

### 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В.Г. Шухов (1853—1939), впервые применивший листовую и полосу сталь в покрытиях павильонов Нижегородской выставки 1896 г., наглядно показал высокую эффективность и широкие возможности использования стали в растянутых несущих элементах большепролетных висячих покрытий. Опередив свое время более чем на пятьдесят лет, он впервые осуществил в построенных им сооружениях предварительное напряжение, предвосхитив таким образом распространенный в настоящее время прием обеспечения жесткости подобных конструкций.

В Советском Союзе и за рубежом построено много общественных зданий с висячими покрытиями. К наиболее выдающимся сооружениям данного типа относятся крытые Олимпийские стадионы и спортивные залы, построенные в Москве и Ленинграде. Накопленный опыт проектирования, возведения и эксплуатации висячих покрытий общественных зданий открывает широкие возможности использования этих прогрессивных конструкций в массовом строительстве производственных зданий с увеличением (36—48 м), средними и большими (более 100 м) пролетами, оснащенными подвесным крановым оборудованием. Однако специфика технологических процессов, для которых предназначены производственные здания, своеобразии планировки, особенно нагрузок и воздействий на несущие конструкции рассматриваемых сооружений предвзвешивают определенные требования к конструктивным решениям покрытий и каркасов с применением висячих элементов различного вида.

С предложениями по использованию висячих конструкций и вантовых ферм для производственных зданий неоднократно выступали в литературе Н.С. Стрелецкий [35] и другие советские ученые и инженеры [14, 20, 36, 44]. В работах, посвященных перспективам развития промышленного строительства, отмечалось, что экономия металла в строительных конструкциях благодаря уточнению и совершенствованию расчетов на прочность традиционных каркасов промышленных зданий в значительной степени исчерпана. В то же время конструкции в большинстве случаев имеют неоправданно большие запасы жесткости.

Переход к использованию тросовых элементов и предварительно напряженных систем открывает возможности для экономии металла в промышленном строительстве без снижения надежности и эксплуатационных качеств сооружений. Проектирование подобных конструкций в разное время велось в институтах: ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова, ЦНИИСК им. А.В. Кучеренко, НИИЖБ, ЛенЗНИИЭП, Ленинградском отделении Промстройпроекта, в Укрпроектстальконструкции и в других институтах. По оригинальным проектам построены и эксплуатируются большепролетные гаражи с висячими и вантовыми покры-

тиями (без подвесных кранов) в Красноярске, Киеве, Новгороде, Ленинграде, покрытия над другими производственными зданиями [4, 8, 16, 20, 21, 28, 37].

За рубежом имеются немногочисленные примеры использования всяких комбинированных конструкций для производственных зданий с подвесным крановым оборудованием. Так, в покрытии бумажной фабрики в Мантуе (Италия) распор от канатов передается на трехпролетную балку жесткости общей длиной 163 м [15]. В покрытии мастерской для ремонта автобусов (пролет 50 м, ГДР) принята схема конструкций с поперечными гибкими двухпоясными фермами и продольными фермами жесткости [3, 52]; в ангаре для самолетов во Франкфурте-на-Майне (ФРГ) имеются два пролета по 135 м, распоры передаются на балансирные устройства [16, 53, 54]. Следует отметить, что проектирование и строительство производственных зданий с несущими всячими и вантовыми элементами как в Советском Союзе, так и за рубежом, находят пока ограниченное применение — в основном в экспериментальных постройках. Одной из причин этого является то, что широкие инженерные круги недостаточно ознакомлены с особенностями всячих конструкций.

В предлагаемой работе разрабатываются общие положения по компоновке, конструированию и обеспечению требуемой жесткости различных видов несущих конструкций производственных зданий с всячими покрытиями при действии на них подвесного кранового оборудования. На начальной стадии проектирования всячих покрытий особое значение приобретает компоновка несущих конструкций — выбор геометрических и физических параметров, установление схемы каркаса, так как от этого во многом зависят экономичность и надежность сооружения.

## 1.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ

Конструктивные решения всячих покрытий над зданиями больших пролетов общественного назначения во многом определяются тем, что в этих сооружениях допускается и используется разнообразная планировка и, в частности, круговая, овальная, и другие очертания в плане с передачей распоров на замкнутые пояса. Производственные же здания в подавляющем большинстве проектируются прямоугольными в плане в соответствии с традиционными схемами технологических процессов, требующих организацию конвейерного производства, размещаемого вдоль цеха и обслуживаемого мостовыми или подвесными кранами. Прямоугольная планировка также наиболее приемлема и с точки зрения поэтапного развития и расширения предприятий пристройкой однотипных, повторяемых конструкций к ранее возведенным корпусам с удлинением технологических линий и увеличением площадей цехов.

Однако прямоугольная планировка не соответствует рациональности конструктивных схем всячих покрытий с замкнутыми анкерными поясами. Использование прямоугольных в плане контуров-рам, воспринимающих распоры, что предложено в некоторых проектах произ-

водственных зданий, ограничено небольшими или средними пролетами (до 60 м), так как с увеличением пролета резко повышается расход материалов на прямоугольный контур в результате возрастания изгибающих моментов в углах прямоугольной рамы и в связи с увеличением расчетных длин сжато-изгибаемых элементов. Кроме этого, если возведение отдельного здания небольшой длины с прямоугольным замкнутым контуром и может быть как-то обосновано, то строительство протяженных и многопролетных зданий, где эти контуры, примыкая сторонами, дублируют один другой, может оказаться неэкономичным.

Прямоугольная планировка производственных зданий определяет конструктивные решения каркаса в виде рам с висячими комбинированными ригелями (рис. 1.1, а) или в виде покрытия, состоящего из висячих ферм с легкими балками жесткости, опертыми на стены (рис. 1.1, б).

В отличие от традиционных каркасов промышленных зданий элементы, входящие в состав рам рассматриваемых типов, не испытывают больших изгибающих моментов. Так, висячие элементы ригелей и вантовые оттяжки основных поперечных конструкций — рам в основном растянуты, колонны — сжаты и воспринимают сравнительно небольшие изгибающие моменты. И лишь балки жесткости ригелей испытывают изгиб или изгиб с дополнительным сжатием. Такое напряженное состояние элементов рамы определяет компактность и экономичность их сечений, а также диктуется принимаемой при расчетах шарнирностью соединений в узлах, которая, в свою очередь, обусловлена малой жесткостью балок и колонн. Исключения могут составлять узлы опирания колонн, где они могут быть жестко заземлены в фундаментах, что может быть принято для обеспечения неизменности сооружения.

Роль балок жесткости в составе висячего комбинированного ригеля рамы не ограничивается функциями распределяющего элемента. Как показали опытное проектирование и экономические исследования, на балки жесткости следует передавать распоры от висячих элементов, так как несмотря на то, что из-за этого балки утяжеляются, внешне безраспорная схема сооружения значительно экономичнее схем с передачей распора через оттяжки на внешние фундаменты. Вместе с продольными балками и связями поперечные балки жесткости образуют балочную перекрестную систему, на которой могут быть размещены технологические трубопроводы и другие производственные коммуникации. Наличие такой системы стержневых элементов облегчает крупноблочный монтаж покрытия. Балки могут быть также использованы как элементы, с помощью которых создается предварительное напряжение покрытия вследствие их выгиба при монтаже.

Продольные балочные элементы — балки крановых путей, продольные вертикальные связи, прогоны следует объединять в единый, работающий на изгиб и, в случае необходимости на осевое сжатие, жесткий элемент. Кроме основных поперечных балок жесткости.

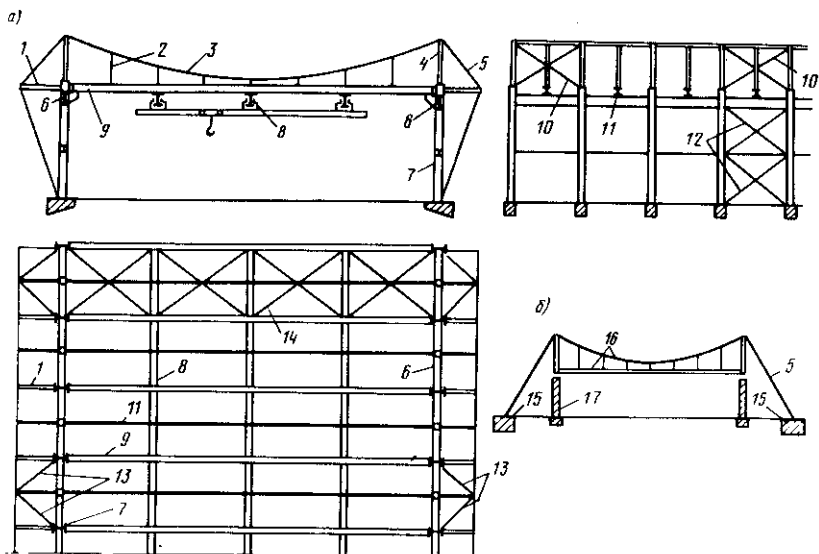


Рис. 1.1. Схемы висячих покрытий производственных зданий

*а* — рама каркасная; 6 — покрытие в виде ферм; 1 — распорка; 2 — подвески; 3 — висячий элемент; 4 — надколонная стойка; 5 — оттяжки; 6 — продольная балка по осям колонн (подстропильная); 7 — колонна; 8 — продольные балки и вертикальные связи между балками жесткости; 9 — балка жесткости; 10 — вертикальные связи между подколонными стойками; 11 — промежуточная балка; 12 — вертикальные связи между колоннами; 13 — горизонтальные связи между распорками; 14 — горизонтальные связи между балками у торца здания; 15 — анкерный фундамент; 16 — ферма; 17 — стена

шарнирно опирающихся на колонны, в покрытии могут быть промежуточные поперечные балки, которые опираются на продольные балки или фермы (типа подстропильных), расположенные по продольным осям сетки колонн (см. рис. 1.1, а).

