

В.К. Качурин, А.В. Брагин, Б.Г. Ерунов

Проектирование висячих и вантовых мостов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 528
ББК 38.2
В11

В11 **В.К. Качурин**
Проектирование висячих и вантовых мостов / В.К. Качурин, А.В. Брагин, Б.Г. Ерунов – М.: Книга по Требованию, 2024. – 280 с.

ISBN 978-5-458-41240-7

ISBN 978-5-458-41240-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

РАЗДЕЛ I

СИСТЕМЫ И КОНСТРУКЦИИ

ГЛАВА I.

СИСТЕМЫ ВИСЯЧИХ И ВАНТОВЫХ МОСТОВ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Висячие системы можно разделить на две основные группы. К первой относятся мосты типа, показанного на рис. I-1, а. Это давно известная система, в которой элемент ABC изготавливали из отдельных звеньев, объединенных в цепь.

Вместе с оттяжками AD и CE и пилонами AA_1 и CC_1 цепь воспринимала всю нагрузку. Такие мосты называли цепными. В настоящее время элемент ABC почти никогда не конструируют в виде цепи, а делают из тросов, и удобное название «цепной» почти не встречается. Однако элемент ABC по своему очертанию очень близок к цепной линии, поэтому в данной работе термин «цепной» мост сохраняется.

В отличие от цепных мосты второй группы (рис. I-1, б) или им подобные называют вантовыми висячими или просто вантовыми мостами. Здесь вертикальную нагрузку воспринимает уже не цепь, а совокупность раскосов и поясов, каждый из которых является необходимым.

К невисячим системам (рис. I-1, в) относятся вантовые балочные пролетные строения (система К. Г. Протасова). Она состоит из горизонтальной жесткой распорки, жестких стоек и тросовых раскосов и поясов.

Наиболее разнообразны (чем цепные) вантовые висячие мосты, которые разделяют на три группы.

Первая — статически определимые вантовые фермы, не отличающиеся многообразием. Сейчас их вытесняют другие системы.

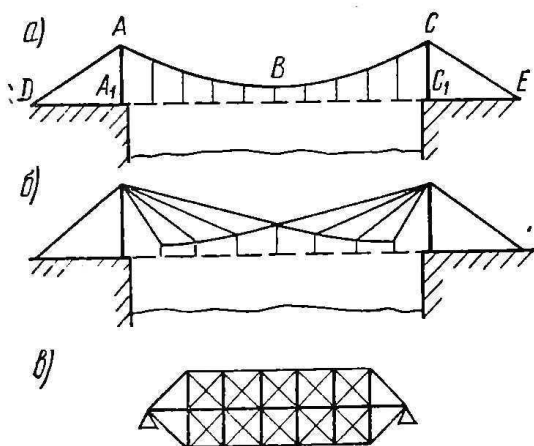


Рис. 1-1

но отнести также вантовые консольные пролетные строения, которые применяют пока редко.

§ 2. СИСТЕМЫ ЦЕПНЫХ МОСТОВ

Цепные мосты (рис. 1-2, а) строили в Индии и Китае уже в I в. Это изменяемые системы без балки жесткости, в которых проезжая часть (пунктир на рис. 1-2, а) поддерживается при помощи вертикальных элементов — подвесок, присоединенных к цепям.

Такие системы были очень дешевыми и в первой половине прошлого столетия еще применялись довольно широко, однако ввиду их изменчивости оказались настолько гибкими, что нередко разрушались ветром [26, 45]. В настоящее время такие системы в мостах практически не применяют.

Для придания системе необходимой жесткости в плоскости провеса цепей моста стали применять балки или фермы жесткости (рис. 1-2, б), располагаемые в уровне проезжей части. В 1853 г. одними из первых были построены два цепных моста одинаковой конструкции через рукава р. Великой в г. Острове. Эти мосты с пролетами по 93 м имели довольно простые балки жесткости в виде деревянных ферм, которые в 1926 г. были заменены металлическими. Оба сооружения находятся в эксплуатации до сих пор.

Мосты с балками жесткости получили широкое распространение, особенно при больших пролетах. В ряде стран построены мосты с пролетами до 1 км и более. Все они имеют цепную систему с балкой жесткости. Такие мосты по величине пролетов пока не имеют себе равных среди других систем.

