              | 49   | 1163,04  | 10600                             |
| 32,5  | 487,48   | 4445                              | 52   | 1304,05  | 11850                             |
| 25,5  | 580,11   | 5290                              | 57   | 1520,73  | 13900                             |
| 36,5  | 646,37   | 5895                              | 61,5   | 1782,25  | 16250                             |
| 39  | 716,29   | 6530                              | 64   | 1880,27  | 17148                             |
| 41  | 796,83   | 7265                              | 68   | 2058,71  | 18775                             |
| 42  | 843,90   | 7965                              | 72   | 2316,38  | 21125                             |

| Канаты двойнойсвивки типа ЛК-РО<br>$k_p = (0,81 \dots 0,85)$ |         | Конструкции $6 \times 19(1+6+6/6+14)+7 \times 7(1+6)$<br>по ГОСТ 14954-80 |         |
|--|---------|---|---------|
| 8  | 29,68   | 23  | 247,17  |
| 8,8  | 35,7    | 25  | 279,27  |
| 9,7  | 42,3    | 27  | 337,27  |
| 11   | 53,58   | 29,5  | 404,55  |
| 12   | 61,92   | 31  | 449,85  |
| 12,5   | 70,91   | 33  | 497,7   |
| 14   | 86,36   | 36  | 589,81  |
| 15   | 100,48  | 38,5  | 674,88  |
| 16,5   | 121,24  | 41  | 768,45  |
| 18   | 143,99  | 46,5  | 988,71  |
| 19   | 165,68  | 49,5  | 1117,11 |
| 20,5   | 192,11  | 55  | 1379,27 |
| 22   | 217,06  |   |         |
| Канаты закрытые несущие ( $k_p = 1$ )                        |         | По ГОСТ 7676-73   |         |
| 50   | 1713,8  | 60  | 2408,69 |
| 52   | 1846,16 | 65  | 2763,97 |
| 54   | 1988,1  | 70  | 3231,84 |
| 55   | 17280,6 |   |         |

Примечания: 1. Канаты типа ТК – с точечным касанием проволок.

2. Канаты типа ЛК – с линейным касанием проволок.

3. Обозначения О, Р означают соответственно, что проволоки в слоях каната одинакового или разного шага.

4. Цифровое обозначения, например 1 x 37 (1+ 6 + 12 + 18), раскрывает количество проволок в канате и формулу размещения проволок.

5. Для канатов ТК, ЛК-РО, ЛК-Р временное сопротивление проволок каната разрыву составляет  $R_{u,n} = 117,6; 137,2; 156,8; 166,6; 176,4; 186,2; 196 \text{ кН/см}^2$ . Для закрытых канатов  $R_{u,n} = 107,8; 117,6; 127,4 \text{ кН/см}^2$ .

6. Коэффициент  $k_p$  учитывает понижение разрывного усилия каната по отношению к суммарному разрывному усилию проволок.

Таблица П2

Арматурная сталь периодического профиля по ГОСТ 5781-75 для вязких покрытий

| Номинальный диаметр, мм | Площадь поперечного сечения, см <sup>2</sup> | Масса 100 м стали, кг | Номинальный диаметр, мм | Площадь поперечного сечения, см <sup>2</sup> | Масса 100 м стали, кг |
|-------------------------|--|-----------------------|-------------------------|--|-----------------------|
| 16                      | 2,011  | 157,8                 | 28                      | 6,158  | 483,4                 |
| 18                      | 2,545  | 199,8                 | 32                      | 8,042  | 631,3                 |
| 20                      | 3,142  | 246,6                 | 36                      | 10,18  | 799                   |
| 22                      | 3,801  | 298,4                 | 40                      | 12,56  | 987                   |
| 25                      | 4,909  | 385,3                 |                         |  |                       |