Как и другие виды конструктивных решений каркасов промышленных зданий, висячие покрытия и каркасы с висячими ригелями нуждаются в устройстве связей. Систему связей в таких сооружениях можно разделить на следующие группы:

вертикальные связи между колоннами. Особенность их в этих каркасах состоит в том, что гибкие колонны при больших высотах сооружения нуждаются в более частом раскреплении их по высоте из плоскости рам, чем в каркасах традиционных схем промышленных зданий (см. рис. 1.1, а);

вертикальные связи между надкровельными участками колонн или между надколонными стойками в случае разрезных по высоте колонн должны обеспечивать устойчивость колонн из плоскости рамы, сжатых вертикальными составляющими от распоров и от усилий в

оттяжках. Продольные распорки этих связей должны быть выполнены из проката, а диагонали могут быть изготовлены из стальных канатов, предварительно напрягаемых при монтаже:

вертикальные продольные связи между балками (или фермами) жесткости, обеспечивающие устойчивость как верхнего, так и нижнего поясов балок жесткости, так как на различных участках пролета при некоторых положениях временной нагрузкой сжатым может быть и нижний пояс;

вертикальные продольные связи между гибкими подвесками, соединяющими балки жесткости и крановые пути с висячими элементами. С помощью этих связей обеспечивается горизонтальная жесткость положения крановых путей подвесных балок при горизонтальных воздействиях кранов и другого подвесного кранового оборудования; поперечные горизонтальные связи между торцевой и соседней с ней балками жесткости, воспринимающие ветровые нагрузки от торцевого фахверка или от полотнищ раздвижных ворот (см. рис. 1.1, а);

горизонтальные связи между сжатыми балками жесткости, а также между распорками и подкосами в системе анкерных конструкций и устройств при передаче распоров на балки жесткости.

Для экономии энергозатрат на отопление помещений цехов в последнее время принимаются меры по уменьшению межферменных объемов проектируемых покрытий. Особенно это касается цехов с покрытиями больших пролетов, крупногабаритная продукция, которых требует устройства больших ворот, что связано со значительными теплопотерями при их открывании и охлаждением больших объемов помещения в зимнее время. Поэтому в последнее время часто проектируется наружное расположение несущих конструкций, а размещение кровельных элементов — на уровне нижних поясов ферм или в уровне затяжек ароч в случае арочного покрытия.

Применительно к висячим покрытиям расположение кровли на уровне верхних поясов балок жесткости наиболее рационально. Наружное расположение висячих несущих элементов здесь более оправдано, чем это имеет место в покрытиях других типов, так как растянутые высокопрочные несущие элементы висячих конструкций имеют компактные сечения, а следовательно, меньше, чем конструкции других типов, располагаемые над кровлей, задерживают снег на покрытии. Для экономии энергозатрат на отопление возможно также устройство холодного, неотапливаемого чердака в мембранных и в других висячих покрытиях. В этом случае кровля будет повторять очертание висячих элементов, а настил подвесного потолка и утеплитель располагаться в уровне балок жесткости.

### 1.3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПРОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Основной, ключевой проблемой, определяющей применение висячих конструкций в качестве надежных несущих элементов большепролетных производственных зданий, является обеспечение такой жест-

кости покрытия, которая требуется для нормальной эксплуатации подвесного кранового оборудования. Почему этот вопрос остро не возникает при проектировании покрытий с несущими конструкциями с обычными фермами из прокатных элементов, а в висячих покрытиях имеет первостепенное значение? Во-первых, в отличие от традиционных конструкций в висячих используются высокопрочные стали в виде канатов или проката, что определяет увеличенные удлинения элементов в соответствии с законом Гука (расчетные сопротивления канатов значительно выше, чем расчетные сопротивления обычной стали, а модуль упругости витых канатов ниже, чем модуль упругости проката). К тому же в составе обычных ферм имеются сжатые элементы, подобранные по условиям устойчивости. В них фактические напряжения от временных нагрузок и деформации ниже тех, что наблюдаются в растянутых элементах висячих конструкций. Во-вторых, в отличие от традиционных ферм висячие элементы — это изменяемые системы, форма равновесия которых зависит от положения местной временной нагрузки. В результате перемещения грузов по пролету и изменения очертания гибкой конструкции возникают дополнительные неупругие прогибы.

Повышенная деформативность, характерная для висячих элементов, может ставить под сомнение рациональность использования их в качестве несущих конструкций для покрытий зданий с подвесными кранами. Однако благодаря мерам по стабилизации этих систем висячие конструкции могут быть успешно внедрены в строительство. Рассмотрим направления конструктивных мер по обеспечению жесткости висячих покрытий на основе анализа деформаций и перемещений гибкой нити как простейшего элемента висячих конструкций.

Как следует из сказанного, дополнительные провесы (прогибы) гибких нитей возникают от: 1) упругих удлинений пологой нити, что определяет наибольшие прогибы в середине пролета висячей конструкции при загрузке всего пролета распределенной временной нагрузкой (рис. 1.2, а); 2) прогибов, вследствие изменения первоначальной формы равновесия при загрузке части пролета временной нагрузкой, особенно такой, которая по характеру загрузки близка к сосредоточенной. Второй, неупругий вид деформаций в литературе называется кинематическими перемещениями. Строго рассуждая, эти перемещения в чистом виде в реальной конструкции выделить невозможно. Любое местное нагружение сопровождается некоторыми упругими удлинениями нити, имеющими второстепенное значение по сравнению с перемещениями, связанными с изменением формы равновесия, поэтому, анализируя конструктивные решения при деформациях под действием местных нагрузок, будем обращать внимание прежде всего на кинематические слагаемые прогибов (рис. 1.2, б, в).

В соответствии с двумя причинами возникновения деформаций различают две группы способов увеличения жесткости, которые могут быть рекомендованы при компоновке проектируемых сооружений.

**Способы повышения жесткости покрытий, связанные с уменьшением упругих удлинений висячих элементов и оттяжек.** Упругие деформации висячих элементов в покрытиях производственных зданий

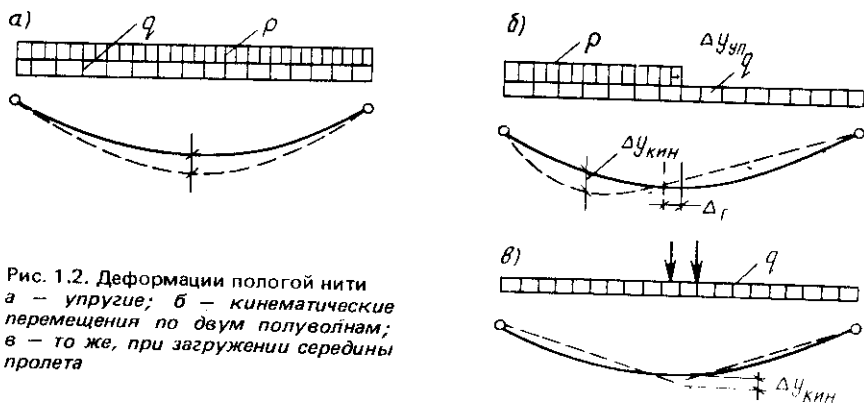


Рис. 1.2. Деформации пологой нити  
 а — упругие; б — кинематические  
 перемещения по двум полуволам;  
 в — то же, при загрузке середины  
 пролета

небольших пролетов (до 60 м) определяют прогибы, по величине преобладающие над прогибами от кинематических перемещений. При расчетном нагружении всего пролета почти вся временная нагрузка передается на параболически очерченный висячий элемент, а балка жесткости принимает на себя менее 5% нагрузки. Таким образом, в качестве расчетной схемы сооружения на начальной стадии компоновки может быть принята гибкая полая нить.

Для оценки количественного значения компоновочных параметров, влияющих на дополнительные провесы нити в результате упругих удлинений, воспользуемся формулой дополнительных провесов пологой нити при загрузке временной нагрузкой всего пролета [13, 15, 21].

$$\Delta y/l = \frac{3}{128} \frac{\rho^H l}{E_k A_k} \frac{L}{l} \frac{l^2}{f^2}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta y/l$  — относительное увеличение начальной стрелы провеса нити, которое в дальнейшем будем называть относительным прогибом покрытия;  $E_k, A_k$  — модуль упругости висячего элемента и площадь его сечения;  $\rho^H$  — нормативная временная нагрузка по пролету нити;  $l$  — приведенная длина нити:

$$L = l \left( 1 + 8 \frac{f^2}{l^2} \right) + 2 \sum l_{от}, \quad (1.2)$$

где  $\sum l_{от}$  — сумма длин оттяжек и анкерных элементов, эквивалентных по жесткости нити в пролете:

$$\sum l_{от} = l_1 \sec^2 \beta_1 \frac{E_k A_k}{E_{\rho 1} A_{\rho 1}} + l_2 \sec^2 \beta_2 \times \frac{E_k A_k}{E_{\rho 2} A_{\rho 2}},$$

где  $\beta_1, \beta_2$  — углы, образованные элементами шпренгельного пояса с горизонтом (рис. 1.3);  $l_1$  — длина горизонтальной распорки;  $E_{\rho 1} A_{\rho 1}, E_{\rho 2} A_{\rho 2}$  — жесткости отрезков оттяжки.

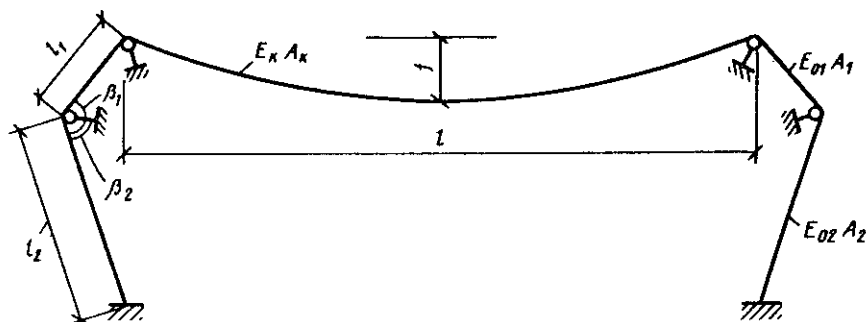


Рис. 1.3. К определению приведенной длины висячего элемента

Из (1.1) видно, что дополнительные провесы прямо пропорциональны упругим деформациям нити и связаны обратной зависимостью со стрелой провеса нити. С этих позиций рассматриваются следующие способы уменьшения упругих прогибов висячих покрытий.

Как следует из (1.1), для повышения жесткости покрытия существенное значение имеет увеличение стрелы провеса несущих элементов. Оптимизационные исследования этого параметра с учетом эксплуатационных расходов на отопление помещения и опыт проектирования подобных сооружений выявили оптимальное значение стрелы провеса для висячих элементов, выполненных из канатов, в пределах  $1/8 \dots 1/10$  пролета, а для элементов из проката, включая стальные мембраны —  $1/16 \dots 1/20$  пролета. При меньших стрелах упругие прогибы в середине пролета увеличиваются, а при больших стрелах провеса начинает резко проявляться вторая причина деформаций висячих систем — кинематические перемещения при загрузке части пролета временной нагрузкой.