Цепные мосты с балками или фермами жесткости очень разнообразны. Трехпролетный мост (рис. 1-2, в) имеет неразрезную балку жесткости. Цепи также проходят через все три пролета и закрепляются в береговых массивах. Балка жесткости на всей длине моста поддерживается подвесками. Недостаток такого закрепления цепей заключается в том, что натяжение (распор) цепей передается

Вторая — статически неопределимые предварительно напрягаемые фермы без балок жесткости. Эти системы начинают применять, однако преимущественно для различных перекрытий.

Третья более распространена в мостах. Это статически неопределимые вантовые фермы с балками жесткости.

Балочные пролетные строения наименее многообразны. Помимо системы, показанной на рис. 1-1, в, возможны конструкции переменной высоты. К ним мож-

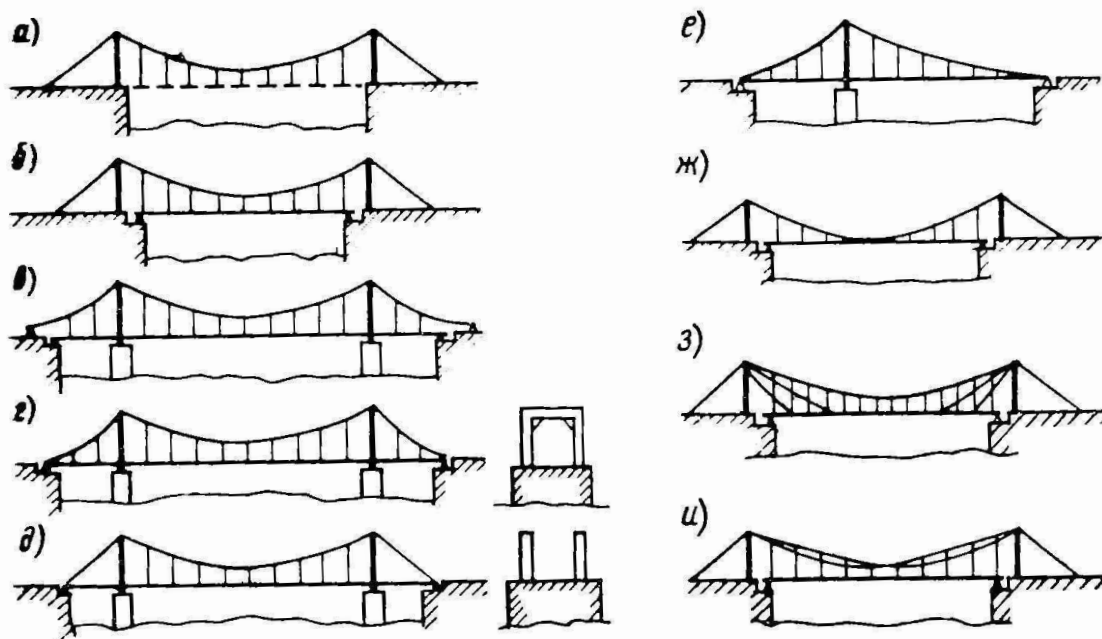


Рис. 1-2

на массивы опор и их приходится делать очень тяжелыми и дорогими. Эти системы называют распорными.

В безраспорной системе (рис. 1-2, г) нет указанного недостатка. Здесь концы цепи прикреплены к концам балки жесткости. Это позволяет отказаться от устройства больших упорных массивов, однако горизонтальная составляющая усилий в цепях передается на балку жесткости как на распорку; балка жесткости, кроме изгиба, начинает работать на сжатие и сечение ее значительно возрастает.

Безраспорные системы (рис. 1-2, г) могут иметь очень различное соотношение пролетов (одно из распространенных $0,5 : 1 : 0,5$). Если крайние пролеты значительно меньше среднего, подвески в них не ставят (рис. 1-2, д). Балки жесткости таких мостов часто делают неразрезными, но встречаются и разрезные.

По этой системе в 1938 г. был построен Крымский мост в Москве, имеющий пролеты $47,5 + 168 + 47,5$ м. Этот мост интересен еще одной особенностью. Обычно два пилона, расположенные на опоре, объединяют друг с другом сверху поперечными распорками (рис. 1-2, г, справа). Крымский мост имеет большую ширину — 26,2 м (не считая тротуаров), поэтому стальные пилоны расположены на относительно большом расстоянии друг от друга. Соединение их распоркой ухудшило бы внешний вид сооружения, поэтому от устройства ее отказались (рис. 1-2, д, справа).

