

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
им. В. В. Куйбышева

АВТОРЕФЕРАТ

по диссертации аспиранта Н. М. Кирсанова

на тему:

АНАЛИЗ РАБОТЫ ВИСЯЧИХ МОСТОВ МАЛЫХ И СРЕДНИХ
ПРОЛЕТОВ

Москва — 1950

ВВЕДЕНИЕ

Значительное развитие сети автомобильных дорог в Советском Союзе открывает широкие перспективы строительству висячих мостов малых и средних пролетов. Висячие мосты имеют ряд преимуществ перед мостами других систем: экономичность, легкость перевозки элементов, удобство монтажа с помощью навесной сборки, высокие эстетические качества и др. Основной недостаток висячих мостов — их малопролетность и потому необходимость иметь большие пролеты при широких пересечениях — за последнее время изжит советскими учеными и инженерами, предложившими использовать искусственное натяжение в кабеле, открывающие большие возможности в строительстве многопролетных висячих мостов. Благодаря данному мероприятию висячие системы могут быть применены для осуществления протяженных мостовых переходов через широкие равнинные реки Советского Союза, причем такие переходы особенно удобны вдали от железных дорог, когда при дальних перевозках большое значение имеет малый вес и габариты элементов висячего моста.

Советская инженерная мысль плодотворно решает также основную проблему висячих мостов малых и средних пролетов, увеличение их вертикальной жесткости. Так, например, у нас впервые предложены и применены новые висячие системы повышенной жесткости: двухкабельная система, схема с наклонными подвесками, различные вантовые фермы и др.

В практике строительства находит применение и обычная висячая система с жесткой балкой.

Данное исследование посвящено расчету, теоретическому и экспериментальному анализу статической работы висячих мостов малых и средних пролетов обычной системы (цепь с балкой) и систем повышенной жесткости: двухкабельной и схем с кабелем и вантами.

Работа состоит из пяти глав:

В I-й и II-й главах рассматривается расчет с учетом прогибов и анализ работы мостов обычной системы.

В III-й главе дан упрощенный расчет двухкабельной фермы со средней подвеской и рассмотрено влияние изменения геометрических характеристик системы на величину усилий в ее элементах.

IV-я глава посвящена расчету и анализу висячей системы с кабелем и нисходящими вантами (с вантами, соединяющими вершину пилона с балкой жесткости).

В V-й главе приведены результаты экспериментального исследования перечисленных систем, а также некоторых других систем с вантами и кабелем.

1. Теория расчета висячих мостов (обычной системы с балкой жесткости)

Особенностью висячих мостов, как распорных систем, является то, что удлинение и перемещение кабеля при действии временной нагрузки вызывают заметное перераспределение усилий в элементах моста.

Поэтому расчетное уравнение висячих мостов должно быть выведено с учетом прогибов кабеля и балки жесткости.

В основу вывода расчетного уравнения положим следующие предпосылки:

1. Материал балки и кабеля деформируется упруго.
2. Вертикальные прогибы пролетного стропения малы по сравнению с генеральными размерами сооружения.
3. Горизонтальные перемещения кабеля являются величинами второго порядка малости относительно вертикальных прогибов моста.
4. Балки жесткости мостов малых и средних пролетов имеют постоянное сечение по длине пролета.

Принятые предпосылки приводят к расчетному уравнению висячих мостов в виде линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами.

Известно два основных метода решения дифференциального уравнения висячих мостов:

- 1) Метод частных интегралов (Мелана).
 - 2) Решение с помощью тригонометрических рядов.
- Оба метода имеют следующие недостатки:

1) Большая трудоемкость: для нахождения решения по первому способу необходимо решать систему уравнений с несколькими неизвестными, по второму способу требуется вычислять ряд до четвертого или пятого члена.

2) Данные методы применимы к частным задачам и не дают решения в общем виде, поэтому они непригодны для общего исследования.

Метод начальных параметров впервые применен к инженерным задачам академиком А. Н. Крыловым.

Над популяризацией данного метода работал ряд советских исследователей. На широкий класс задач строительной механики распространил метод начальных параметров проф. В. З. Власов.

При применении метода начальных параметров произвольные постоянные решения заменяются начальными параметрами, то есть прогибом, углом наклона касательной к изогнутой оси, изгибающим моментом и перерезывающей силой на левом конце балки.

Начальные параметры нетрудно найти из условий закрепления концов балки и загрузки временной нагрузкой пролета. Уравне-

ние изогнутой оси балки моста, выведенное с помощью метода начальных параметров, состоит из многочлена, в слагаемые которого входят гиперболические синусы и косинусы, хорошо табулируемые, что очень облегчает использование этого метода.

Последовательно дифференцируя уравнение изогнутой оси, получим уравнения углов поворота касательной к изогнутой оси, изгибающих моментов балки жесткости и перерезывающей силы.

Для облегчения вычислений по расчетным формулам нами составлены таблицы функций (объединяющих многочлен) и их производных в зависимости от различных значений коэффициента деформативности, абсциссы сечения и положения внешней нагрузки.

Зная величину коэффициента деформативности, вычисляемого по методу последовательного приближения, нетрудно с помощью формул и таблиц определить прогибы, изгибающие моменты и другие статические факторы в любой точке пролета.

Составленные нами вспомогательные таблицы функций применимы не только к расчету висячих мостов, но и к расчету задач степенного кручения, к расчету растянутых стержней, нагруженных поперечной нагрузкой, к расчету арочных мостов с учетом прогибов и другим задачам, в которых расчетное уравнение сходно с основным уравнением висячих мостов.

Кроме прямого расчета висячих мостов с учетом прогибов (путем решения основного уравнения), существует следующий упрощенный способ расчета.