В формуле (1.1) имеется параметр, изменением которого можно регулировать прогибы в середине пролета — это приведенная длина нити с учетом оттяжек. Покрытия над производственными зданиями имеют оттяжки большой длины. Чтобы уменьшить упругие прогибы в середине пролета рекомендуется оттяжки выполнять из стальных прокатных профилей или из предварительно напряженных железобетонных элементов.

К мерам, направленным на использование висячих поясов из материалов с повышенным модулем упругости, относится применение пучков с параллельными проволоками или прокатных профилей из высокопрочной стали вместо витых канатов, что способствует уменьшению упругих прогибов покрытия. Применение проката в виде жестких нитей и жестких ферм ограничивается пролетами  $48 \dots 60$  м, так как при больших пролетах монтаж протяженных гибких элементов затруднен — требуется использование крупноразмерных траверс, установка промежуточных стоек при монтаже звеньями и т.п. Последний



способ монтажа использовался на строительстве Олимпийского плавательного бассейна в Москве, где в качестве жестких растянутых элементов были приняты фермы из прокатных профилей.

Во время монтажа фермы этого покрытия по длине пролета были разделены на три монтажные марки, а для того чтобы постоянная нагрузка передавалась только на усиленный верхний пояс и обеспечивалось параболическое очертание осей ферм, нижний пояс их был выключен из работы постановкой болтов в овальные отверстия в монтажных соединениях и в узлах нижнего пояса. К недостаткам использования проката относится также то, что при переменных нагрузках, воспринимаемых конструкциями, необходимо учитывать понижение несущей способности прокатных растянутых элементов из-за возможных концентраций напряжений в сварных заводских и монтажных узлах. В растянутых элементах из проката не допускаются поперечные сварные швы, осевые усадочные напряжения в которых вместе с основными напряжениями растяжения образуют двухосное (плоское) напряженное состояние, чреватое хрупким разрушением. Все это снижает надежность висячих элементов из проката и ограничивает его применение в покрытиях, имеющих подвесное крановое оборудование.

Для покрытий с расположением кровельного настила на канатах возможно предварительное обжатие и омоноличивание сборного настила, т.е. включение его в работу на растяжение совместно с нитями. Для этого на монтаже после навешивания канатов и укладки настила монтируемое покрытие загружается балластной нагрузкой. В результате натяжения и удлинения канатов происходит увеличение промежутков между плитами настила. Эти промежутки под балластной нагрузкой заполняются либо цементным раствором в случае железобетонных плит либо омоноличиваются другими способами при иных типах настила. После снятия балластной нагрузки плиты или элементы коробчатого настила получают сжатие по торцам, параллельным прямолинейным образующим покрытия, которое благодаря обжатию превращается в омоноличенную оболочку, работающую на растяжение и изгиб.

Из экспериментальных исследований покрытий общественных зданий известно, что прогибы омоноличенных конструкций уменьшаются в 5 раз и более при загрузении всего пролета временной распределенной нагрузкой по сравнению с прогибами неомоноличенной конструкции. Загружение того же покрытия местной нагрузкой снижает эффективность омоноличивания более чем в 2 раза. Это свидетельствует о преимущественной работе оболочки на осевое растяжение и в меньшей степени — на ее изгиб.

Прогибы в середине пролета при загрузении временной нагрузкой всего пролета висячей комбинированной конструкции можно уменьшить включением в расчетную схему дополнительного оттяжного (второго) пояса, соединенного с несущим поясом вертикальными или наклонными подвесками и предварительно напряженным усилием, превышающим сжатие от временной нагрузки, т.е. поясом, не выключающимся из работы при максимальном загрузении всего пролета. Этот

способ стабилизации покрытий, связанный с дополнительным расходом канатов, равносильен использованию однопоясной системы с усиленным канатом при искусственно пониженных расчетных сопротивлениях, а следовательно, приводит к увеличению размеров сечения канатов по сравнению с сечением, полученным при расчете на прочность в 4 . . . 15, для проката в 2 . . . 4 раза, что следует из отношения

$$\frac{A_{ж}}{A_{пр}} = \frac{3}{16} \frac{R_k}{E_k} \left[ \frac{l}{\Delta y} \right] \frac{L_0}{l} \frac{l}{f} \frac{p^H}{p+q}, \quad (1.4)$$

где  $A_{ж}$ ,  $A_{пр}$  — площади несущих элементов, определяемые по второй и первой группам предельных состояний;  $[\Delta y/l]$  — предельные прогибы.

Проектировать висячие элементы полностью из канатов и в связи с этим увеличивать расход канатов для обеспечения жесткости покрытия можно лишь при соответствующем экономическом обосновании. Для экономии стальных канатов в зданиях с большой крановой нагрузкой висячие элементы предлагается принимать составными, состоящими из стальных канатов, которые обеспечивают надежность сооружения, и подбираемых по прочности, а также из проката, дополняющего сечение несущего элемента, рассчитываемого по условиям жесткости при загрузке всего пролета временной (крановой) нагрузкой (рис. 1.4, а).

Монтаж такого составного элемента следующий. На установленные и закрепленные временными или постоянными оттяжками колонны навешивают стальные канаты, сечения которых получены из расчета покрытия по прочности, затем на канаты укладывают шарнирно соединенные между собой звенья жесткой нити, рассчитанной как часть составного висячего элемента при расчете покрытия по жесткости. К звеньям жесткой нити крепят подвески, на которые подвешивают монтажные элементы балки жесткости, взаимосоединенные временными монтажными шарнирами. Монтируют элементы покрытия — прогоны, настил, пути движения подвесных кранов, продольные балки и связи. Таким образом на канаты передается максимально возможная часть постоянной нагрузки.

После выверки геометрической схемы провисания канатов и проверки строительного подъема балок жесткости в последних замоноличиваются монтажные шарниры, а на концы балок могут быть переданы осевые усилия от боковых распорок во внешнебезраспорных схемах. Затем в работу составного висячего элемента включается шарнирная цепь жесткой прокатной части нити. Для этого верхний конец проката шарнирно-неподвижно закрепляется на колонне, а на другом конце предусматривается конструкция узла, воспринимающего растяжение прокатной части нити, и обеспечивается выключение ее при сжатии (рис. 1.4, б). Обе части составного висячего элемента соединяют между собой по длине пролета диафрагмами, допускающими осевое скольжение и препятствующими поперечными перемещениями. Временная нагрузка — от снега и кранов будет передаваться на составной элемент,

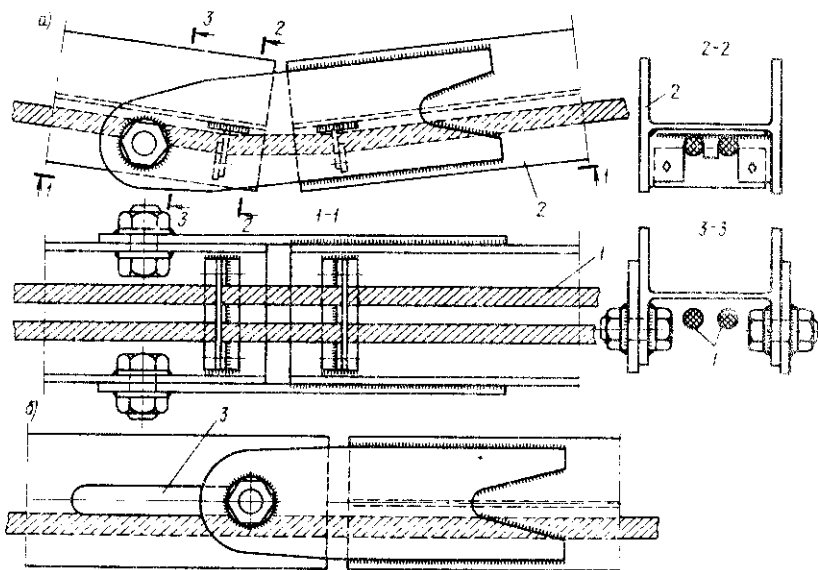


Рис. 1.4. Составной висячий элемент  
*а* — соединение звеньев; *б* — свободное крепление при сжатии составного элемента; 1 — канат; 2 — прокат; 3 — овалный вырез

рассчитанный по требуемой жесткости покрытия при загрузке всего пролета.

На рис. 1.5 представлены зависимости экономической эффективности составных поясов  $m$  от компоновочных параметров, изменяющихся в реальных пределах. Из них видно, что применение составных висячих элементов позволяет снизить стоимость несущего элемента в 2,5–4 раза, обеспечивая высокую надежность покрытия благодаря канатам, подобранным по прочности, уменьшить металлоемкость висячих элементов на 25–50%, сэкономить дефицитные стальные канаты. С помощью канатов, находящихся в сечении составного элемента облегчается его монтаж, так как можно использовать передвижку прокатной части сечения по канатам.

Эффективность составного висячего пояса (см. рис. 1.5) повышается при использовании его в покрытиях с малыми стрелками провеса несущего элемента, при больших временных нагрузках (крановых) и при высоких требованиях к жесткости покрытия.