Следует заметить, что для металлических пилонов такое решение раньше не применяли. Каменные пилоны обычно распорками не соединяли.



Рис. I-3

Иногда крайние пролеты имеют различную величину. Тогда пилон, опирающийся на быки со стороны большего бокового пролета, приходится делать выше другого. Сооружение оказывается несимметричным. Системы с числом пролетов более трех и двухпролетные (рис. I-2, е) почти не встречаются. Существуют также системы, в которых для повышения жесткости цепь в середине среднего пролета прикрепляют к балке (рис. I-2, ж).

Наибольшие прогибы цепных мостов получают при загрузке полупролета. При этом балка жесткости изгибается по S-образной кривой и в четвертях пролета возникают большие перемещения. Для уменьшения их можно применять наклонные ванты на участках вблизи опор (рис. I-2, з). Благодаря этому балки жесткости как бы получают дополнительные упругие опоры вблизи точек наибольших перемещений. Жесткость системы несколько увеличивается. Такое решение применяли в прошлом столетии, но большого распространения оно не получило, в частности, ввиду неблагоприятного внешнего вида сооружения.

В СССР в 30-х годах С. А. Цапным была предложена интересная система (рис. I-2, и), которая называется двухцепной. Очертание каждой цепи соответствует веревочному многоугольнику, получаемому от загрузки полупролета. Поэтому при таком загрузке большая часть нагрузки воспринимается одной из цепей. Балка жесткости почти не работает и имеет небольшие прогибы, поэтому выполняют ее легкой. Двухцепные системы могут быть и трехпролетными [45].

Интересна система запроектированного моста (пролеты 732 + 1524 + 732 м) через Мессинский пролив. Ферма жесткости его имеет переменную высоту (рис. I-3). При этом на протяжении длины моста кабель на участках АВ, CD и EF сливается с верхним поясом фермы жесткости и заменяет этот пояс, несмотря на то что от временной нагрузки он иногда должен работать на сжатие. На этих участках в кабеле растягивающее усилие от постоянной нагрузки значительно больше, чем сжатие от временной нагрузки. Поэтому кабель всегда работает на растяжение.

Вблизи промежуточных опор предусмотрены наклонные ванты, расходящиеся веером от этих опор. Ванты натянуты и фиксируют очертание кабеля, что увеличивает жесткость сооружения.



Рис. I-4

Следует заметить, что прием слияния цепи с верхним поясом балки жесткости применяли уже в 1931 г. на

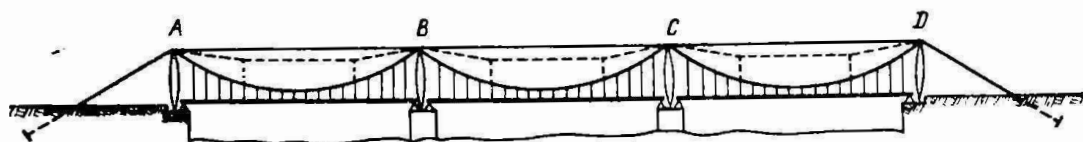


Рис. I-5

Фларнанопольском мосту в Бразилии. Постановка же вант для фиксации очертания цепи здесь предложена впервые.

Встречаются также мосты с прерывным поясом. К ним относятся, например, мост через р. Рейн между Дуйсбургом и Гомбергом, один из вариантов моста через р. Рейн у г. Кёльна. Цепь в этих мостах на определенном участке отсутствует. Схема трехпролетного безраспорного моста такой системы показана на рис. I-4. На участках AA и BB балка жесткости поддерживается цепями через подвески, а на участке AB она работает как простая балка. По-видимому, такая система может быть экономичнее (хотя и незначительно) обычной трехпролетной системы [1].

К первым многопролетным цепным мостам относится мост через р. Днепр в Киеве. Он имел четыре пролета по 134 м, два крайних — по 69 м и разводной пролет. Пролеты отделены друг от друга каменными пилонами. Цепи оперты на пилоны подвижно.

