

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВОЗВЕДЕНИЕ ВИСЯЧИХ И ВАНТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

1. Деформативность висячих систем и способы обеспечения их жесткости

Прогибы комбинированных висячих конструкций при действии на них временных нагрузок определяются дополнительными провесами, главным образом гибкой нити или вантовой фермы. Характер перемещений несущих элементов висячих конструкций можно проследить, рассматривая уравнение перемещений гибкой нити, приведенное в работах [30, 49]. Из этого уравнения следует, что дополнительные провесы висячих систем зависят от двух причин:

а) от упругих удлинений растянутых элементов, достигая наибольших значений в середине пролета при загрузке временной нагрузкой всего пролета; при таком загрузке приращение распора максимально (рис. 1, а);

б) от кинематических перемещений, которые не зависят от упругих свойств нити и являются следствием изменения формы равновесия. Такие перемещения проявляются в наибольшей степени при действии местной нагрузки, вызывающей s-образные прогибы (рис. 1, б). В комбинированных конструкциях благодаря элементу жесткости кинематические перемещения уменьшаются по сравнению с перемещениями конструкций, состоящих лишь из гибких нитей.

В общем случае загрузки системы временной нагрузкой прогибы являются следствием обеих причин — упругих удлинений и кинематических перемещений; однако для каждой конструкции может быть отмечено преобладающее значение либо первой, либо второй причины. Какая из этих двух причин имеет большее значение, можно выяснить сопоставлением прогибов в середине пролета (при загрузке всего пролета) с прогибами в его четверти под действием нагрузки, расположенной на половине пролета. В соответствии с результатами такого анализа могут быть приняты меры, направленные на уменьшение упругих удлинений или кинематических перемещений либо на обеспечение общей жесткости конструкции.

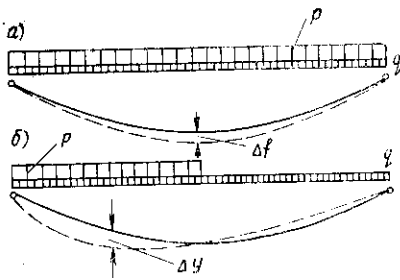


Рис. 1. Дополнительные провесы гибкой нити

а — упругие удлинения кабеля; б — кинематические перемещения

Таким образом, должны быть рассмотрены две группы мероприятий по увеличению жесткости висячих комбинированных систем.

Уменьшение продольных деформаций несущих элементов. Эта группа мероприятий применяется в основном для легких сооружений с малыми пролетами (до 60—100 м), в несущих элементах которых доля напряжений от временной нагрузки составляет большую часть суммарных расчетных напряжений.

1. Использование проката из низколегированных или обыкновенных сталей для сооружений с малыми пролетами. Рациональность этого мероприятия состоит в том, что для несущих элементов применяется более дешевый и менее дефицитный материал, чем тросы. Это обусловлено также и тем, что высокая прочность тросов в ненапрягаемых системах используется не полностью, так как основные элементы сооружений малых пролетов подбирают по второму предельному состоянию. Использование прокатных элементов дает некоторые преимущества с точки зрения конструирования и изготовления элементов. Так, концы проката закрепляются в анкерах проще, чем тросы, для крепления которых требуется устройство гильз с запрессовкой концов или заливкой их легкоплавким сплавом. Строительные коэффициенты стержней, выполняемых из проката, составляют примерно 1,10—1,16, а из тросов — в среднем 1,40 [20]. Однако монтаж висячих конструкций, изготовленных из проката, при больших пролетах сложнее, чем монтаж тросовых конструкций. Для монтажа конструкций из проката может потребоваться возведение громоздких лесов и специальных приспособлений, введение временных шарниров в «жесткие нити», которые по окончании монтажа должны замоноличиваться сваркой или болтами (предложение ЛенЗНИЭП), в чем нет необходимости при монтаже тросовых ферм. Поэтому прокат может быть рационально использован в конструкциях, воспринимающих преимущественно постоянную нагрузку при небольших пролетах (до 100 м) и при достаточном обосновании способов монтажа.

2. Увеличение условного модуля упругости несущих элементов. Как известно, удлинения этого кабеля объясняются не только упругими удлинениями нитей,

из которых состоит трос, но они зависят и от перемещения нитей в витом тросе, от «рыхлых» деформаций в результате натяжения тросов. Чтобы уменьшить эти побочные причины удлинения тросового элемента, рекомендуется:

а) использовать пряди (пучки), состоящие из параллельных высокопрочных проволок, вместо витых кабелей;

б) производить обтяжку тросов перед монтажом. Обтяжкой снимаются рыхлые деформации, на 20—30% увеличивается условный модуль упругости канатов. По данным некоторых исследователей, полученный модуль канатов может уменьшиться в результате последующих транспортных и монтажных операций с канатом [18, 19]. Однако обтяжка необходима не только для снятия рыхлых деформаций. Она служит также проверкой концевых закреплений тросовых элементов.

3. Применение предварительно напряженных железобетонных обойм для тросовых элементов, использование предварительно напряженных железобетонных элементов в качестве растянутых стержней [20], — эти приемы используются для уменьшения удлинения несущих элементов, но они усложняют изготовление и монтаж сооружения, увеличивают его вес. Существенное повышение жесткости может быть достигнуто, если создается предварительное напряжение (обжатие) железобетонного настила, расположенного непосредственно на несущих элементах тросовых ферм комбинированной конструкции. В этом случае жесткость может быть увеличена в 3—4 раза по сравнению с жесткостью обычной вантовой схемы [21, 29].

4. Увеличение стрелы провеса несущих нитей до $\frac{1}{7}$ — $\frac{1}{8}$ пролета. Как известно, с увеличением стрелы провеса уменьшаются распоры от нагрузок, а следовательно, несущий элемент меньше удлиняется. С другой стороны, при увеличении стрелы возрастают прогибы вследствие кинематических перемещений при загрузке части пролета. Поэтому при компоновке сооружения должен быть установлен такой наибольший провес несущих элементов, которым гарантируется жесткость данной конструкции как при загрузке всего пролета, так и при всех возможных местных воздействиях. Таким образом, с точки зрения увеличения общей жесткости выгодно применять различные висячие системы повышенной жесткости, т. е. усиленные вантами, с треугольной решеткой, двухкабельные и другие менее чувствительные к местным нагрузкам, чем обычная система (нить с балкой и вертикальными подвесками). В них могут быть большие стрелы провеса, чем в простейшей схеме, и поэтому они будут экономичны по затратам материалов на устройство анкеров.

