

УДК 624.534

ЖЕСТКОСТЬ ВИСЯЧИХ МОСТОВ

Скунов И.В., Черевань А.С., Кадомцева Е.Э.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, e-mail: elkadom@yandex.ru

За свою многовековую историю человек постоянно стремился облегчить для себя преодоление водных преград. Усилия инженерной мысли привели к изобретению мостов, конструктивные решения которых постоянно совершенствовались и становились разнообразнее. Так появились балочные, арочные, рамные, консольные, комбинированные, наплавные и разводные мосты. Особый тип представляют собой висячие мосты. Большие или меньшие висячие мосты есть во всех странах мира. В последние годы дорожно-строительный «бум» в Японии привел к необходимости замены паромного сообщения между некоторыми островами мостовыми связями, а определенные особенности в рельефе дна обусловили неизбежность применения висячих систем, однако, классической страной висячих мостов, считаются Соединенные Штаты Америки. Грандиозные каньоны на крайнем западе, широкие полноводные реки и глубокие проливы Тихоокеанского побережья служат объективной предпосылкой расцвета висячих систем именно в этом районе земного шара. Схема строения данных мостов позволяет наиболее легко перекрывать большие пролеты и существенно снижает собственный вес моста. Здесь мы рассмотрели случай однопролетного моста, для объяснения метода анализа напряжений в висячем мосту, а также проиллюстрировали способы повысить жесткость висячих мостов, привели формулы для расчета прочности моста и жесткости балок в подвесных мостах.

Ключевые слова: висячий мост, жесткость, прочность

SUSPENSION BRIDGE STIFFNESS

Skunov I.V., Cherevan A.S., Kadomtseva Ye.E.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: elkadom@yandex.ru

During its long history, people are constantly striving to facilitate for themselves pre-overcoming water obstacles. The efforts of engineering have led to the invention of bridges, constructive solutions which are constantly improved and become more diverse. So there is a beamed, arched, frame, cantilever, combination, floating and movable bridges. A special type are hanging bridges. There are large or smaller suspension bridges in all countries of the world. In recent years, the road construction boom in Japan has led to the need to replace ferry connections between some Islands with bridge connections, and certain features in the bottom relief have made the use of suspension systems inevitable, but the United States of America is considered a classic country of suspension bridges. Grandiose canyons in the far West, wide deep rivers and deep passages of the Pacific coast serve as an objective prerequisite for the flourishing of hanging systems in this area of the globe. The scheme of the structure of these bridges allows you to most easily cover large spans and significantly reduces the own weight of the bridge. Here we have considered the case of a single-span bridge, to explain the method of stress analysis in the suspension bridge, and also illustrated the ways to increase the rigidity of the suspension bridges, led the formula for calculating the strength of the bridge and the rigidity of the beams in the suspension bridges.

Keywords: suspension bridge, stiffness, strength

Висячий мост — мост, в котором основная несущая конструкция выполнена из гибких элементов (кабелей, канатов, цепей и других), работающих на растяжение, а проезжая часть подвешена. Теория подкрепленных висячих мостов берет свое начало от работ В. Дж. Рэнкина и была развита в предположении, что при действии подвижной нагрузки подкрепляющая ферма остается абсолютно жесткой; следующий шаг был сделан профессором Меланом, который первый принял во внимание прогиб пролетной фермы. Применение этой теории к проектированию больших американских висячих мостов, таких, как Манхаттанский мост в Нью-Йорке и Камденский мост в Филадельфии, показывает, что эта более точная теория имеет большое практическое значение, также она приводит к значительной экономии материала. В современных висячих мостах широко применяют проволочные кабели и канаты из

высокопрочной стали с пределом прочности 2–2,5 Гн/м² (200–250 кгс/мм²), что существенно снижает собственный вес моста и позволяет перекрывать большие пролеты. Наряду с этим висячие мосты имеют малую жесткость вследствие того, что при движении временной нагрузки по мосту кабель (цепь) изменяет свою геометрическую форму, вызывая большие прогибы пролетного строения. Для уменьшения прогибов висячие мосты усиливают в уровне их проезжей части продольными балками или фермами жесткости, распределяющими временную нагрузку и уменьшающими деформацию кабеля. [1]