При таком решении загрузка одного пролета вызывает в других пролетах прогиб вверх. Жесткость оказывается очень малой, для современных нагрузок недостаточной, и инженерная мысль начала работать над изысканием путей повышения жесткости. Помимо жестких пилонов и жесткого прикрепления к ним цепей, был найден только один путь, имеющий небольшие вариации — устройство предварительно натянутых затяжек AB , BC и CD , соединяющих вершины пилонов (рис. I-5). Если загрузить временной нагрузкой один из пролетов, например средний, в нем цепь окажется натянутой сильнее, чем в смежных. Неуравновешенная часть этого натяжения при шарнирно опертых пилонах будет восприниматься более жесткими элементами боковых пролетов, т. е. затяжками AB и CD и дальше оттяжками.

Все эти элементы прямые, поэтому деформации их будут только упругими и, следовательно, перемещения вершин пилонов и прогибы загруженного пролета окажутся небольшими.

Однако постановка таких затяжек ухудшает внешний вид сооружения, и если мост в Киеве с каменными пилонами украшал реку и город, то мост с затяжками наверху неблагоприятен в эстетическом отношении.

Следует заметить, что прямые затяжки (см. рис. I-5) в действительности будут провисать от действия собственного веса. Этот провес при загрузке

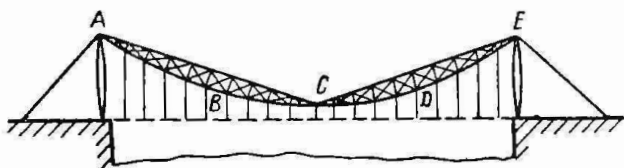


Рис. I-6

нии моста временной нагрузкой несколько изменится, что явится лишним фактором возбуждения колебаний сооружения.

Чтобы смягчить это явление, в двух-трех местах можно слегка оттянуть вниз затяжку, как показано пунктиром на рис. I-5. Это почти полностью устранил колебания затяжек, но внешний вид сооружения получится еще более неприглядным. По-видимому, в силу этих причин многопролетные мосты практически не получили распространения.

Имеются также некоторые разновидности висячих мостов, которые можно отнести к цепным. Цепной мост должен иметь цепи, которые воспринимают вертикальные нагрузки, и балки жесткости, воспринимающие изгибающие моменты при неравномерном нагружении пролета. Очевидно, обе эти функции может выполнять один элемент, т. е. жесткая цепь.

Несколько таких мостов построено во второй половине прошлого столетия. Например, в 1877 г. был сооружен мост в Питсбурге пролетом 244 м. Полотно моста подвешено к цепи $ABCDE$ параболического очертания (рис. I-6), которая изготовлена из звеньев и воспринимает всю постоянную нагрузку. Балка жесткости отсутствует. В каждом полупролете цепи ее заменяет верхний пояс (AC и CE) и система раскосов. Верхние пояса имеют жесткое сечение и способны работать на сжатие, которое в них возникает.

Все системы, кроме показанной на рис. I-2, *a*, статически неопределимы. В распорных системах при этом возникают температурные напряжения, которые иногда могут оказаться значительными. От температурных напряжений можно избавиться постановкой необходимого количества шарниров в балках жесткости: например, одного — в середине пролета (см. рис. I-2, *b*); над быками и в середине среднего пролета (см. рис. I-2, *в*); над быком и по середине одного из пролетов (см. рис. I-2, *e*). Однако жесткость систем с шарнирами резко снижается и при современных нагрузках не может удовлетворить предъявляемым к мостам требованиям. В связи с этим статически определимые цепные системы не применяют.

Заслуживают внимания еще некоторые системы цепных мостов, не получившие в свое время распространения, но в современных условиях являющиеся, по мнению авторов, перспективными. Например, еще в прошлом столетии [57] была предложена система (рис. I-7, *a*), в которой для уве-