Уменьшение кинематических перемещений комбинированной системы, возникающих при загрузке части пролета.

1. Увеличение жесткости элемента, работающего на изгиб (балки жесткости, арки и т. п.).

Увеличение сечения балки — это наименее экономичный способ повышения жесткости комбинированной системы. Он может быть оправдан в тех случаях, когда конструкция должна воспринимать большие сосредоточенные нагрузки. При этом рационально использовать сквозные фермы в качестве элемента, работающего на изгиб, омоноличивать балки с настилом, включать в состав комбинированной системы перекрестные фермы, а также другие пространственные конструкции (ростверки балок, оболочки складчатого типа и т. п.). В многопролетных схемах типа «балка — нить» для уменьшения прогибов от местных нагрузок предпочтительнее применять неразрезные балки, чем разрезные.

2. Уменьшение кинематических перемещений нити как составной части комбинированной системы без изменения ее расчетной схемы. Гибкая нить, нагруженная постоянной нагрузкой, стремится при местных воздействиях временной нагрузки сохранить свое первоначальное равновесие. Стабилизация будет тем надежнее, чем больше распор от постоянной нагрузки. Поэтому для уменьшения кинематических перемещений возможны следующие способы увеличения распоров от постоянных нагрузок:

а) уменьшение стрелы провеса в пределах, которые экономически оправданы с точки зрения расхода материалов на анкерные устройства и на растянутые несущие элементы;

б) использование железобетонных настилов и балок для пролетного строения комбинированной системы;

в) введение арочного (обратного) предварительно напряженного пояса или натягающих вант, воздействие которых на основной несущий кабель в известной степени может рассматриваться как постоянная нагрузка [35].

Эти мероприятия, как и увеличение жесткости балки, нельзя признать самыми рациональными: они связаны с дополнительным расходом материалов как на всякие, так и на анкерные элементы. Главный же их недостаток тот, что при больших затратах средств они мало снижают кинематические перемещения.

3. Изменение расчетной схемы нити, включение дополнительных элементов — вант. Принципиально иным радикальным способом уменьшения кинематических перемещений является наложение на гибкий элемент дополнительных связей, препятствующих горизонтальным перемещениям нити вдоль пролета. Рассматривая уравнение равновесия гибкой нити, записанное с учетом вертикальных и горизонтальных перемещений, можно заметить, что эти перемещения связаны между собой. Поэтому включение в всячую ферму дополнительных связей, ограничивающих горизонтальные перемещения гибкой нити, способствует уменьшению вертикальных кинематических перемещений пролетного строения при местных статических нагрузках и повышает стабилизацию системы при динамических воздействиях.

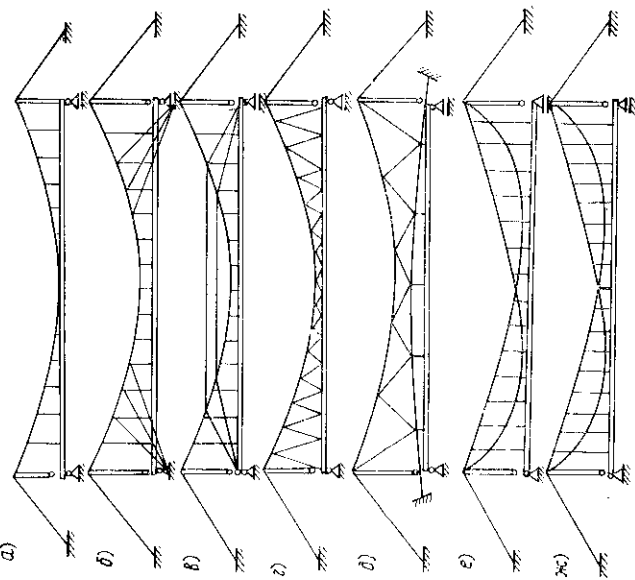
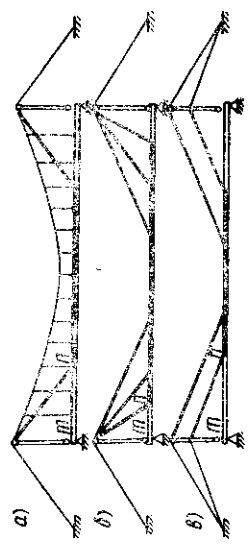


Рис. 2. Системы повышенной жесткости, в которых на гибкий элемент накладываются ограничители горизонтальных перемещений

a — схема с жестким узлом в середине пролета; *б* — с походящими вангами; *в* — система Батикля; *г* — с наклонными подвесками; *д* — с треугольной решеткой и напругающим нижним поясом; *е* — двухкабельная система С. А. Чаплина без средней подвески; *ж* — то же, со средней подвеской

Рис. 3. Дополнительный и основные вантовые пояса, связанные с неподвижной опорой

т — *п* — участок балки, испытывающий осевые усилия



Подтверждением последнего вывода может служить анализ разрушения Такомоского моста: после того как оборвались наклонные ванты, усиливающие береговые пролеты, а затем и раскосы, соединяющие кабель с балкой в среднем пролете, резко изменилась форма колебаний моста — она стала с одним узлом в середине вместо восьми узлов, понизилась частота и увеличилась амплитуда колебаний. Связями, ограничивающими свободные перемещения кабеля вдоль пролета, могут быть: узел прикрепления кабеля к балке в середине пролета (рис. 2, а), пучки восходящих вант (рис. 2, б), горизонтальные вантовые элементы (ферма Батикля [53], рис. 2, в), замена вертикальных подвесок наклонными (рис. 2, г, мост через р. Северен, Англия) или треугольной решеткой (рис. 2, д).