Висячие мосты находят наиболее удачное применение в случае большой длины моста, невозможности или опасности установки промежуточных опор (например, в судоходных местах). Мосты такого типа выглядят гармонично, так, одним из наиболее известных примеров является мост

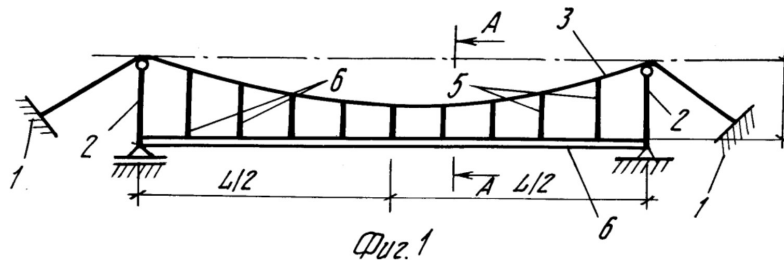
Золотые Ворота, расположенный на входе в бухту Сан-Франциско. [2]

Прочность моста

Прочность моста определяется не только прочностью используемого материала, но также и упругой устойчивостью элементов конструкции. Наиболее благоприятные условия сточки зрения устойчивости будут иметь место, когда основные элементы конструк-

ции растянуты. Такие условия выполняются в висячих мостах, и в этом одна из причин их частого использования в качестве больших современных конструкций. Обычно мосты монтируются так, что постоянная нагрузка полностью воспринимается тросом. [3]

Для того чтобы объяснить применение методов анализа напряжений в висячем мосту, рассмотрим самый простой случай однопролетного моста (см. рисунок).



Уравнение прогиба троса при действии постоянной нагрузки выглядит следующим образом:

$$H_0 = \frac{d^2 y}{dx^2} = -w,$$

где H_0 – горизонтальная составляющая натяжения троса, вызванная постоянной нагрузкой; w – интенсивность этой нагрузки

Представим теперь подвижную нагрузку интенсивностью p (p – известная функция x), действующую на ферму. Часть этой нагрузки будет передаваться тросу, а часть вызовет изгиб фермы. Пусть q – интенсивность нагрузки, переданной тросу; μ – прогиб фермы, а βH_0 – увеличение натяжения троса. Тогда прогиб троса после нагружения будет описываться уравнением:

$$H_0(1 + \beta) \frac{d^2(y + \eta)}{dx^2} = -(w + q),$$

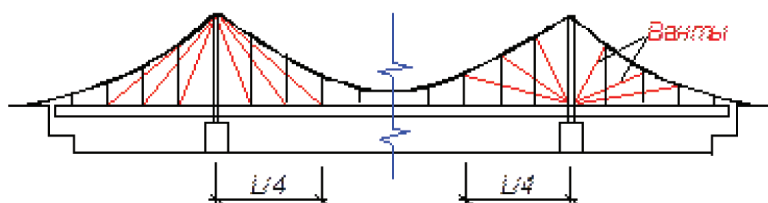
а дифференциальное уравнение прогиба оси фермы может быть записано следующим образом:

$$EI \frac{d^4 \eta}{dx^4} = p - \beta \omega + H_0(1 + \beta) \frac{d^2 \eta}{dx^2}.$$

Если величина p известна, то это уравнение может быть решено без каких-либо затруднений.

Способы повысить жесткость висячих систем

1. Постановка наклонных вант;