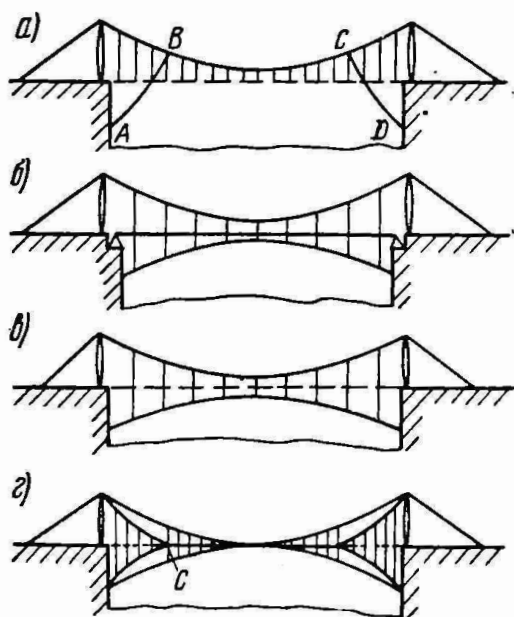


Рис. I-7

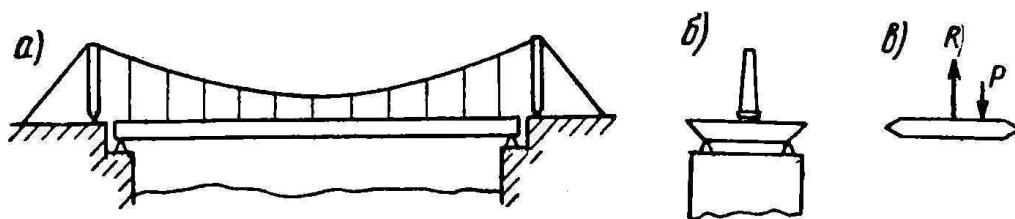


Рис. I-8

личения жесткости поставлены оттяжки AB и CD . Они не натянуты и поэтому не могут препятствовать перемещению точки B (или C) вверх и тем самым опусканию противоположной точки C (или B). Если систему снабдить балкой жесткости и натянуть элементы AB и CD , можно увеличить ее жесткость.

На рис. I-7, б приведена цепная система с балкой жесткости и дополнительной цепью внизу. Ниже показано, что такая система даже при отсутствии балки жесткости (рис. I-7, в) может быть выполнена теоретически сколь угодно жесткой. Для этого необходимо лишь натянуть нижнюю цепь. Эта система была известна уже в 1823 г. [26], но в то время не умели пользоваться приемами искусственного регулирования усилий и система распространения не получила. Однако она представляет интерес, так как изменением усилия в натяжной цепи можно регулировать ее жесткость, а следовательно, и период колебаний в соответствии с потребностью конструкции в целом. Подобные системы будут рассмотрены.

Цепные системы, основанные на том же принципе, что и система, изображенная на рис. I-7, в, имеют некоторые разновидности, которые показаны ниже. К ним относится многопоясная система (рис. I-7, г).

Мосты с балками жесткости (цепные и вантовые), построенные в течение двух последних десятилетий, нередко имеют не две фермы с подвешенной между ними проезжей частью, а одну — в середине ширины моста. Проезжая часть расположена по обе стороны фермы. В таких системах приходится принимать конструктивные меры для обеспечения устойчивости пилонов и проезжей части. При загрузении пролетного строения с одной стороны по ширине моста (рис. I-8, в) реакции R со стороны подвесок не могут уравновесить внешнюю нагрузку, ибо силы P и R составят момент, скручивающий проезжую часть. Две отдельные балки жесткости плохо воспринимают такой скручивающий момент, поэтому система из двух балок жесткости, соединенных проезжей частью и связями, обычно заменяется «коробкой», как это показано на рис. I-8, б, в. Коробка обычно бывает не прямоугольной, а трапецеидальной или шестиугольной формы для лучшего обтекания ветровым потоком. Одиночные пилоны следует делать жестко закрепленными в поперечном направлении и шарнирно опертыми в продольном. Следует заметить, что в последнее время для лучшей обтекаемости коробки жесткости подобного сечения начали применять и в мостах, имеющих по ширине две цепи или две системы вант.

Статически определимые вантовые системы показаны на рис. I-9, а, б. Их начали применять во Франции с 1914 г., но они не получили широкого распространения. В системе Жискляра (см. рис. I-9, а) очертания поясов АВ и ВС определяют из условия, чтобы ни в одном раскосе не возникали сжимающие напряжения.

В другой системе (см. рис. I-9, б) пояса и раскосы изготавливают из тросов, как и в системе Жискляра. Стойки между поясами могут работать на сжатие. Раскосы в этой системе работают как в фермах Гау — Журавского, однако здесь раскос работает на растяжение, а если при новом положении нагрузки в нем должно возникнуть сжимающее усилие, то он исключается из работы и его заменяет встречный раскос. Очертание поясов подбирают так, чтобы при любой нагрузке кривая давления, проходящая через три шарнира А, В и С, проходила между поясами. Тогда оба пояса будут работать только на растяжение.