В этих схемах принцип наложения связей очевиден — узлы кабеля соединяются прямолинейными элементами с неподвижными опорами или накладываются ограничения на горизонтальные смещения узлов, как, например, в двухкабельных схемах С. А. Цаплина, в которых взаимные горизонтальные перемещения между поясами ограничены в середине пролета (рис. 2, е, ж). В схемах другого типа закрепление кабеля не делается, а вводится дополнительный пояс с жестким элементом, воспринимающим распор и также, как в схемах первого типа, связанным с неподвижной опорой. Это висячие схемы, усиленные нисходящими вантами (рис. 3, а), вантовые схемы (рис. 3, б, в), обычная схема с балкой, имеющей шарнирно неподвижные опоры на обоих концах пролета, и нить, усиленная аркой.

При расчете рассмотренных схем определять горизонтальные перемещения не требуется, но эти закрепления влияют на расчетную схему, и если их удалить, то прогибы при односторонних загрузках существенно увеличатся.

Принцип наложения связей на горизонтальные перемещения используется и при увеличении жесткости других висячих конструкций; известно, что жесткое соединение поясов в середине пролета гибкой двухпоясной фермы или введение наклонных раскосов приводит к уменьшению кинематических перемещений этой конструкции [6]. В сетчатых тросовых системах большое значение для жесткости имеет характер горизонтального взаимодействия в узлах между ортогональными нитями, и если между ними не обеспечивается жесткого соединения, то деформативность сетки увеличивается [10, 30].

2. Особенности конструктивных решений большепролетных зданий и мостов с применением комбинированных висячих систем

К особенностям конструктивного решения зданий и сооружений рассматриваемого типа относится необычность основных несущих элементов пролетного строения, выполняемых в виде тросовых ферм. Примеры конструирования таких элементов и узлов рассмотрены

в работах [14, 21, 34, 53]. Специфические требования предъявляются также и к другим частям сооружения.

Анкерные устройства. Как известно, в висячих мостах стоимость анкерных опор и пилонов составляет 50—70% стоимости всего сооружения. Такие же соотношения стоимостей частей сооружения могут быть приняты и для комбинированных висячих покрытий промзданий. Поэтому для обоснования применения висячей системы в качестве несущей конструкции покрытия требуется изучить возможность рационального осуществления внешних анкерных устройств, например возможность передавать распор от висячего пролетного строения на жесткий каркас вспомогательных зданий, если они возведены или одновременно возводятся рядом с большепролетным цехом. Следует также рассмотреть варианты безраспорных висячих систем с передачей распора на балку жесткости [33].

В мостовых сооружениях наиболее экономично применять висячие схемы на плотных грунтах или скальных породах.

В зданиях с висячими покрытиями возможны следующие схемы анкерных устройств.

1. Распор от пилона с помощью оттяжек передается непосредственно на анкеры, расположенные в грунте. Так, конструктивно решены, например, анкерные устройства в Красноярском гараже (рис. 4, а), где в качестве оттяжек использованы предварительно напряженные железобетонные элементы [20]. Гибкие тросовые оттяжки для промышленных зданий менее приемлемы, чем для мостов, во-первых, из-за того, что в первом случае они длиннее, чем во втором, а поэтому упругие смещения верха пилонов и прогибы середины пролета при полном нагружении покрытия будут больше, чем при нагружении мостов. Во-вторых, тросовые оттяжки нерационально занимают территорию, тогда как на жесткие оттяжки можно навесить плиты ограждения и использовать пространство под оттяжками для какого-либо вспомогательного помещения.

В качестве анкеров могут быть рекомендованы сваи с уширенным основанием (винтовые, камуфлетные, буровые с уширенной пятой), ребристые плиты, заделанные в грунт, железобетонные короба, заполненные балластом, и др.

2. Передача распора на рамы (рис. 4, б), которые должны быть рассчитаны на воздействие оттяжек. Эта конструкция анкерного устройства выгоднее первой: вертикальная составляющая опрокидывающего момента обычно погашается собственным весом конструкций, и поэтому специальные анкеры устраивать не надо. Здесь желательно предусмотреть, чтобы число рам соответствовало числу оттяжек.

3. Стойки с подкосами также могут воспринимать распоры, если устройство подкосов не мешает технологической планировке помещения (рис. 4, в).

4. Передача распора на омоноличенное покрытие здания, которое служит в качестве распределительной балки, воспринимаю-

щей усилия от оттяжек и передающей эти усилия на торцевые стены или подкосы (рис. 4, *г*).

5. Внешне безраспорные конструкции могут быть осуществлены с передачей распора от кабеля на балку жесткости и на другие элементы покрытия. Экономичность таких систем в каждом отдельном случае должна быть изучена, так как сжатие, которое передается на балку, заставляет проектировщика развивать сечение и прини-

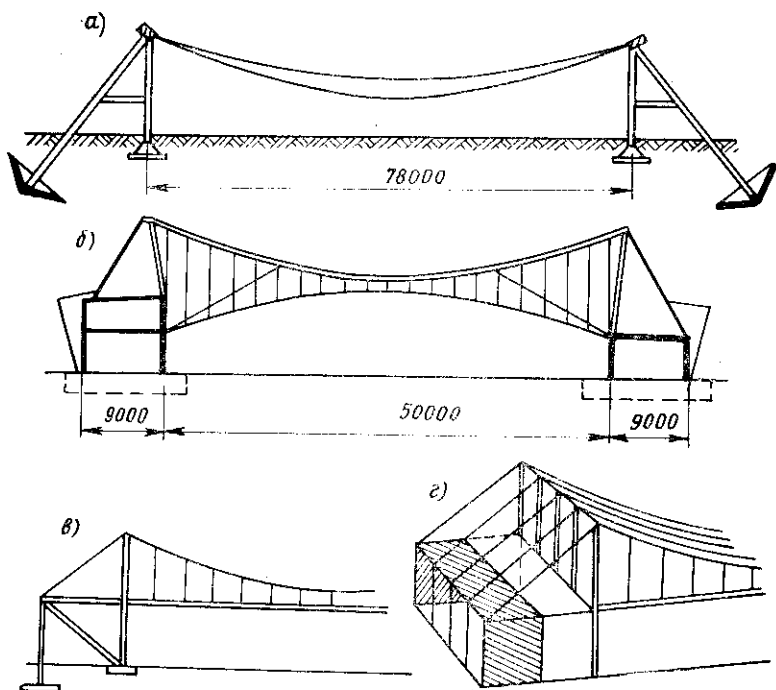


Рис. 4. Схемы анкерных конструкций

а — передача распора на анкер, расположенный в грунте (гараж в Красноярске);
б — рамы (гараж в ГДР); *в* — подкосы; *г* — омоноличенное перекрытие и стены

мать меры по обеспечению ее устойчивости. Основное преимущество безраспорных систем с точки зрения увеличения жесткости покрытия — сокращение длины оттяжек, а следовательно, уменьшение упругих удлинений кабеля и прогибов в середине пролета по сравнению со схемами, в которых оттяжки закреплены в анкерах, расположенных на уровне пола.