**Способы обеспечения жесткости, направленные на уменьшение кинематических перемещений висячих элементов.** Эти перемещения — следствие явления, которое не наблюдается при изгибе обычных балочных конструкций. К уменьшению прогибов, возникающих в результате кинематических перемещений, не приложимы меры, принимаемые при проектировании традиционных систем, например, увеличение площади

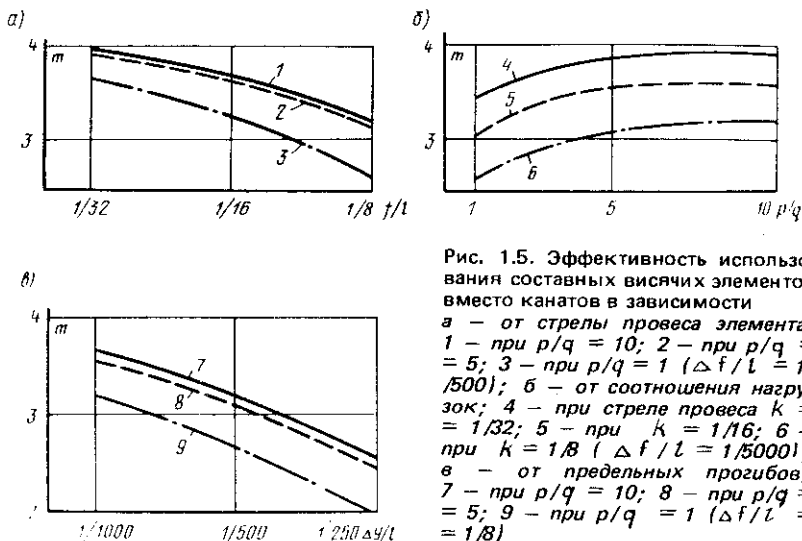


Рис. 1.5. Эффективность использования составных висячих элементов вместо канатов в зависимости  
 а — от стрелы провеса элемента; 1 — при  $p/q = 10$ ; 2 — при  $p/q = 5$ ; 3 — при  $p/q = 1$  ( $\Delta f/L = 1/500$ ); б — от соотношения нагрузок; 4 — при стреле провеса  $K = 1/32$ ; 5 — при  $K = 1/16$ ; 6 — при  $K = 1/8$  ( $\Delta f/L = 1/5000$ ); в — от предельных прогибов; 7 — при  $p/q = 10$ ; 8 — при  $p/q = 5$ ; 9 — при  $p/q = 1$  ( $\Delta f/L = 1/8$ )

поперечного сечения элемента и т.п. Прогобы покрытия, возникающие вследствие изменения начальной формы равновесия при загрузке части пролета висячего элемента временной нагрузкой, не зависят от упругих свойств несущих нитей, они связаны с характером распределения нагрузки по пролету, в то же время они являются функцией отношения временных и постоянных нагрузок и начальной стрелы провеса растянутого элемента.

Для уменьшения кинематических прогибов висячих систем используются способы, основанные на том, что при неравномерном нагружении пролета изменение формы равновесия нити сопровождается горизонтальными перемещениями ее элементарных отрезков. Так, при загрузке половины пролета нить, приспособившись к новой нагрузке, перемещается из незагруженной части пролета в загруженную (см. рис. 1.2, б), что увеличивает провисание нити под грузом, а следовательно, возникают прогибы покрытия на загруженной половине пролета, и в определенных случаях отмечается подъем на незагруженной половине.

Если крановые тележки, находясь в середине пролета, поднимают наибольший груз, то кинематические перемещения висячего элемента в схеме "балка—нить" будут причиной увеличенных прогибов в середине пролета и выгибов балки вверх на боковых участках балки с обеих сторон (см. рис. 1.2, в). Поэтому для уменьшения кинематических перемещений наряду с введением в расчетную схему балок жесткости рекомендуется на нить накладывать связи, препятствующие ее горизонтальным перемещениям.

В комбинированные системы, кроме гибкой нити и балки жесткости, вводят дополнительные усиливающие ванты и узлы, которые

связывают горизонтальные перемещения нити. При этом балка должна иметь хотя бы одну неподвижную опору, фиксирующую горизонтальные перемещения. Подобные усиленные конструкции называются висячими системами повышенной жесткости.

В покрытиях промышленных зданий, испытывающих большие местные воздействия от подвесных кранов, могут найти применение различные схемы повышенной жесткости, которые обеспечивают уменьшение прогибов в четверти пролета или в середине под сосредоточенным грузом, а также универсальные схемы, стабилизирующие покрытие по всему пролету.

*Схема с жестким прикреплением кабеля к балке в середине пролета.* Сохраняя простоту конструктивных узлов, без дополнительных элементов, эта система при загрузке временной нагрузкой половины пролета на 25–35% жестче, чем простейшая система без среднего узла. Однако такая схема при загрузке ее нагрузкой, симметричной относительно середины пролета, испытывает такие же прогибы как и обычная схема без узла. Другой особенностью рассматриваемой системы является возникновение сжатия в балке при загрузке половины пролета со стороны неподвижной опоры. Сжатия можно избежать, если на обоих концах предусмотреть опирания балки, воспринимающие лишь растяжение (рис. 1.6, б) [49]. При этом в отличие от схемы с обычными опорами уменьшаются расчетные напряжения в балке, так как наибольшее растяжение возникает на половине пролета, не загруженной поперечной нагрузкой. Боковые закрепления в местах передачи горизонтальных усилий с балки на внешние фундаменты можно выполнить также в виде гибких предварительно напряженных оттяжек (рис. 1.7), воспринимающих лишь растяжение.

*Двухкабельные системы С.А. Цаплина* — различают две разновидности: с жесткой подвеской в середине пролета (рис. 1.8, а) и без нее (рис. 1.8, б) [41]. Эти системы построены как и предыдущая схема — по принципу изоляции одного полупролета от другого, поэтому загрузка половины пролета временной нагрузкой вызывает упругие прогибы загруженной половины без кинематических перемещений, и при этом наблюдается ограничение прогибов другой половины.

Преимущество двухкабельной системы со средней подвеской перед другими схемами повышенной жесткости состоит в том, что в ней обеспечивается жесткость покрытия при загрузке середины пролета сосредоточенными крановыми нагрузками. При этом составное усиленное сечение висячего элемента следует помещать в верхнем поясе фермы, а нижний пояс может быть выполнен из канатов. Балки жесткости в двухкабельных системах не испытывают осевых усилий, а следовательно, не передают горизонтальных воздействий на колонны.

*Однокабельная схема с вертикальными подвесками, усиленная нисходящими вантами* (рис. 1.9, а). В этой схеме местные воздействия от кранов воспринимаются в основном вантами, которые при продольном движении кранов следует прикреплять к балке в местах подвешивания продольных балок крановых путей. В схеме следует с каждой стороны принимать две-три ванта, так как при большем их числе усложняются

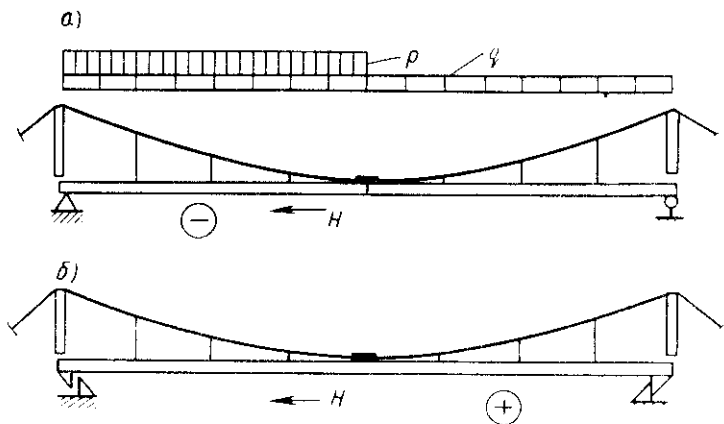


Рис. 1.6. Опираие балок жесткости  
*а* — обычное; *б* — обеспечивающее только осевое растяжение балки

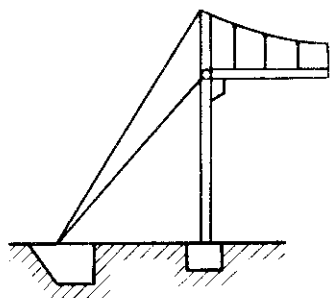


Рис. 1.7. Оттяжки в двух ярусах

конструкции, увеличивается трудоемкость изготовления и монтажа. Жесткость конструкции при изменении числа вант существенно не изменяется. Для исключения сжатия балки при одностороннем нагружении следует также предусматривать концевые опорания балки, воспринимающие лишь растяжение (см. рис. 1.6, б). Горизонтальные усилия от балки жесткости могут быть восприняты через гибкие оттяжки внешними фундаментами (см. рис. 1.7). Схема может быть использована при больших сосредоточенных технологических нагрузках в любых сечениях пролета.

Схема, усиленная восходящими ваннами, показана на рис. 1.9, б. При нагружении половины пролета временными нагрузками такая схема имеет прогибы на 30—40% меньше, чем обычная однокабельная конструкция, так как на канат накладываются горизонтальные связи, препятствующие кинематическим перемещениям. Конструктивная особенность схемы с восходящими ваннами состоит в том, что требуется обеспечивать несдвигаемость узлов в местах крепления вант к основному кабелю. Это достигается одним из следующих способов:

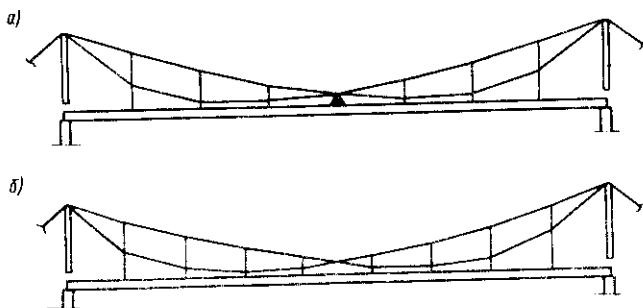


Рис. 1.8. Двухкабельные схемы С.А. Цаплина  
*а – со средней жесткой подвеской; б – без средней подвески*

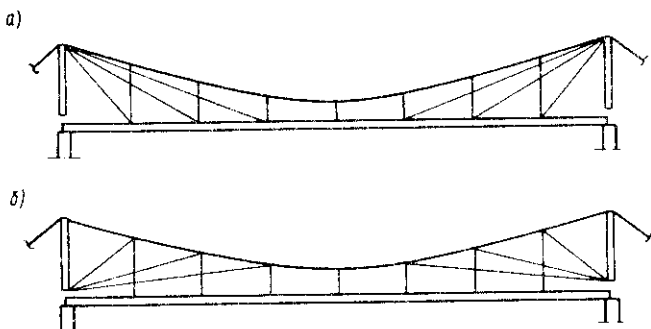


Рис. 1.9. Висячие комбинированные схемы, усиленные вантами  
*а – нисходящими; б – восходящими*

включением в схему так называемого дистанционного каната, который прерывается в каждом узле висячей фермы (рис. 1.10). Площадь сечения дистанционного каната назначается в соответствии с усилием, передаваемым через узел и входит в суммарную площадь сечения основного несущего пояса;

введением конических вкладышей в обжимаемые узлы при числе канатов в поясе не менее двух (рис. 1.11);

увеличением коэффициента трения в узлах за счет фрикционных присыпок на трущиеся поверхности и использованием клеев [21].

*Висячие схемы с треугольной решеткой (рис. 1.12) с нисходящими или восходящими опорными раскосами.* Исследования подобных висячих комбинированных конструкций [34] и их эксплуатация в висячих мостах подтвердили, что такие висячие системы представляют собой наиболее жесткие конструкции при загрузке временной нагрузкой части пролета. Объясняется это наложением горизонтальных связей на канат в каждом узле прикрепления раскосов.