Таблица П3

Невитые канаты из проволок диаметром 5 мм

| Марка невитого каната | Количество проволок в канате, шт. | Диаметр каната по диагонали, мм | Расчетная площадь сечения, см <sup>2</sup> | Нормативное суммарное разрывное усилие, кН | Агрегативное разрывное усилие, т | Масса 1 м каната, кг |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--|--|----------------------------------|----------------------|
| МП 19-5               | 19                                | 25                              | 3,75                                       | 667  | 644                              | 3,02                 |
| МП 37-5               | 37                                | 35                              | 7,25                                       | 1260                                       | 1223                             | 5,84                 |
| МП 61-6               | 61                                | 45                              | 11,95                                      | 2032                                       | 1998                             | 9,85                 |
| МП 91-5               | 91                                | 55                              | 17,84                                      | 3034                                       | 2977                             | 14,3                 |
| МП 127-5              | 127                               | 65                              | 24,89                                      | 4202                                       | 4159                             | 20,35                |
| МП 169-5              | 169                               | 75                              | 32,34                                      | 5498                                       | 5311                             | 26,5                 |
| МП 217-5              | 217                               | 85                              | 42,58                                      | 7211                                       | 6931                             | 34,97                |



Таблица П4

| <i>Модули упругости канатов</i>  |                             | $E \times 10^5$ кН/см                           |                                 |
|--|-----------------------------|---|---------------------------------|
| Канат  | предварительно<br>вытянутых | подвергнутых<br>технологическим<br>воздействиям | технологическим<br>воздействиям |
| Невитой  | 2                           | 2   | 2                               |
| Семипроволочный  | 1,8                         | 1,8   | 1,8                             |
| Спиральный диаметром<br>до 55 мм   | 1,5...1,7                   | 1,4...1,5                                       | 1,4...1,5                       |
| более 55 мм  | 1,7                         | 1,6   | 1,6                             |
| Спиральный с увеличенными (до 11...12)<br>кратностями свивки диаметром:                      | 1,6                         | 1,5   | 1,5                             |
| до 55 мм   | 1,7                         | 1,6   | 1,6                             |
| более 55 мм  | 1,6                         | 1,5   | 1,5                             |
| Многопрядный   | 1,3...1,5                   | 1,2   | 1,2                             |
| Многопрядный с увеличенными кратностями<br>свивки (прядей – до 14...15, каната – до 10...12) | 1,6                         | 1,4   | 1,4                             |

## Библиографический список

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции. Нормы проектирования. – утв. 1981 – 14 – 08. – М.: Стройиздат, 1988. – 93 с.
2. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия. – 1989. – 01–01. – М.: Стройиздат, 1996. – 87 с.
3. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 2 / В. В. Горев [и др.]. – М.: Высш. шк., 2002. – 424 с. – ISBN 5-06-003698-9.
4. Качурин, В. К. Теория висячих систем / В. К. Качурин. – М.: Гострайиздат, 1962. – 232 с.
5. Кирсанов, Н. М. Висячие и вантовые конструкции / Н. М. Кирсанов. – М.: Стройиздат, 1981. – 217 с.
6. Он же. Висячие покрытия производственных зданий / Н. М. Кирсанов. – М.: Стройиздат, 1990. – 124 с.
7. Он же. Висячие системы повышенной жёсткости / Н. М. Кирсанов. – М.: Стройиздат, 1973. – 150 с.
8. Косенко, И. С. Висячие конструкции покрытий / И. С. Косенко. – М.: Стройиздат, 1966. – 198 с.
9. Лилиев, А. Ф. Методы расчёта пространственных вантовых систем / А. Ф. Лилиев, Е. Н. Селезнёв. – М.: Стройиздат, 1964. – 147 с.
10. Трофимович, В. В. Проектирование предварительно напряжённых вантовых систем / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. – Киев: Будівельник, 1970. – 135 с.
11. Дмитриев, Л. Г. Вантовые покрытия / Л. Г. Дмитриев, А. В. Касилов. – Киев: Будівельник, 1974. – 270 с.
12. Москалёв, Н. С. Конструкции висячих покрытий / Н. С. Москалёв. – М.: Стройиздат, 1980. – 215 с.
13. Рекомендации по проектированию висячих конструкций ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1974. – 52 с.
14. Шимановский, В. Н. Расчет висячих конструкций (нитей конечной жесткости) / В. Н. Шимановский, Ю. В. Смирнов, – Киев: Будівельник, 1973. – 139 с.
15. Шимановский, В. Н. Висячие системы / В. Н. Шимановский. – Киев: Будівельник, 1984. – 201 с.
16. Металлические конструкции: спец. курс / Е. Н. Беленя [и др.]. – М.: Стройиздат, 1991. – 386 с.