Схемы связей в висячих комбинированных покрытиях промышленных зданий. Кроме обычных связей, применяемых в каркасах зданий, в металлических конструкциях комбинированного покрытия должны быть предусмотрены следующие связи.

1. Связи по верхним и нижним поясам сквозных балок жесткости для обеспечения устойчивости как верхнего, так и нижнего по-

ясов, в которых может возникнуть сжатие в различных точках пролета, так как линии влияния изгибающих моментов в балке, как правило, имеют знакопеременный характер. Такое требование к связям не означает, что нижний пояс должен быть так же раскреплен связями, как верхний. Здесь, как и в арочных покрытиях, возможно устройство облегченных связей, подкосов тяжей и т. п. [34]. Нужно учесть, однако, что связи по нижним поясам должны быть

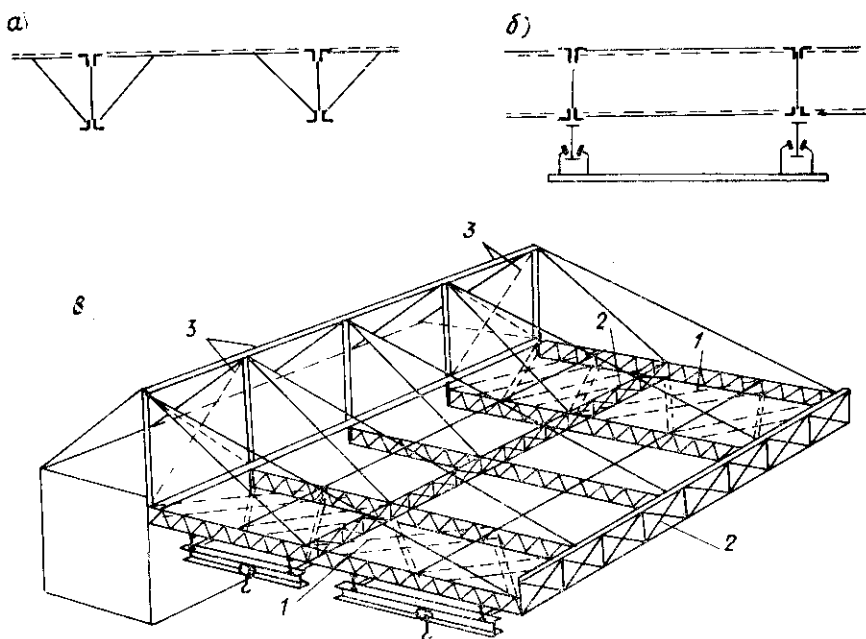


Рис. 5. Связи в висячих комбинированных покрытиях

а — без подвешеного транспортного; *б* — с подвесными кранами; *в* — связи в консольном покрытии; 1 — горизонтальные связи по поясам; 2 — вертикальные распределительные связи между балками; 3 — связи между пилонами

развиты при наличии подвешеного кранового и транспортного оборудования для восприятия тормозных усилий от кранов.

2. На вертикальные связи между балками (фермами) жесткости в таких покрытиях возлагаются не только монтажные функции. Здесь вертикальные связи должны распределять сосредоточенные вертикальные воздействия между соседними балками (фермами), чтобы уменьшить неравномерность загрузки временной сосредоточенной нагрузкой отдельных плоских вантовых систем, которые, как отмечалось, особенно чувствительны к местным загрузкам вследствие изменения формы равновесия (рис. 5).

3. Вертикальные связи между пилонами должны обеспечивать устойчивость пилонов и воспринимать торцовую нагрузку от действия ветра, которая вследствие парусности вантовых ферм может

достигать больших значений. Эти связи могут выполняться из тросов, но должны иметь жесткие распорки или раскосы (см. рис. 5).

Конструкции, воспринимающие ветровую нагрузку в мостовых переходах. Для восприятия поперечной ветровой нагрузки в легких висячих мостах и воздушных переходах трубопроводов, ширина которых по отношению к пролету составляет меньше $1/30$, предусматривается устройство горизонтальных тросовых ферм или оттяжек (рис. 6). Назначение этих устройств — стабилизировать гибкую

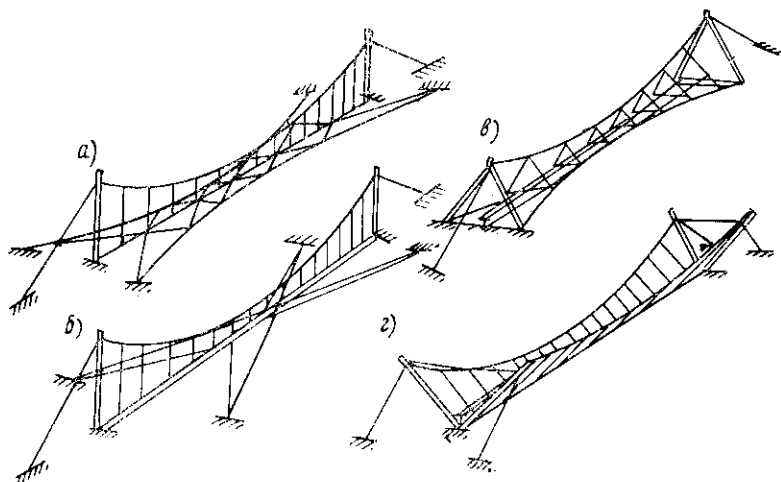


Рис. 6. Типы оттяжных кабелей и ветровых ферм для легких мостов
 а — связевая ферма; б — ванты; в — система с треугольным поперечником;
 г — с v-образными пилонами