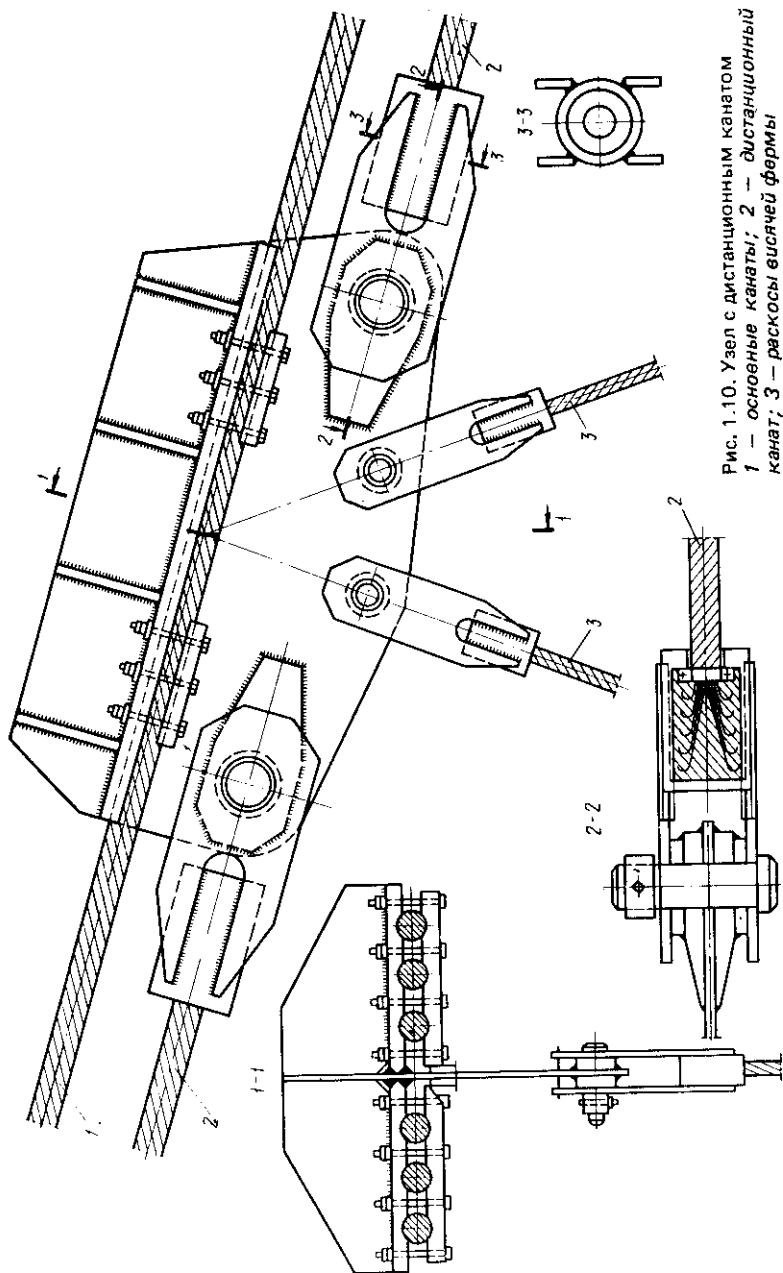


Рис. 1.10. Узел с дистанционным канатом  
 1 — основные канаты; 2 — дистанционный канат; 3 — раскосы висячей фермы



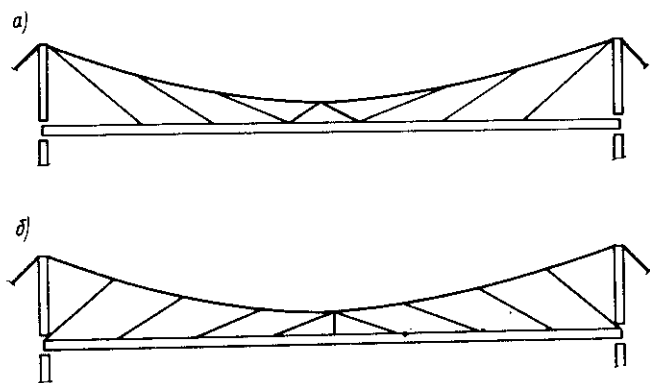
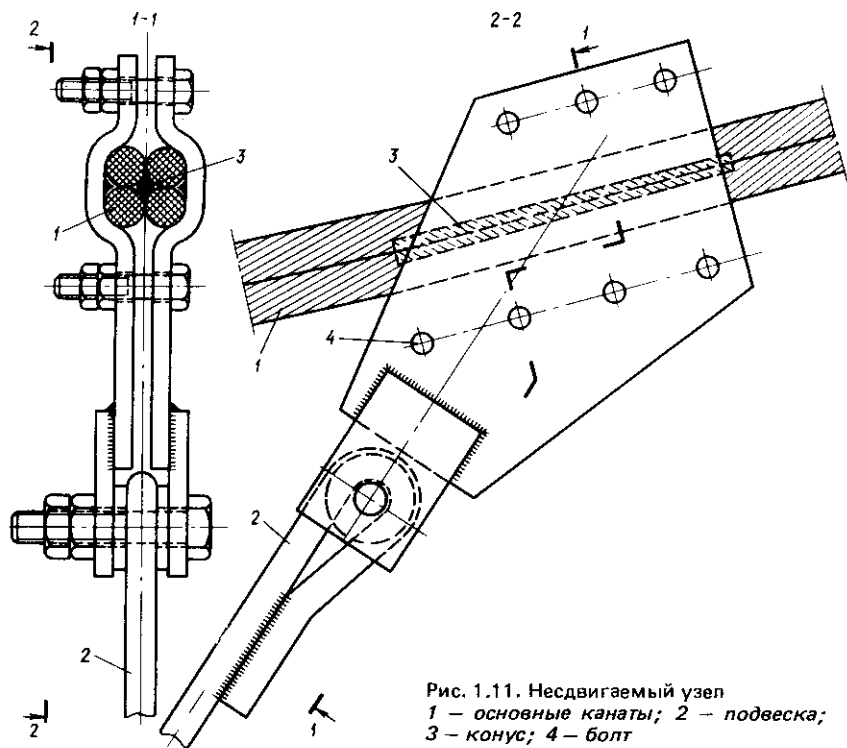


Рис. 1.12. Висячие схемы с треугольными решетками

При поперечном движении кранов (вдоль фермы) возможно, что по расчету некоторые вантовые элементы решетки от временной нагрузки получат сжимающие усилия, однако это сжатие может быть меньше усилий от монтажного натяжения постоянной нагрузкой и предварительным напряжением, для создания которого в схему вводится нижний оттяжной пояс. В случае, если возникает выключение некоторых элементов из работы, то это отражается на понижении жесткости пролетной конструкции.

*Представляет интерес использование в покрытиях производственных зданий вантовых и висячих комбинированных ферм с наклонными вантами-подвесками* (рис. 1.13) [25]. Применение этих схем также основано на принципе наложения горизонтальных связей на гибкую нить в системе "ванты—балка" для уменьшения кинематических перемещений нити и прогибов, которые возникают вследствие свободных горизонтальных перемещений нити или вантовой схемы вдоль пролета.

В общей характеристике всех рассмотренных систем повышенной жесткости следует отметить, что при загрузке временной нагрузкой всего покрытия прогибы в середине пролета всех систем почти одинаковы, так как распор при полном загрузке временной нагрузкой почти не зависит от схемы решетки фермы, а является функцией стрелы провеса висячего элемента. Наличие больших сосредоточенных воздействий от крановых тележек требует обратить особое внимание на применение висячих и вантовых схем, обеспечивающих жесткость при сосредоточенных воздействиях, т.е. на использование двухкабельной системы со средней подвеской, схемы с треугольной решеткой, вантовых ферм и др.

Нельзя признать радикальными такие меры по уменьшению кинематических перемещений как искусственное увеличение постоянной нагрузки или предварительное натяжение оттяжного пояса, если этот пояс соединяется с несущим канатом лишь вертикальными подвесками, хотя некоторое, очень небольшое (до 10—15%) уменьшение кинематических перемещений может наблюдаться. Неэффективность приведенных мер объясняется тем, что в этих схемах не накладываются связи на горизонтальные перемещения основной нити, а действие натягающего нижнего пояса на верхний пояс аналогично приложению постоянной нагрузки. Однако, если оттяжной канат прикрепляется к балке жестким несдвигаемым узлом в середине пролета (рис. 1.14, а) или вертикальные подвески заменяются на треугольную решетку (рис. 1.14, б), то эти схемы также могут быть отнесены к системам повышенной жесткости.

*Особая роль в регулировании кинематических прогибов висячего элемента отводится выбору стрелы его провисания.* На рис. 1.15 сплошной линией показаны кинематические перемещения нити в зависимости от соотношения временной и постоянной нагрузок. Отметим, что кинематические перемещения гибкой нити в противоположность упругим прогибам прямопропорциональны стреле провеса нити и слабо уменьшаются с относительным увеличением постоянной нагрузки. Так, увеличение постоянной нагрузки в 10 раз приводит к уменьшению прогибов лишь в 2 раза.

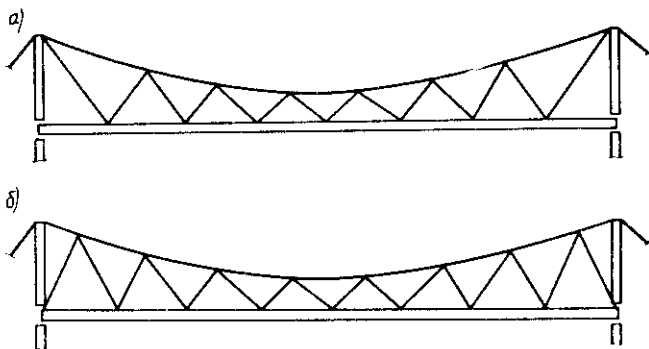


Рис. 1.13. Висячие фермы с наклонными вантами-подвесками

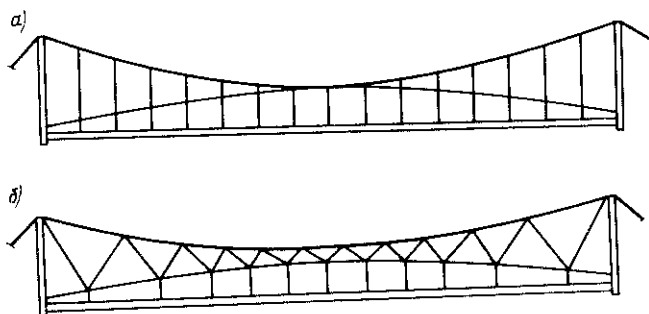


Рис. 1.14. Двухпролетные висячие схемы  
*а* — с жестким узлом в середине пролета; *б* — с треугольной решеткой

На рис. 1.15 пунктиром показаны кинематические перемещения в системе "нить—балка". Однако развитие сечения балок для уменьшения прогибов утяжеляет конструкции покрытия и ведет к неэффективным затратам металла, а главное не достигается тот эффект, который может быть получен наложением горизонтальных связей на висячий элемент, т.е. использованием висячих систем повышенной жесткости.