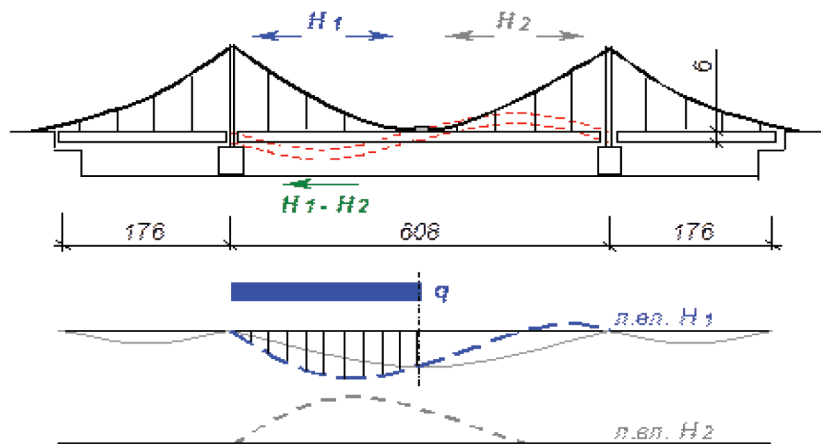
В таких системах, вертикальные ванты ограничивают вертикальные перемещения системы, а горизонтальные (полюгие) – препятствуют горизонтальным перемещениям.

При нагружении половины пролета балка жесткости имеет S-образный прогиб, наибольшие перемещения, при этом, возникают в четверти пролета, для уменьшения этих перемещений и применяют наклонные

нисходящие ванты вблизи опор, которые являются своего рода, дополнительными упругими опорами. Установленные в системе восходящие ванты натянуты, и фиксируют очертание кабеля.

Системы с восходящими и нисходящими дополнительными вантами не получили широкого распространения из-за неблагоприятного внешнего вида, однако примеры имеются. [4]

2. Жесткое прикрепление цепи к балке (в одной точке) в середине пролета;



В результате обжатия появляется сила трения кабеля о конструкцию, причем, необходимо создать такое обжатие, чтобы $F_{тр} > H_{вр}$ ($F_{тр} = m'N$, N – нагрузка от прижимающей части (того, что лежит на поверхности)).

Плюсы данного метода:

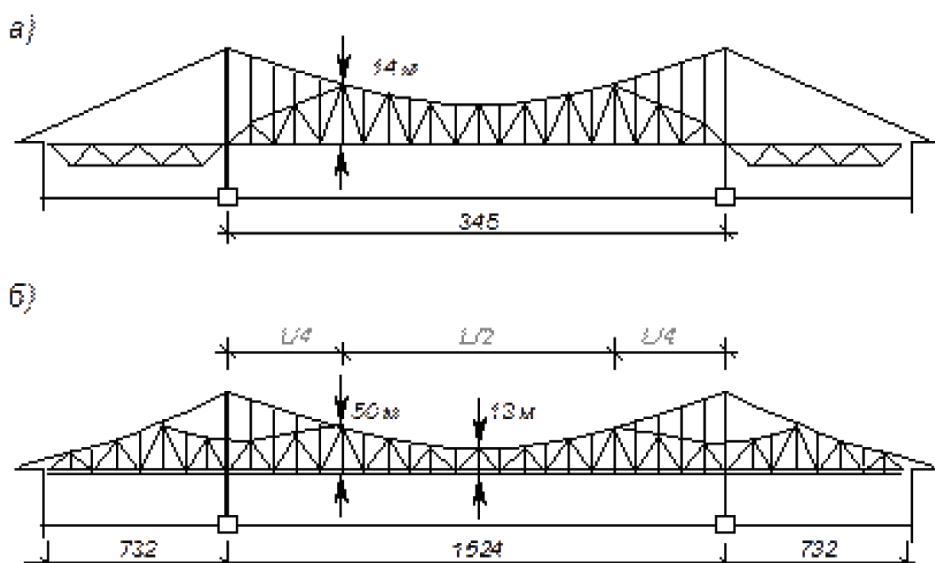
1. уменьшение прогибов в четверти пролета (в среднем в 3 раза).
2. прикрепление препятствует несимметричным формам колебаний системы;

Минусы данного метода:

1. распор в системе не постоянен;
2. возникает необходимость работы балки (при несимметричном нагружении) на продольное усилие $H1 - H2$;
3. необходимо устраивать специальные закрепления балки на одной из опор;
4. повышенная чувствительность системы к изменению температуры [5];
3. Объединение цепи с балкой в единое целое на части длины пролета;

При этом в конструкции появляется ферма, имеющая наибольшую высоту там, где возникают максимальные моменты и прогибы. Растяжение всех элементов фермы обеспечивается постоянной нагрузкой.