конструкцию при действии бокового ветра, не допустить горизонтальных раскачиваний и кручения пролетной конструкции [4, 9, 43]. Недостаток таких ветровых ферм — ослабление оттяжек с течением времени. В другой схеме легкого висячего перехода совмещены функции основных несущих и ветровых ферм — это схемы с v-образными пилонами и двумя наклонными фермами. И хотя по весу такие конструкции тяжелее обычных, они могут найти применение в строительстве особо легких трубопроводных мостов. Предложены и исследованы пространственные схемы с одним кабелем и треугольным поперечником моста, более устойчивые против кручения по сравнению с висячими схемами с двумя параллельными фермами [71].

Противокоррозионные мероприятия. Открытые, незащищенные от атмосферных воздействий конструкции, находящиеся над покрытием, требуется защитить от коррозии для обеспечения долговечности несущих конструкций: обмоткой канатов лентой, пропитанной противокоррозионными составами, применением оцинкованных кабелей, покраской узлов и т. п.

Конструктивное решение узлов должно быть таким, чтобы на них не задерживались влага и пыль.

Опыт длительной эксплуатации висячих и вантовых мостов показывает, что сохранность тросовых конструкций может быть надежно обеспечена обычными способами предупреждения коррозии, которые применяются к другим металлическим конструкциям.

Снеговая нагрузка на вантовые покрытия. Отметим, что на покрытиях с открытыми вантовыми конструкциями снег может задерживаться в большем количестве, чем на обычных кровлях. Поэтому при компоновке несущих конструкций необходимо обратить внимание на правильный выбор шага ферм и схемы их решетки, чтобы обеспечить хорошую продуваемость верхнего строения покрытия. Здесь следует избегать устройства сложных фонарей и не допускать перепадов высот, способствующих образованию снежных мешков.

Многолетние наблюдения за покрытиями, в которых ванты расположены снаружи с большим шагом, показали, что на них не наблюдаются снеговые скопления, которые превышали бы расчетные нагрузки.

3. Особенности проектирования комбинированных висячих и вантовых систем

Расчет и конструирование комбинированных висячих систем каркасов промышленных и гражданских зданий и сооружений, а также мостовых переходов ведется по двум предельным состояниям.

Расчетные характеристики материалов могут быть приняты по нормативам, разработанным для обычных и предварительно напряженных металлических и железобетонных конструкций.

Расчетные сопротивления стальных канатов определяются по формуле (СНиП II-V.3-62*):

$$R_{\text{к}} = k_0 m m_1 R_{\text{пр}}, \quad (1.1)$$

где $R_{\text{пр}}$ — предельные напряжения, определенные по разрывному усилию каната в целом, которое приводится в ГОСТе или заводском сертификате;

k_0 — коэффициент однородности ($k_0 = 0,8$);

m_1 — коэффициент условий работы материала в конструкции, принимается $m_1 = 0,8$;

m — коэффициент условий работы элемента конструкции или сооружения, который должен устанавливаться конструкцией по проектированию висячих элементов сооружений.

В. И. Киреенко предлагает принимать этот коэффициент равным 0,75 [18].

Кроме этого, может быть введен поправочный коэффициент для учета работы концевых креплений каната. Так, для машинной за-

плетки, для заливки и клиновой запрессовки концов каната в муфтах этот коэффициент может быть принят равным единице. При закреплении концов с помощью жимков, серег и других элементов, работающих на трении, должен быть введен понижающий коэффициент 0,75—0,85.

Для несущих конструкций принимаются канаты с жестким (металлическим) сердечником. Модуль упругости канатов после предварительной вытяжки может быть принят $1,4 \div 1,5 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$ и без вытяжки — $1,2 \div 1,3 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$.

Следует отметить, что расчетный модуль упругости канатов, принятый на основе лабораторных испытаний коротких образцов, как правило, не совпадает с модулем упругости элементов в деле. Это обстоятельство предопределяет расхождения между результатами испытаний построенного сооружения и расчетами его на жесткость. Чтобы максимально приблизить расчетный модуль упругости к действительному, можно принять его на основе испытаний сооружения при загрузении временной нагрузкой всего пролета. При этом расчетная схема сооружения наиболее определена (при стрелках $1/8$ — $1/10$ пролета приближается к линейной) и на результаты практически не влияют какие-либо неточности работы балки, так как при таком загрузении балка принимает на себя лишь 10—15% временной нагрузки.

Предельные расчетные прогибы вантовых комбинированных покрытий на стадии окончания монтажа балок должны приниматься $1/300$ — $1/500$ пролета. В дальнейшем после установки вертикальных распределяющих связей и омоноличивания настила, судя по экспериментальным исследованиям бескрановых висячих покрытий, жесткость конструкций должна увеличиться в 3—4 раза [21]. Для конструкций, изгиб которых происходит по двум полуволнам, нормируется «амплитуда» прогибов — сумма прогиба под грузом и подъем незагруженной части пролета. Для мостов и воздушных переходов трубопроводов нормативные прогибы от действия временной нагрузки предусматриваются соответствующими ведомственными инструкциями, но они также не должны превышать указанных пределов. Исключение может составить нормирование прогибов для проезда больших одиночных грузов при ограниченных скоростях движения. Например, для временных мостов на лесовозных дорогах можно, по-видимому, допустить амплитуду прогибов в пределах $1/100$ пролета моста [31].