Отметим, что способы стабилизации покрытий, представленные в двух рассмотренных группах, направлены в основном на уменьшение прогибов, возникающих либо в результате упругих деформаций, либо на снижение кинематических прогибов. Провести же строго это разграничение не представляется возможным, так как каждый из способов может в некоторой степени взаимовлиять один на другой.

Так, например, включение в висячую ферму с вертикальными подвесками дополнительных вант для связывания горизонтальных перемеще-

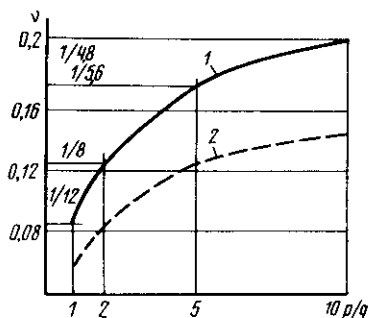


Рис. 1.15. Кинематические перемещения нити в зависимости от стрелы ее провеса  
 1 — перемещения гибкой нити;  
 2 — то же, комбинированной системы "нить — балка"

ний висячего элемента способствует уменьшению кинематических перемещений системы на 30–40%, но одновременно и упругие прогибы в середине пролета уменьшаются до 10% вследствие того, что при полном нагружении ванты принимают на себя некоторую часть временной нагрузки, разгружая основной висячий элемент. То же самое можно сказать и о влиянии омоноличивания швов сборного кровельного настила висячих цилиндрических покрытий и др.

В отдельную самостоятельную группу выделим способы обеспечения жесткости, направленные на превращение плоских висячих конструкций в пространственные системы, наиболее эффективно воспринимающие местные нагрузки от подвесных кранов. Подобные пространственные системы будут рассмотрены в последующих главах.

#### 1.4. КОНСТРУКЦИИ, ВОСПРИНИМАЮЩИЕ РАСПОРЫ ОТ ВИСЯЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Экономичность и эксплуатационная надежность висячего покрытия в большой степени зависят от того, насколько удачно выбрана схема части сооружения, воспринимающей распор от пролетного строения. Требования, предъявляемые к анкерным конструкциям, в состав которых входят передающие элементы (оттяжки, распорки) и воспринимающие распор (фундаменты, балки жесткости), сводятся к следующему:

материалоемкость анкерных устройств и трудоемкость их возведения должны быть минимальными. При производстве работ необходимы механизация, индустриальное изготовление элементов и крупноблочный монтаж;

анкерные конструкции не должны загромождать ни территории, где расположено сооружение, ни помещения внутри здания. Эти конструкции должны входить в состав сооружения как функциональные элементы технологического назначения здания, его несущих и ограждающих частей, покрытия, каркаса или вспомогательных помещений, пристроек и т.п.;

требование минимальной податливости анкерных фундаментов и устройств, а также требование к уменьшению удлинений оттяжек,

влияющих на прогибы пролетного строения при действии временной нагрузки, определяются тем, что перемещения концов висячего элемента внутрь пролета существенно влияют на возникновение дополнительных провесов висячего элемента, а следовательно, на прогибы пролетной конструкции в середине пролета. В результате увеличения прогибов уменьшается доля временной нагрузки, передаваемой на висячий элемент, и увеличивается часть временной нагрузки, передаваемой на балку, что ведет к увеличению ее сечения и понижает экономичность всего сооружения. Увеличение податливости опорных концов нити можно рассматривать как уменьшение модуля упругости и продольной жесткости висячего элемента и боковых оттяжек.

Для повышения осевой жесткости оттяжек их следует выполнять из прокатных профилей или из предварительно напряженных железобетонных элементов [16]. Одна из причин осевой деформативности наклонных оттяжек — их провисание под действием собственного веса. При увеличении осевого усилия, передаваемого от временной нагрузки на такой провисающий стержень, происходит как уменьшение стрелы провисания гибкого элемента так и его упругое удлинение. При больших стрелах провисания оттяжки первое слабое превосходит второе в несколько раз. Увеличение жесткости при провисании оттяжек достигается усилением их шпренгелями (рис. 1.16, а) или введением подкосов между колонной и оттяжкой (рис. 1.16, б).

Немалая роль отводится анкерным конструкциям в обеспечении горизонтальной жесткости и неизменяемости рам с висячим комбинированным ригелем, так как колонны каркасов зданий с висячими покрытиями не испытывают больших изгибающих моментов и поэтому их сечения недостаточно развиты в плоскости рамы. Таким образом, горизонтальная жесткость поперечной рамы висячего покрытия должна обеспечиваться анкерными устройствами — системой раскосов и подкосов, вертикальными диафрагмами в виде стенок — контрфорсов, входящих в состав анкерных конструкций и т.п. (рис. 1.17).

Рассмотрим следующие варианты анкерных устройств и способов восприятия распоров.

1. Наиболее экономичная схема передачи распоров от висячих элементов состоит в том, что через короткие оттяжки, а затем через боковые распорки горизонтальные усилия передаются на торцы балок жесткости покрытия. Вертикальные составляющие усилий в оттяжках могут передаваться на вертикальные тяжи, имеющие отдельные фундаменты, и через растянутые подкосы на подколонные фундаменты (см. рис. 1.1). В этом случае осевое сжимающее усилие в боковой распорке складывается из горизонтальных проекций усилий в верхней и нижней оттяжках и передается на балку жесткости, сечение которой по сравнению с сечением балок во внешнераспорных схемах получает дополнительное развитие не только за счет появления осевого усилия в балке, но и из-за необходимости обеспечения ее устойчивости в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Особенность этой схемы передачи распоров состоит в том, что подколонные фундаменты, нагруженные горизонтальными составляющими

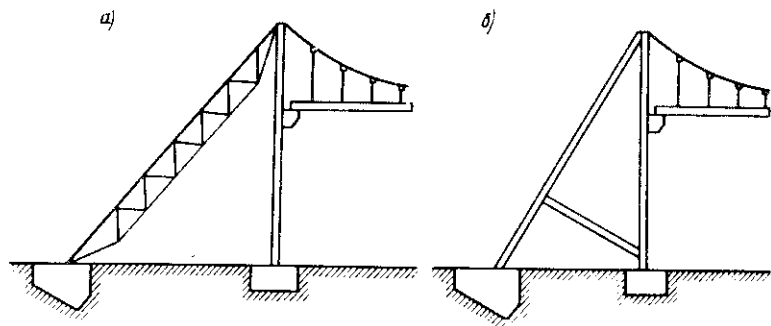


Рис. 1.16. Меры, направленные на уменьшение провисания оттяжек от собственного веса  
*а* — подкрепление оттяжки шпренгелем;  
*б* — введение подкоса

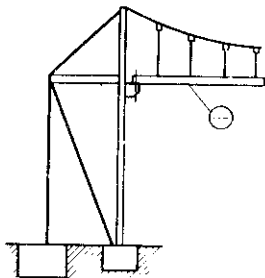


Рис. 1.17. Анкерное устройство с раскосами

усилий от оттяжек и от неразрезных колонн, необходимо рассчитывать на сдвиг, направленный наружу. Для того чтобы воспринять эти усилия могут быть введены затяжки, связывающие базы колонн рамы ниже уровня пола, или предусмотрено устройство против сдвига фундаментов. В случае использования вертикальных оттяжек сжимающие усилия в боковых распорках и в балке жесткости несколько уменьшаются по сравнению с вариантом без вертикальных оттяжек. Поскольку трудно обеспечивать горизонтальную жесткость безраскосной рамы и неизменяемость всей поперечной конструкции только защемлением сравнительно гибких колонн в фундаментах, то оказываться от раскосов в анкерной конструкции не следует.

2. Передавать распоры можно на боковые рамные каркасы пристроек, развитые по ширине настолько, что они представляют собой многоэтажные рамы с рядами колонн, с ригелями и подкосами, воспринимающими горизонтальные составляющие от усилий, которые возникают в пролетной висячей конструкции без передачи распоров на балки жесткости (рис. 1.18). В этих пристройках могут располагаться вспомогательные помещения, заготовительные цехи и склады. Ширина таких рам — анкерных пристроек имеет определенное значение в эффективности восприятия горизонтальных составляющих усилий и может быть принята  $1/3 \dots 1/6$  высоты здания. Желательно такие рамные анкерные устройства выполнять из железобетона.

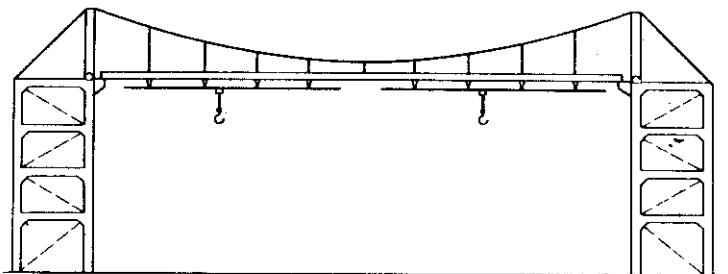


Рис. 1.18. Передача распора на боковые этажерки-пристройки

Известно также использование тонких армированных стен пристроек-контрфорсов в качестве поперечников, воспринимающих распоры (например автобусный гараж в Берлине, ГДР) [4, 52], а также зданий, в которых сплошные стены, воспринимающие горизонтальные нагрузки, рассматриваются как контрфорсы, защемленные в фундаментах и загруженные горизонтальными усилиями от висячих элементов.

3. Для уменьшения сжатия балок жесткости передача распоров может осуществляться на наклонные подкосы с вертикальными оттяжками (рис. 1.19, а) или на наклонные наружу основные колонны рам с вертикальными тяжами (рис. 1.19, б). Вследствие опирания подкосов на подколонные фундаменты последние должны воспринимать распоры и рассчитываться не только на вертикальное воздействие от колонн, но и на сдвиг внутрь пролета.