17. Рабинович, И. М. Мгновенно-жесткие системы, их свойства и основы расчёта / И. М. Рабинович / Висячие покрытия. – М.: Стройиздат, 1970. – 215 с.

18. Рекомендации по проектированию мембранных покрытий на прямоугольном плане для реконструируемых зданий и сооружений ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1989. – 105 с.

19. *Соббота, З.* Висячие покрытия / З. Соббота. – М.: Стройиздат, 1964. – 215 с.

## Оглавление

|   |           |
|---|-----------|
| Введение.....   | 3         |
| <b>1. Основные положения проектирования</b>             |           |
| <b>висячих покрытий.....</b>                            | <b>4</b>  |
| 1.1 Характеристика висячих покрытий .....               | 4         |
| 1.2. Опорные конструкции покрытий .....                 | 8         |
| 1.3. Материалы.....                                     | 10        |
| 1.4. Нагрузки на висячие покрытия.....                  | 17        |
| 1.5. Основы теории пологой гибкой нити.....             | 19        |
| <b>2. Однопоясные системы висячих перекрытий</b>        |           |
| <b>с параллельными нитями.....</b>                      | <b>21</b> |
| 2.1. Общая характеристика.....                          | 21        |
| 2.2. Расчет системы с параллельными нитями.....         | 27        |
| Пример 1 .....  | 29        |
| Пример 2 .....  | 32        |
| <b>3. Однопоясные системы с радиальными нитями.....</b> | <b>33</b> |
| 3.1. Типы покрытий .....                                | 33        |
| 3.2. Конструкции и расчет опорных колен.....            | 36        |
| 3.3. Расчет вогнутых покрытий                           |           |
| с радиальными нитями.....                               | 39        |
| Пример 3.....   | 40        |
| 3.4. Расчет шатровых покрытий.....                      | 44        |
| Пример 4.....   | 45        |
| <b>4. Висячие покрытия с нитями конечной</b>            |           |
| <b>изгибной жесткости.....</b>                          | <b>47</b> |
| 4.1. Общая характеристика                               |           |
| и конструктивные особенности.....                       | 47        |
| 4.2. Нити, изгибающиеся под действием                   |           |
| постоянной и временной нагрузок.....                    | 48        |
| Пример 5.....   | 49        |
| Пример 6.....   | 51        |
| 4.3. Нити, не испытывающие изгиба                       |           |
| под влиянием постоянной нагрузки.....                   | 51        |
| Пример 7.....   | 52        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5. Двухпоясные системы покрытий.....</b>                       | <b>54</b> |
| 5.1. Общая характеристика и конструктивные особенности.....       | 54        |
| 5.2. Основы расчета двухпоясных систем.....                       | 60        |
| 5.3. Последовательность расчета двухпоясных систем.....           | 61        |
| Пример 8.....   | 64        |
| <b>6. Вантовые предварительно напряженные фермы.....</b>          | <b>69</b> |
| 6.1. Общие сведения.....  | 69        |
| 6.2. Основы расчёта вантовых ферм.....                            | 70        |
| <b>7. Перекрестные системы двоякой кривизны.....</b>              | <b>71</b> |
| 7.1. Компоновка и работа несущих систем.....                      | 71        |
| 7.2. Особенности расчета.....                                     | 73        |
| Пример 9.....   | 74        |
| <b>8. Металлические висячие оболочками мембраны.....</b>          | <b>77</b> |
| 8.1. Конструкция мембран.....                                     | 77        |
| 8.2. Особенности расчета.....                                     | 78        |
| 8.3. Провисающие мембраны   |           |
| на круглом (эллиптическом) плане.....                             | 79        |
| Пример 10.....  | 82        |
| 8.4. Шатровые мембраны.....                                       | 85        |
| Пример 11.....  | 87        |
| Пример 12.....  | 89        |
| <b>9. Техничко-экономические показатели висячих покрытий.....</b> | <b>91</b> |
| Заключение.....   | 93        |
| Приложение.....   | 94        |
| Библиографический список.....                                     | 98        |

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВИСЯЧИХ  
ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕРАМИ РАСЧЕТА

Составители

МИХАЙЛОВ Василий Васильевич

СЕРГЕЕВ Михаил Сергеевич

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой доцент С.И. Рощина

Подписано в печать 31.05.10

Формат 60x84/16. Усл. печ. л.6,04.Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.