В связи с расчетом комбинированных висячих конструкций по нелинейной схеме возникает вопрос, по какому предельному состоянию определять расчетные характеристики, зависящие от соотношения нагрузок? Известно также, что на результаты нелинейного расчета влияет соотношение постоянных и временных нагрузок, которое при одном и том же загрузении различно для первого и второго расчетных предельных состояний, так как коэффициенты перегрузок не одинаковы для этих нагрузок. Подходя к расчету строго, нелинейный расчет для одного загрузения следует проводить

дважды — по нормативным и расчетным нагрузкам. Это увеличивает трудоемкость расчета, особенно статически неопределимых систем, лишние неизвестные которых пришлось бы определять как для первого, так и для второго предельных состояний. Однако, имея в виду, что учет нелинейности — это уточнение расчетной схемы и висячих системах он обнаруживает излишние запасы в сооружении, можно ограничиться одним расчетом статически неопределимой системы, при меньшем значении характеристик, вычисленных по нормативным нагрузкам. Дальнейшее определение усилий для расчета прочности выполняется с учетом коэффициента перегрузки, а определение прогибов — по нормативным нагрузкам. Таким образом, при данном расчете по первому предельному состоянию в сооружении остается некоторый невыявленный запас прочности (менее 5%), который тем меньше, чем меньше отношение постоянных и временных нагрузок. Определение прогибов, которое при проектировании висячих конструкций часто является решающим в выборе того или иного варианта, при данном расчете будет выполнено наиболее точно.

4. Приближенные расчеты при компоновке схемы висячей конструкции и при назначении размеров элементов сооружения

К задачам компоновки висячей комбинированной конструкции относятся: выбор схемы сооружения и материалов, из которых оно должно быть изготовлено, установление генеральных размеров конструкции, предварительное назначение площадей и формы сечений элементов. Эти вопросы обоснованно могут быть решены лишь для конкретных географических и эксплуатационных условий на основе детального экономического анализа подобных конструктивных решений, оценки способов монтажа и надежности эксплуатации возведенных сооружений данного типа [54]. Учитывая, что пока не накоплено достаточного опыта проектирования и возведения висячих конструкций, выскажем общие рекомендации по выбору компоновочных параметров, которые в процессе расчета должны быть уточнены. Предлагаемые здесь ориентировочные расчеты основаны на самых приближенных предположениях, позволяющих получить формулы, в которых легко проследить физический смысл расчета и сознательно оценить его результаты с количественной стороны. Несмотря на приближенность, этими формулами удобно пользоваться на первых шагах ознакомления с методикой проектирования новых конструкций, а также для отладки программ расчета с помощью ЭЦМ.

Параметры, полученные при эскизном проектировании, используются для основного расчета, выполняемого с помощью вычислительных машин, чтобы, определив ординаты и площади линий влияния, выбрать наиболее невыгодные положения временной нагрузки. При этих положениях нагрузки производится окончательный

расчет сооружения с применением итерационных методов для учета геометрической нелинейности.

Выберем и рассчитаем следующие параметры.

1. Стрела первоначального провеса несущего кабеля. Стрела провеса кабеля — один из основных параметров, определяющих экономичность висячей конструкции и ее эксплуатационные качества.

Первым условием выбора оптимальной стрелы примем экономичность всего сооружения. В качестве общего правила положим, что при оптимальной стреле стоимость пролетного строения (кабеля, балки, подвесок) равна стоимости анкерных устройств (анкеров, пилонов, боковых оттяжек).

Для предварительного назначения стрелы могут быть рекомендованы пределы $f = (1/7 \div 1/8) l$ — для конструкций малых и средних пролетов (до 150 м) и $f = (1/9 \div 1/12) l$ — для $l > 150$ м для плотных или скальных грунтов, а также при использовании в качестве анкеров ранее возведенных сооружений (в случае применения висячих конструкций для покрытий промышленных зданий).

В качестве второго критерия выбора стрелы кабеля рассмотрим условие полного использования материала кабеля как по прочности, так и по жесткости.

Выведем формулу приближенных значений прогибов в предположении, что при загрузении всего пролета временной нагрузкой балка не воспринимает на себя нагрузки. Запишем условие деформаций кабеля как гибкой нити [16]:

$$l + \frac{8}{3} \cdot \frac{f_0^3}{l} = l + \frac{8}{3} \cdot \frac{f_1^3}{l} - \frac{H_1 - H_0}{E_R F_R l}, \quad (1.2)$$

где f_0, f_1 — начальная и конечная стрелы провеса кабеля;
 H_0, H_1 — распоры в кабеле в начальной стадии (от постоянной нагрузки) и суммарный распор от постоянной и временной нагрузок.

Считаем приращение распора за счет временной нагрузки p^n с избытком:

$$H_1 - H_0 = \frac{p^n l^2}{8f_0}. \quad (1.3)$$

Пренебрегая относительным увеличением стрелы провеса кабеля $\Delta f/l$ выше первой степени, получим

$$\frac{\Delta f}{l} = \frac{3}{128} \cdot \frac{p^n l^2}{E_R F_R} \cdot \frac{L_0}{f^2}, \quad (1.4)$$

где $E_R F_R$ — продольная жесткость кабеля;
 L_0 — так называемая приведенная длина кабеля (см. гл. III),

$$L_0 = l \left(1 + 8 \frac{f_0^2}{l^2} \right) + 2l_{от} \sec^2 \theta, \quad (1.5)$$

где $l_{от}$ — горизонтальная проекция боковой оттяжки, соединяющей вершину пилона с анкером;

θ — угол наклона оттяжки к горизонту.

В формуле (1.4) нагрузка на кабель принята с избытком приблизительно на 10%, так как не учтена работа балки. С избытком также принята линейная зависимость прогибов от нагрузки, что, в общем, должно дать некоторое завышенное значение прогибов, вычисленных по формуле (1.4) по сравнению с фактическим.