4. Использование противовесов и балластных пригрузов на колонны в качестве элементов, воспринимающих распоры (рис. 1.20), имеет определенные эксплуатационные преимущества перед другими схемами анкерных устройств, так как исключается влияние удлинений оттяжек, которые соединяют нити с анкерами, на прогибы пролетной конструкции, создается постоянное предварительное напряжение висячей фермы, компенсируются температурные и упругие деформации несущих нитей.

В Советском Союзе и за рубежом существует [16] опыт использования противовесов для натяжения канатов в покрытиях зданий. Так, в покрытии спортивно-тренировочного манежа в Ленинграде на боковые консоли неразрезных ригелей подвешены железобетонные колонны фахверка, создающие массой 30 т разгружающее усилие в ригеле и в его канатах (рис. 1.21). В ангаре, построенном во Франкфурте-на-Майне (ФРГ), используются железобетонные анкерные устройства, воспринимающие распоры по принципу балансира с массой балласта около 800 т (рис. 1.22).

Недостатком схем с балластом является то, что из-за большой его массы утяжеляются колонны. Рассчитывать такой анкер на стадии завершения монтажа следует в составе статически неопределимой поперечной конструкции каркаса.

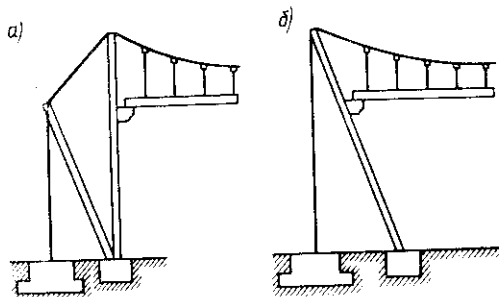


Рис. 1.19. Анкерное устройство с жесткими подкосами

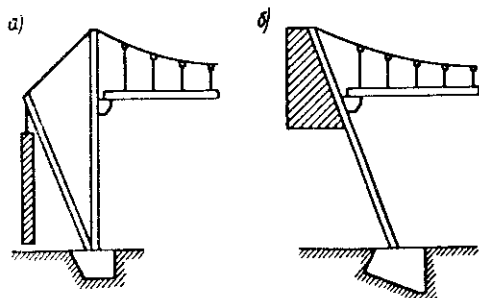


Рис. 1.20. Анкерные конструкции с балансирами-противовесами

5. Передача распоров на анкерные фундаменты, расположенные в грунте, может быть принята в том случае, если имеется свободное пространство для размещения оттяжек и если механические характеристики грунта обеспечивают экономичные размеры фундаментов. При этом длины и сечения оттяжек должны приниматься из условия необходимой жесткости покрытия при действии на него временных нагрузок.

Шаг отдельных анкерных фундаментов принимается равным шагу рам. Возможно устройство фундаментов в виде непрерывного на всей длине здания неразрезного блока. Оттяжки к такому блоку можно крепить с любым шагом. Выемка котлована для фундаментного блока может быть выполнена траншейным механизированным способом, а сам фундамент может быть сборным из секций, изготовленных на заводе железобетонных изделий. Объединение анкеров или противовесов в единый блок, который распределяет распор от местной (полосовой) нагрузки на блок или на секции, входящие в блок, не только способствует уменьшению податливости анкерного устройства от местного загрузения (а следовательно, уменьшает прогибы в середине пролета от кранов), но благодаря этому и снижается суммарный объем всего анкерного фундамента по сравнению с отдельными фундаментами.

Для оценки экономического эффекта, получаемого благодаря объединению анкеров в пространственную конструкцию, положим, что местное усилие от распора распределяется по блоку, к которому присоединено  $m$  оттяжек, а также



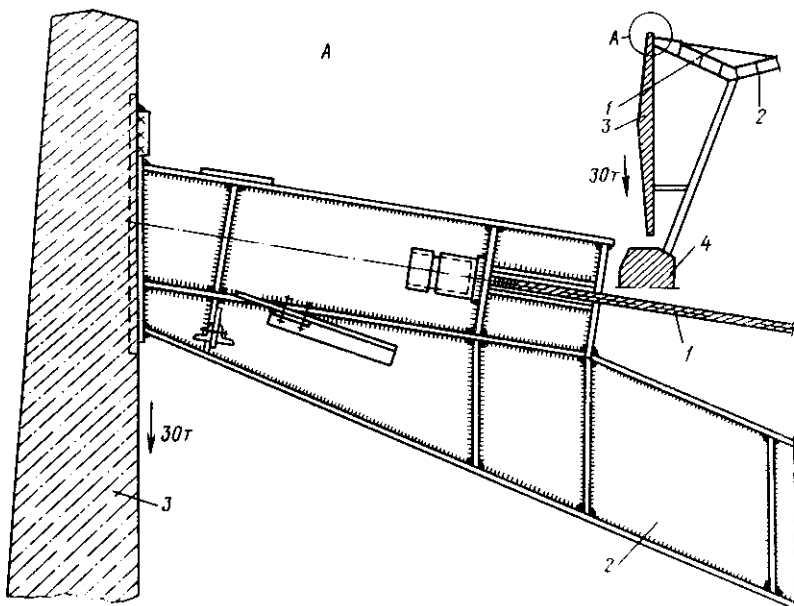
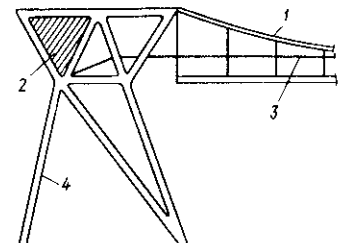


Рис. 1.21. Противовес для натяжения канатов в покрытии спортивного манежа в Ленинграде

1 — канат; 2 — ригель; 3 — подвесная колонна наружной стены; 4 — фундамент

Рис. 1.22. Анкерное устройство с балластом (ангар во Франкфурте-на-Майне (ФРГ))

1 — несущий висячий элемент, настил и кровля; 2 — балласт; 3 — стабилизирующий канат; 4 — замыкающая стойка



$$C_{\text{пр}} = \nu C_a, N_{\text{кр}} = \mu (N_q + N_{\text{сн}}), \beta = (C_1 - C_2) / C_1, \quad (1.5)$$

где  $\nu$  — отношение стоимости пролетной конструкции  $C_{\text{пр}}$  к стоимости анкерного устройства  $C_a$ ;  $N_{\text{кр}}$ ,  $N_q$ ,  $N_{\text{сн}}$  — распоры от крановой, постоянной и снеговой нагрузок;  $C_1$ ,  $C_2$  — полные стоимости сооружений, имеющих изолированные и пространственно объединенные анкеры.

На рис. (1.23, а, б) представлена экономическая эффективность объединения анкеров в зависимости от соотношения распоров при полосовой крановой нагрузке, т.е. от грузоподъемности и числа кра-

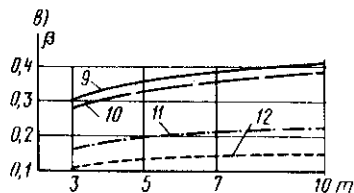
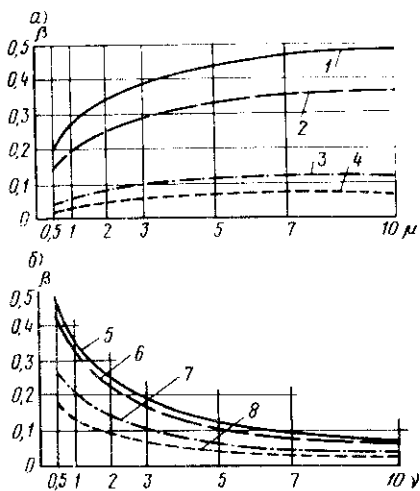


Рис. 1.23. Эффективность объединения анкерных фундаментов в неразрезной блок в зависимости

а — от грузоподъемности кранов: 1 —  $\gamma = 0,5$ ; 2 —  $\gamma = 1$ ; 3 —  $\gamma = 5$ ; 4 —  $\gamma = 10$  (при  $m = 5$ ); б — от стоимости фундаментов: 5 —  $\mu = 10$ ; 6 —  $\mu = 5$ ; 7 —  $\mu = 1,8$ ; 8 —  $\mu = 0,5$  (при  $m = 5$ ); в — от числа объединяемых фундаментов: 9 —  $\mu = 10$ ; 10 —  $\mu = 5$ ; 11 —  $\mu = 1$ ; 12 —  $\mu = 0,5$  (при  $\gamma = 1$ )

нов и распоров от распределенных нагрузок — постоянной и снеговой, которые загружают все анкерные фундаменты одновременно и для которых это объединение не дает экономического эффекта. Из рис. 23, а, б следует, что экономичность использования неразрезных анкерных фундаментов особенно высока (30–40% экономии средств), если имеется большая грузоподъемность кранов ( $\mu = 2 \dots 3$  и больше) и если высокая стоимость фундаментов ( $\gamma = 0,5 \dots 1$ ).

6. Распоры могут быть переданы на рамные каркасы соседних зданий или на стоящие рядом сооружения и массивы (рис. 1.24). Рамы здания, на которые передается распор, дополнительно проверяются расчетом на распоры от постоянной и снеговой нагрузок, передающиеся на все рамы равномерно, а также на местные воздействия крановых нагрузок. Местный характер последних определяет рациональность выполнения расчета загружаемого каркаса с учетом его пространственной работы. Необходимо проверить узлы и стыки колонн на растяжение, а фундаменты под колоннами на выдергивание при расчетном сочетании нагрузок.

**Пример.** Компонировка висячего элемента покрытия. На стадии эскизного проектирования требуется определить сечения основных висячих элементов покрытия. Расчеты ведем в предположении, что небольшая часть временной нагрузки будет воспринята балкой жесткости, определение сечения которой будет выполнено на последующих стадиях проектирования.

Полет здания 72 м, отметка низа конструкций покрытия 18 м, шаг колонн 12 м. Высота нижней части колонны  $h_1 = 18,5$  м. Грузоподъемность подвесных трехпролетных кранов на двух продольных линиях по 10 т. На каждой линии предусматривается не менее двух кранов. Место строительства Москва. Схема покрытия приведена на рис. 1.25.