Эти системы теперь потеряли свое значение и в дальнейшем будут рассмотрены менее подробно, чем другие.

Статически неопределимые вантовые системы без балок жесткости (рис. I-9, в — е), за исключением первой из них, распространения в мостах пока не получили. Но они достаточно просты и в то же время перспективны, поэтому будут кратко рассмотрены. Система, показанная на рис. I-9, в, применена в мостах-трубопроводах [33, 34, 19]; подобная приведенной на рис. I-9, д описана в [23].

Статически неопределимые вантовые системы раньше не применяли по двум причинам. Во-первых, в этих системах от изменения температуры возникают довольно высокие напряжения, которые при имевшихся прочностях материалов составляли слишком большой процент от используемой величины напряжений. Во-вторых, приемы искусственного регулирования усилий освоены строителями только на протяжении двух-трех последних десятилетий, а рассматриваемые системы требуют такого регулирования во избежание возникновения сжимающих усилий в некоторых вантах или временного выхода их из работы («выходящие» стержни).

Нет сомнения, что при использовании современных прочных материалов и современных возможностях производства работ эти системы найдут применение.

В последнее десятилетие довольно широко применяли вантовые системы с балками жесткости (рис. I-9, ж, з). Тросы, поддерживающие балки жесткости, расположены пучком (см. рис. I-9, ж) или параллельны друг другу (см. рис. I-9, з). Первая из систем получила название «пучок», а вторая — «арфа».

Оригинальный мост построен в 1959 г. через р. Рейн в Кёльне [19]. Он имеет шесть пролетов, величина которых выбрана в соответствии с местными условиями ($\sim 49 + 89 + 48 + 302 + 151 + 52$ м). Все пролеты перекрыты неразрезной балкой, которая в двух наибольших пролетах усилена вантами (рис. I-10).

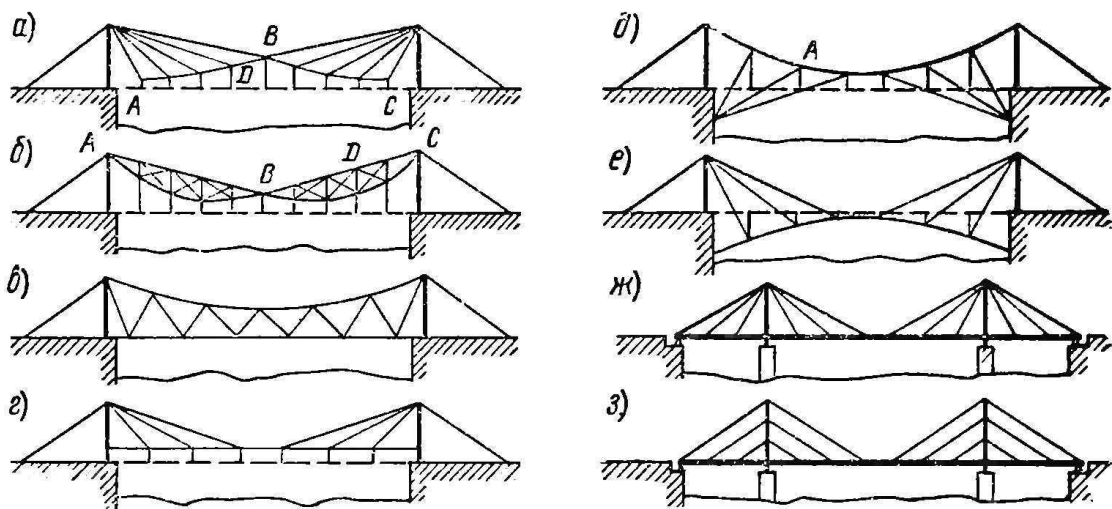


Рис. I-9

Система этого моста оригинальна еще тем, что стойки пилонна установлены наклонно и вершины их соединены (рис. I-10, справа). Благодаря этому все ванты верхними концами закреплены на оси моста, а нижними — по краям проезжей части. Таким образом, получается, что они веерообразно расположены не только по фасаду, но и в плане. Это решение можно признать удачным, так как боковая жесткость моста при таком расположении ванты повышается и внешний вид сооружения получается оригинальным и интересным.

Для вантовых мостов с балками жесткости предлагают все новые и новые конструктивные формы. В 1967 г. были опубликованы результаты конкурса на проекты моста через пролив Большой Бельт. На конкурс подали 155 проектов. Для пролетов свыше 200 м предложены в основном мосты с наклонными вантами и коробчатыми балками жесткости.