Приближенно определим прогибы балки комбинированной системы в четверти пролета при загрузке временной нагрузкой половины пролета — от опоры до середины балки. Положим для упрощения, что кабель нерастяжим, поэтому в нем распор от временной нагрузки составит $H_p = \frac{p^H}{2} \cdot \frac{l^2}{8f_0}$, а равномерную нагрузку от подвесок, направленную вверх, в расчете на единицу длины балки вычислим по формуле

$$z = H_p \frac{8f_0}{l^2} = \frac{p^H}{2}. \quad (1.6)$$

Просуммируем действие на балку двух нагрузок — внешней временной на половине пролета p^H и усилий от подвесок по всему пролету $p^H/2$. Получим на левой половине пролета нагрузку $p^H/2$, направленную вниз, а на правой — такой же величины, направленную вверх. Прогиб в четверти пролета в этом случае может быть найден как прогиб в середине балки с пролетом $l/2$. Таким образом, найдем

$$\frac{\eta}{l} = \frac{5}{384 \cdot 32} \cdot \frac{p^H l^3}{EI_i}. \quad (1.7)$$

Эта формула дает заниженные результаты для конструкций малых пролетов, так как не учитываются упругие удлинения кабеля, а для систем больших пролетов ($l > 300$ м) по этой формуле получим увеличенные прогибы, так как здесь не учитывается геометрическая нелинейность системы.

Подбор сечения кабеля по прочности выполним по приближенной формуле в предположении, что вся временная нагрузка передается на кабель:

$$F_2 = \frac{H}{mR_R \cos \varphi_0} = \frac{(q+p) l^2}{8fR_R} \left(1 + \frac{8f_0^2}{l^2} \right). \quad (1.8)$$

Здесь нагрузки p, q принимаются расчетными, т. е. с учетом коэффициентов перегрузки. φ_0 — угол наклона кабеля к горизонту вблизи пилона определяется из уравнения провисания кабеля:

$$y = \frac{4fx}{l^2} (l-x). \quad (1.9)$$

Отсюда:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi_{x=0} = \frac{4f_0}{l}; \quad (1.10)$$

$$\frac{1}{\cos \varphi_0} = \sqrt{1 + \frac{16f_0^2}{l^2}} \approx 1 + \frac{8f_0^2}{l^2}. \quad (1.11)$$

Приравнивая площади сечений кабеля из (1.4) и (1.8), получим

$$\frac{f_0}{l} = \frac{1}{3} \cdot \frac{l}{\Delta f} \cdot \frac{\rho^H}{\rho + q} \cdot \frac{R_R}{E_R}. \quad (1.12)$$

Например, для отношения нагрузок $\frac{\rho^H}{\rho^H} = 0,3$ и для предельного дополнительного провеса $\frac{\Delta f}{l} = \frac{1}{500}$, найдем:

а) для кабеля

$$\frac{f}{l} = \frac{1}{3} \cdot \frac{500 \cdot 3}{3 \cdot 1,3 + 10 \cdot 1,1} \cdot \frac{8000}{1,6 \cdot 10^6} \approx \frac{1}{6};$$

б) для стали 15ХСНД

$$\frac{f}{l} = \frac{1}{3} \cdot \frac{500 \cdot 3}{3 \cdot 1,3 + 10 \cdot 1,1} \cdot \frac{2900}{2,1 \cdot 10^6} = \frac{1}{22}.$$

Следовательно, при обычных стрелах $f = (1/8 \div 1/10) l$ несущий элемент, выполненный из кабеля, требуется рассчитывать по условиям жесткости (прочность его не будет использована полностью), а несущий элемент из прокатной стали должен рассчитываться по прочности.

Формулу (1.12) можно применить к рациональному выбору марки материала, из которого предполагается выполнить гибкий элемент комбинированной конструкции, если считать, что заданы стрела провеса, предельные прогибы и соотношения постоянных и временных нагрузок.

2. Длины оттяжек, соединяющих вершину пилона с анкером, и соотношения между размерами пролетов, высота пилона. Если проектировщик не связан заданными размерами боковых оттяжек, то они могут быть приняты из следующих условий:

а) чтобы использовать один непрерывный кабель для несущего элемента в пролете и для оттяжки, принимают равенство сечений основного кабеля и оттяжки; для этого углы наклона кабеля к горизонту вблизи пилона со стороны пролета и оттяжки должны быть равны. Из уравнения (1.10) и геометрической схемы оттяжки определим горизонтальную проекцию ее:

$$l_{\text{от}} = \frac{h_{\text{п}} l}{4f}. \quad (1.13)$$

Высота пилона обычной однокабельной системы принимается $h_{\text{п}} = 1,10 f$ или $h_{\text{п}} = f + 1,5 \div 2$ м. Округленно можно считать $l_{\text{от}} : l = 1 : 4$;

б) при изменении сечения кабеля на пилоне угол наклона оттяжки может быть принят из условия минимальной стоимости оттяжки и пилона [60], что соответствует $0 \div 30 \div 40^\circ$;

в) для конструкций, в середине пролета которых заведомо будут большие прогибы, может быть рекомендовано уменьшение длины оттяжек ($\theta = 45 \div 50^\circ$). При использовании комбинированных висячих схем для зданий с подвесным крановым оборудованием необходимо принимать меры к увеличению жесткости оттяжек: дополнительно увеличивать их сечение или использовать в качестве удерживающих элементов предварительно напряженные железобетонные стержни [20], рекомендуется передавать усилия на соседние жесткие каркасы, что должно способствовать уменьшению длины и увеличению жесткости оттяжек.

3. Требуемая жесткость (EI) балки и ее высота. Балка в комбинированной висячей системе играет роль распределительного элемента, воспринимающего местные сосредоточенные временные нагрузки и передающего их через подвески на кабель равномерно. Кроме этого, балка уменьшает общие кинематические перемещения пролетной конструкции при загрузке части пролета.

Требуемая жесткость балки может быть найдена из условия, что прогиб в четверти пролета (при наибольших кинематических перемещениях) будет равен предельным (допустимым) прогибам системы.

Из приближенной формулы (7) найдем

$$EI = \frac{5\rho^m l^3}{384 \cdot 32} \cdot \frac{l}{\Delta y}. \quad (1.14)$$

Здесь $\frac{\Delta y}{l}$ — заданный предельный прогиб.