**Сбор нагрузок.** Собственный вес несущих конструкций покрытия, связей и продольных балок  $0,6 \text{ кН/м}^2$ . Кровельный настил (панели с эффективным утеплителем, включая несущий каркас — прогоны)  $0,8 \text{ кН/м}^2$ . Всего  $g_1^0 = 1,4 \text{ кН/м}^2$ ,

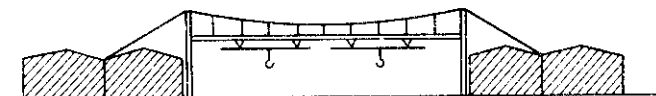


Рис. 1.24. Передача распоров на соседние сооружения и массивы

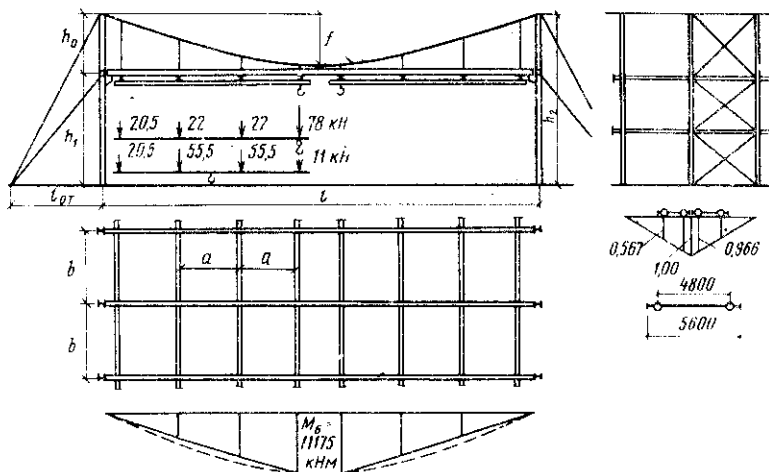


Рис. 1.25. Висячее покрытие производственного здания

расчетная нагрузка  $g_1 = 1,1 \cdot 1,4 = 1,54 \text{ кН/м}^2$ . Постоянная нагрузка на 1 м поперечной конструкции  $g = 1,54 \cdot 12 = 18,48 \text{ кН/м}$ . Снеговая нагрузка  $r_{\text{сн}}^{\text{н}} = 1 \text{ кН/м}^2$ , на 1 м  $r_{\text{сн}}^{\text{н}} = 12 \text{ кН/м}$ . Расчетная снеговая нагрузка  $r_{\text{сн}} = 1,4 \cdot 12 = 16,8 \text{ кН/м}$ .

Характеристики кранов: грузоподъемность 10 т, масса тележки 3,4 т, масса кабины 1,9 т, масса 1 м моста крана 0,4 т/м. Кран двухбалочный, четырехопорный. Распределение давлений на балку жесткости покрытия от одной балки крана показано на рис. 1.25. База крана 4,8 м, продольный габарит 5,6 м. Ширина моста крана  $1,5 + 3 \cdot 10 + 1,5 = 33 \text{ м}$  (см. рис. 1.25).

При определении наибольшего давления на поперечную конструкцию и наибольшего распора в висячих элементах положим, что на каждой из двух линий находятся два крана. Таким образом, всего на расчетную поперечную конструкцию действуют четыре крана, поэтому коэффициент сочетания крановых нагрузок принимается  $\psi = 0,7$  (см. п. 4.17 СНиП 2.01.07–85). Динамический коэффициент 1,1 (см. п. 4.9 СНиП 2.01.07–85). Монтаж покрытия производится так, что постоянная нагрузка передается полностью на висячие элементы в начальной стадии возведения, когда балка жесткости еще не включена в работу. Временные нагрузки на стадии эксплуатации большей частью передаются на висячий элемент  $\alpha$  и меньшей  $(1 - \alpha)r$  — на балку жесткости. Принимая приближенно  $\alpha = 0,95$ , в дальнейшем введем этот коэффициент в расчет висячего элемента.

Продольная линия влияния давления кранов на поперечную висячую комбинированную конструкцию показана на рис. 1.25 в предположении, что продольные балки разрезные на опорах. Сумма ординат линий влияния от двух кранов — 3,066. На каждой опоре крана имеется четыре катка, но два спаренных катка приняты за один груз, соответствующий давлению одной балки крана.

Эквивалентное равномерно распределенное воздействие кранов определим из условия равенства изгибающих моментов по формуле  $R_{\text{экв}} = 8M_6/l^2$ . Эюра балочных моментов  $M_6$  для одной балки крана показана на рис. 1.25. Для двух кранов, т.е. для четырех балок  $M_6$ , умножим на коэффициент продольной установки кранов — на 3,066, введем  $\psi = 0,7$ , (по два крана на двух линиях)

$$R_{\text{экв}}^H = 8 \cdot 3,066 \cdot 0,7 \cdot 3641,25/72^2 = 12,06 \text{ кН/м.}$$

Расчетная эквивалентная крановая нагрузка с учетом коэффициента динамичности 1,1

$$R_{\text{экв}} = R_{\text{экв}}^H \gamma_f \cdot 1,1 = 12,059 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 14,59 \text{ кН/м.}$$

*Определение площади поперечного сечения висячего элемента, состоящего из стальных канатов.* В связи с большой грузоподъемностью кранов принимаем стрелу провеса висячего элемента равной 1/8 пролета [39]. Требуемую площадь сечения стальных канатов определим из расчета на прочность на стадии монтажа в предположении, что балка жесткости имеет в пролете шарниры. Колонна разрезная по высоте. Надколонная стойка имеет высоту  $h_p = 9$  м. Распор от постоянной нагрузки  $N_g = 18,48 \cdot 72^2/(8 \cdot 9) = 1330,6$  кН. Распоры от снеговой и крановой нагрузок с учетом коэффициента сочетания 0,9 (СНиП 2.01.07—85), а также коэффициента распределения  $\alpha = 0,95$  (приблизительно 5% передается на балку жесткости):

$$N_p = 0,9 \cdot 0,95 (16,8 + 14,59) 72^2 / (8 \cdot 9) = 1932,4 \text{ кН.}$$

Суммарный распор и усилие в висячем элементе

$$N = 1330,6 + 1932,4 = 3263 \text{ кН,}$$

$$N = N(1 + 8f^2/l^2) = 3263,0 \cdot 1,125 = 3670,9 \text{ кН.}$$

В соответствии со СНиП II-23-81, п. 3.9 расчетное сопротивление стального каната принимается  $R_k = R_{\text{унк}}/\gamma_m = 140/1,6 = 87,5$  кН/см<sup>2</sup>,  $A_k = 3670,9/87,5 = 41,95$  см<sup>2</sup>. По ГОСТ 7676—73\* принимаем два каната закрытого типа диаметром 60 мм,  $A_k = 2 \times 24,09 = 48,18$  см<sup>2</sup>.

Требуемую площадь сечения по второй группе предельных состояний при нагружении временной нагрузкой всего пролета определим из формулы (1.1).

Для этого найдем приведенную длину висячего элемента, задавшись сечением оттяжек, выполненных из проката:

$$L = l(1 + 8f^2/l^2) + 2l_0 \sec^2 \theta \frac{\sigma_{\text{от}}}{R_k} \frac{E_k}{E_0}, \quad (1.6)$$

где  $\theta$  — угол наклона оттяжки к горизонту;  $l_0$  — горизонтальная проекция оттяжки;  $\sigma_{\text{от}}$ ,  $R_k$  — напряжение в оттяжке, выполненной из прокатной стали, и расчетное сопротивление канатов в пролете;  $E_0$ ,  $E_k$  — модули упругости проката и канатов.

Положим  $\theta = 60^\circ$  и примем в качестве оттяжки широкополочный двутавр 40К10,  $A = 443 \text{ см}^2$ , масса 348 кг/м. Найдем:

$$l_0 = (h_0 + h_1) / \sqrt{3} = 27,5 / 1,73 = 15,88 \text{ м};$$

$$N_{\text{от}} = H / \cos \theta = 3263 / 0,5 = 6526 \text{ кН};$$

$$\sigma_{\text{от}} = 6526 / 443 = 14,73 \text{ кН/см}^2;$$

$$L = 72 (1 + 8/64) + 2 \cdot 15,88 \cdot 2^2 \frac{14,73 \cdot 1,5 \cdot 10^4}{87,5 \cdot 2,1 \cdot 10^4} = 96,28 \text{ м};$$

$$L/l = 96,28 / 72 = 1,34.$$

Предельное увеличение стрелы провеса примем  $[\Delta y/l] = 1/600$  [23].  
По формуле (1.13)

$$A_k = \frac{3(0,1206 + 0,1200) 7200 \cdot 600 \cdot 1,34 \cdot 64}{128 \cdot 1,5 \cdot 10^4} = 139,3 \text{ см}^2.$$

Принимаем семь канатов закрытого типа диаметром 55 мм  $7 \cdot 20,16 = 141,1 \text{ см}^2$ . При этом прочность канатов будет использована лишь на 30%. Поэтому для экономии металла и снижения стоимости висячего элемента предлагается часть канатов заменить прокатом, т.е. применить элемент составного сечения.

*Расчет висячего элемента составного типа.* В формулу (1.13) для определения площади сечения проката входит приведенная длина растянутого элемента, в котором площадь сечения и длины оттяжек приведены к сечению составного элемента. Таким образом  $L/l$  находится последовательными уточнениями:

$$L = l(1 + 8f^2/l^2) + 2l_0 \sec^2 \theta \frac{E_k A_k + E_0 A_0}{E_0 A_0}, \quad (1.7)$$

где  $A_k$ ,  $A_0$ ,  $A_0$  — соответственно площади сечений каната и проката в составном сечении висячего элемента и оттяжки из проката.

Задаваясь произвольной величиной  $A_0$ , и, затем уточняя  $L$  путем последовательных приближений, получим уточненное значение  $A_0$ . Так, принимая для прокатной части висячего составного элемента широкополочный двутавр 45Б3 (ТУ 14224—72)  $A = 91 \text{ см}^2$ , масса 1 м 71,5 кг, найдем:

$$L = 72 (1 + 8 \cdot 1/64) + 2 \cdot 15,89 \cdot 2^2 \frac{1,5 \cdot 10^4 \cdot 48,18 + 2,1 \cdot 10^4 \cdot 91}{2,1 \cdot 10^4 \cdot 443} = 117 \text{ м};$$

$$L/l = 117 / 72 = 1,625;$$

$$A_0 = \frac{3}{128} \frac{(0,1206 + 0,1200) 7200}{2,1 \cdot 10^4} 1,625 \cdot 600 \cdot 64 -$$

$$- \frac{1,5 \cdot 10^4}{2,1 \cdot 10^4} 48,18 = 86,23 \text{ см}^2 \leq 91 \text{ см}^2.$$