Одна из четырех первых премий была присуждена проекту моста, схема которого показана на рис. I-11. Проект интересен, во-первых, тем, что здесь показана возможность и целесообразность перекрытия вантовой системой с балками жесткости пролетов величиной в 600 м. Кроме того, мост спроектирован двухъярусным совмещенным (для автомобилей (наверху) и железной дороги). В среднем пролете фермы жесткости имеют подвесной пролет. Подобное решение в мостах рассматриваемого вида применено впервые.

Не останавливаясь на деталях развития систем вантовых мостов, отметим мост через р. Днепр в Киеве, построенный в 1963 г. (рис. I-12). Этот мост имеет ряд интересных конструктивных особенностей, из которых основная — применение железобетонных балок жесткости [19]. Некоторые конструктивные детали будут показаны ниже.

Мост через р. Аск (рис. I-13) в Ньюпорте (Англия) имеет две особенности. Во-первых, с каждой стороны главного пролета

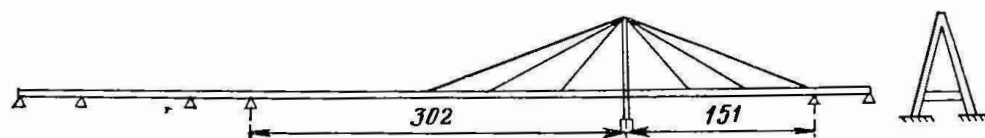


Рис. I-10

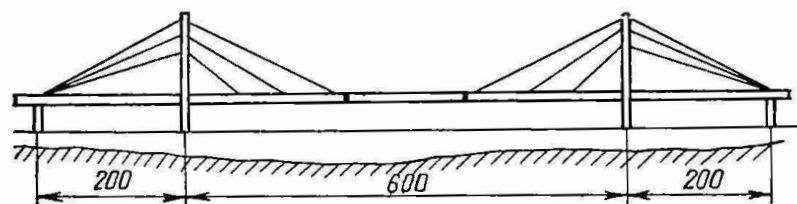


Рис. I-11

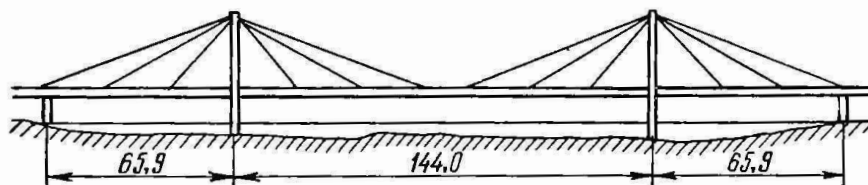


Рис. I-12

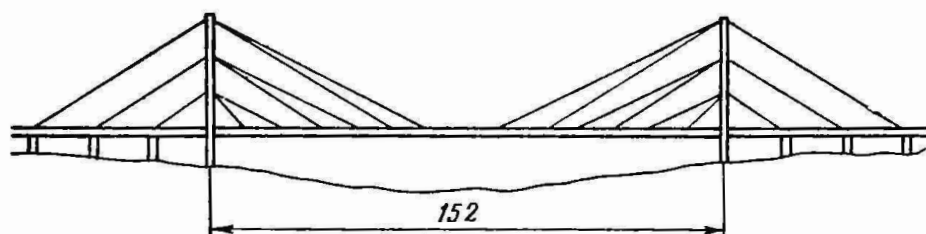


Рис. I-13

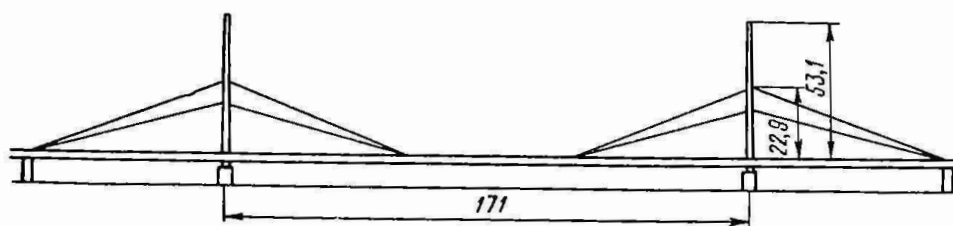


Рис. I-14