Для выбора высоты балки (или фермы) жесткости примем условие, чтобы момент инерции ее соответствовал требованиям жесткости, а момент сопротивления принимался из расчета на прочность при загрузке временной нагрузкой половины пролета. Расчетная формула этой, как принято называть, минимальной высоты балки по условиям жесткости, может быть выведена из известного соотношения $\frac{h}{l} = \frac{2I}{W}$. Сюда необходимо подставить величину требуемого момента инерции из расчета по второму предельному состоянию, а величину момента сопротивления принять из расчета на прочность. Таким образом, получим

$$\frac{h_{\text{б}}}{l} = \frac{1}{k_{\text{б}}} \cdot \frac{l}{\Delta y} \cdot \frac{R}{E} \cdot \frac{1}{n_{\text{р}}}, \quad (1.15)$$

где $k_{\text{б}}$ — коэффициент, который зависит от характера временной нагрузки и величины пролета. По нашим расчетам: $k_{\text{б}} = 33 \div 19$ для конструкций больших пролетов; $k_{\text{б}} = 20 \div 11$ для малых пролетов. Первые цифры соответствуют сосредоточенным нагрузкам, вторые — распределенным; $n_{\text{р}}$ — коэффициент перегрузки временной нагрузки.

Высоты балок, подсчитанные по формуле (1.15), сравнительно велики $\left[h_6 = \left(\frac{1}{80} \div \frac{1}{30} \right) l \right]$ и ближе соответствуют сквозным фермам, чем балкам. В настоящее время в мостостроении широко используются сталебетонные балки, высота которых принимается в 2—2,5 раза меньше, чем высота стальных балок, вычисленная по формуле (1.15). В ряде случаев по архитектурным, производственным и другим соображениям уменьшают высоту балки по сравнению с полученной по формуле (1.15), но при этом для удовлетворения требованиям жесткости уменьшается расчетное сопротивление при подборе сечения балки по прочности.

4. Выбор материалов для пролетных конструкций и подсчет веса элементов. На стоимость сооружения в целом существенное влияние оказывает характер материала и конструктивного решения вспомогательных элементов — поперечных балок, настилов, связей. Основное требование в выборе материалов и конструкций этих элементов — уменьшение веса, которое может в некоторых случаях привести к удорожанию вспомогательных элементов, но уменьшит стоимость всего сооружения, так как легкие висячие конструкции имеют меньший объем анкеров и пилонов, меньшие сечения кабеля, подвесок и проще узлы сопряжения элементов, чем в конструкциях с тяжелыми настилами. Для этой цели в висячих конструкциях должны применяться элементы из алюминиевых сплавов и из высокопрочных сталей, сквозные облегченные фермы, легкие бетоны и другие эффективные материалы и конструкции. Подсчет собственного веса пролетного строения для первоначального расчета несущих элементов должен выполняться по приближенным формулам, в которых вес вспомогательных конструкций может быть связан с весом основных несущих элементов — кабеля, балки жесткости.

Вес единицы длины балки с учетом веса связей

$$g_6 = \frac{W}{\rho} 1,2 \gamma_0 \psi_6 = \frac{1,2 M \gamma_0 \psi_6}{0,35 h_6 R} \quad (1.16)$$

где W , ρ , h_6 — требуемый момент сопротивления, ядровое расстояние и высота сечения балки;

γ_0 , ψ_6 — объемный вес и конструктивный коэффициент;
 $\psi_6 = 1,3 \div 1,4$ для двутавровых и коробчатых балок;
 1,2 — коэффициент, учитывающий вес связей.

В формуле (1.16) не учитывается работа балок на действие боковых ветровых нагрузок. Для пролетных строений мостов увеличение сечения за счет этих нагрузок достигает 50%; мы можем подсчитать его по фактическим осевым усилиям от изгибающих моментов при действии боковых сил, рассматривая балки как пояса ветровой фермы. Для увеличения боковой жесткости пролетного строения моста необходимо обеспечивать совместную работу настила с балками, омоноличивать настил, развивать горизонтальные связи

и принимать расстояние между балками в поперечном направлении не менее $1/30$ пролета.

Вес настила определяется в зависимости от его конструкции и примененных материалов. Для автомобильных мостов вес железобетонного настила составляет 100 — 200 кг/м² при расстоянии между балками жесткости соответственно 8—18 м. Вес металлического настила может быть взят в 2—2,5 раза меньше.

Вес единицы длины кабеля с учетом узлов и подвесок вычисляется по принятой площади F_K или F_2 [см. формулы (1.4) и (1.8)] и по геометрической длине L_T :

$$g_K = \frac{F_K L_T}{l} \gamma_0 \psi_K, \quad (1.17)$$

где

$$L_T = l \left(1 + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{l^2} \right) + 2l_{от} \sec \theta;$$

θ — угол наклона оттяжки к горизонту;

$\psi_K = 1,25 \div 1,35$ — конструктивный коэффициент кабеля с учетом веса узлов и подвесок соответственно для пролетов 300—100 м.

5. Компоновка систем повышенной жесткости. Применение различных мероприятий по увеличению жесткости всяких комбинированных систем направлено главным образом на уменьшение кинематических перемещений — прогибов в четверти пролета при загрузке временной нагрузкой половины пролета. Эти прогибы в системах повышенной жесткости, как правило, в 1,5—2 раза меньше прогибов середины пролета. Таким образом, расчетным нагружением сложных всячих и вантовых систем, определяющим наибольшее сечение кабеля по жесткости, является нагружение временной нагрузкой всего пролета. При этом всячая ферма независимо от схемы решетки получает почти такие же усилия в основном кабеле, как и обычная схема с вертикальными подвесками. Поэтому в первом приближении сечение кабеля и размеры анкеров любой системы могут быть приняты из расчета обычной схемы. Момент инерции балки системы повышенной жесткости для расчета статически неопределимой конструкции на стадии начального приближения принимается по формулам (1.14) и (1.15), выведенным для однокабельной схемы, и вводится коэффициент 0,3—0,5 в зависимости от схемы и жесткости всячей фермы.

В дальнейшем сечения уточняются на каждой стадии нелинейного итерационного расчета. Высота пилонов, а следовательно, и длины оттяжек различных схем повышенной жесткости должны приниматься в соответствии со схемой всячей фермы: двухкабельные фермы — $h_n = (1,2 \div 1,3) f$; системы с треугольной решеткой — $h_n = (1,3 \div 1,4) f$; схема с прикреплением кабеля к балке в середине пролета — $h_n = f$; радиально-вантовые схемы без кабеля — $h_n \geq 0,15 l$.