Схемы мостов с объединением цепи с балкой в единое целое:



Балки жесткости висячего моста

Балки и фермы жесткости висячих мостов представляют собой пространственные трубчатые или коробчатые конструкции с замкнутым поперечным сечением. Конструкции такого типа обладают высокой крутильной жесткостью, что благоприятно сказывается на аэродинамических качествах пролетных строений и представляет ряд преимуществ при монтаже.

Фермы жесткости снабжают развитыми системами продольных и поперечных связей, причем продольные связи располагают в уровнях верхнего и нижнего поясов. Функции верхних продольных связей в некоторых случаях может выполнять сплошная плита проезжей части. [6]

При применении балки жесткости, удается снизить величину S-образного прогиба

Особенностью расчета балок жесткости висячих мостов является следующее:

- опорные реакции балок могут быть как положительными, так и отрицательными;
- по всей длине балки действуют положительные и отрицательные изгибающие моменты;
- поперечные (перерезывающие) силы в балке имеют относительно небольшую величину.

Изгибающий момент в сечениях балки жесткости определяется выражением:

$$M_x = M_{б.ж} - H \times y_i.$$

Максимальный изгибающий момент в балке жесткости:

$$M_{б.ж.} = 0,0156 \cdot q \cdot L^2.$$

Основным назначением балки жесткости вантовых мостов является:

- равномерное распределение нагрузки между соседними вантами;
- обеспечение необходимой длины панели проезжей части (длина панели проезжей части, 2...4 м, не зависит от длины панели вантовой фермы – 5...80 м);
- создание в вантах запаса по растяжению (дополнительных растягивающих усилий) за счет своего сопротивления изгибу;
- обеспечение возможности регулирования усилий в вантах путем их дополнительного натяжения (так называемое искусственное регулирование усилий);

– возможность превращения системы в безраспорную, при прикреплении всех вант к балке (при этом горизонтальные составляющие усилий в вантах уравниваются внутри системы через балку жесткости, таким образом, отпадает необходимость в сооружении дорогостоящих анкерных опор).

Основная работа балки жесткости в вантовых мостах заключается в работе на изгиб в пределах длины панели. [7]

Максимальный изгибающий момент в балке при ее загрузке:

$$M_{б.ж.} = a \cdot (p + q) L^2.$$

В общем случае:

$$M_{б.ж.} = (p + q) \cdot \frac{d^2}{8},$$

где a – эмпирический коэффициент, принимаемый равным 0,007 при двух и 0,006 при трех-четырех вантах, поддерживающих балку в основном пролете со стороны каждого пилона.

Максимальная продольная сила в балке:

$$N_{б.ж} = \sum N_{b,i} \cdot \cos \alpha_i.$$

В последние десятилетия в области строительства висячих мостов в мировом мостостроении достигнуты большие успехи, однако, в России висячие мосты строят неоправданно мало. Уже существующие возводились либо из архитектурных соображений, либо под пешеходное движение.

Список литературы

1. Цаплин С.А. Висячие мосты. М.: ДОРИЗДАТ, 1949. 288 с.
2. Щусев П.В. Мосты и их архитектура. М.: изд-во по строительству и архитектуре, 1953. 360 с.
3. Бахтин С.А., Овчинников И.Г., Инамов Р.Р. Висячие и вантовые мосты. Проектирование, расчет, особенности конструирования: Учеб. пособие. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1999. 124 с.
4. Тимошенко С.П. Статические и динамические проблемы теории упругости. Киев: Наукова думка, 1975. 564 с.
5. Кирсанов Н.М. Висячие и вантовые конструкции. М.: Стройиздат, 1981. 158 с.
6. Сильницкий Ю.М. Висячие мосты. Общие сведения о висячих цепных мостах с балками жесткости Л.: ЛИИЖТ, 1969. 85 с.
7. Смирнов В. А. Висячие мосты больших пролетов. М.: Высшая школа, 1970. 408 с.