Прогибы и изгибающие моменты балки висячего моста вычисляются без учета прогибов — по так называемому методу отвердения. Затем в зависимости от величины коэффициента деформативности, найденного без учета распора от временной нагрузки, по известным графикам определяются поправки, учитывающие влияние деформаций на уменьшение прогибов и моментов.

Кандидатом технических наук Кобинковым (ВИА 1949 г.) показано, что существующие графики поправочных коэффициентов неприменимы к расчету висячих мостов малых и средних пролетов, так как в графиках не учтено соотношение временной и постоянной нагрузок. Нам, на основе сопоставления решения уравнения висячих мостов при различных коэффициентах деформативности с решением уравнения по методу отвердения, составлены новые графики поправочных коэффициентов для мостов малых и средних пролетов.

В отличие от существующих графиков, новые графики учитывают соотношение временной и постоянной нагрузок, так как коэффициент деформативности зависит от отношения распоров при временной и постоянной нагрузке. Кроме этого, с помощью составленных графиков можно рассчитывать висячие мосты на действие одностороннего груза, что для мостов малых и средних пролетов является иногда необходимым.

II. Исследование статической жесткости и прочности висячих мостов обычной системы

Формулы, выведенные в предыдущей главе с помощью метода начальных параметров, используем в данной главе для аналитических исследований висячих мостов обычной системы.

А. Исследование жесткости висячих мостов

Для определения жесткости висячего моста необходимо знать место и величину наибольшего прогиба.

Место наибольшего прогиба находится из условия горизонтальности касательной к огибающей прогибов при различных положениях нагрузки.

Чтобы проследить положение места наибольшего прогиба, а также величину наибольшего прогиба при различных соотношениях нагрузок, допускаемых прогибах и других факторах, коэффициенту деформативности и характеристике продольных деформаций были даны различные числовые значения в расчетных формулах.

По полученным результатам исследования сделаны следующие выводы:

1) Амплитуда прогибов в четверти пролета почти не зависит от продольных деформаций кабеля.

2) Место наибольшего прогиба легких мостов малых пролетов находится в середине пролета.

3) Наибольшей деформацией гибких висячих мостов средних пролетов является амплитуда прогибов в четверти пролета.

4) В случае, если положительные прогибы в середине пролета равны амплитуде прогибов в четверти пролета, наибольшую деформацию (амплитуду прогибов) следует искать между серединой и четвертью пролета. По величине найденная амплитуда прогибов незначительно становится от амплитуды прогибов в четверти пролета.

5) Наибольший отрицательный прогиб (поднятие незагруженного конца балки) находится, приблизительно, на расстоянии половины пролета от наибольшего положительного прогиба причем, чем больше продольные деформации кабеля, тем указанное расстояние больше.

Известно, что прогибы висячего моста определяются двумя основными факторами:

- 1) продольными удлинениями кабеля и стяжек;
- 2) изменением параболической формы равновесия кабеля при загрузке части пролета.

С преобладанием первого или второго вида деформаций какого-либо висячего моста можно судить по положению в пролете места наибольшего прогиба. Так мосты, у которых продольные деформации кабеля преобладают над деформациями изменения формы равновесия, имеют наибольшие прогибы в середине пролета, а мосты,

имеющие второй вид деформаций больше первого, имеют в качестве наибольшей деформации амплитуду в четверти пролета.

Следовательно, по положению наибольшего прогиба можно судить о том, какое мероприятие по увеличению жесткости более приемлемо для данного моста.

На основании приведенных выше результатов исследования положения наибольшего прогиба можно сделать вывод, что жесткость легких висячих мостов малых пролетов может быть увеличена с помощью увеличения модуля упругости кабеля, путем применения различных способов разгрузки его и применением других мер, направленных на уменьшение продольных деформаций кабеля.

Для увеличения жесткости гибких висячих мостов средних пролетов следует рекомендовать мероприятия, обеспечивающие неизменяемость формы равновесия кабеля при загрузении части пролета: применение двухкабельной фермы, системы с наклонными подвесками, схем с кабелем и вантами.

Б. Расчет висячего моста на прочность и жесткость

Основной частью расчета висячего моста на прочность является проверка напряжений в балке жесткости от изгибающих моментов.

Сравнивая величины изгибающих моментов балки в четверти и середине пролета, мы пришли к выводу, что для большинства мостов малых пролетов и всех мостов средних пролетов изгибающие моменты в четверти больше моментов в середине пролета балки.

По наибольшему изгибающему моменту, заданной высоте и допускаемым напряжениям может быть подобран момент инерции балки.

Сопоставляя расчеты балок висячих мостов по прочности и жесткости, находим, что для мостов с малыми допускаемыми прогибами (1:600) расчет на жесткость является решающим в сравнении с расчетом на прочность. Увеличением высоты балки можно добиться, что наибольшие прогибы и напряжения балки будут соответственно равны допускаемым прогибам и допускаемым напряжениям.

Такую высоту балки назовем наименьшей возможной высотой по условиям жесткости.

Эта высота балки для мостов с малыми допускаемыми прогибами несколько велика (1:20—1:30 пролета). Оптимальная высота балки жесткости по весу находится по тому же закону, что и для простой балки: площадь поперечного сечения поясов должна быть равна площади поперечного сечения стенки балки.

Во II-й главе выявлена также связь между соотношением нагрузок, допускаемым прогибом и коэффициентом деформативности. Наглядно показано, что чем больше допускаемые прогибы, тем больше коэффициент деформативности и что расчет висячих мостов малых пролетов с большими допускаемыми прогибами (1:200—1:300) должен приводиться с учетом прогибов.

III. Двухкабельная висячая ферма

Увеличение высоты балки жесткости не всегда удобно для обеспечения жесткости висячей системы, так как ведет к ухудшению качеств висячего моста: к увеличению громоздкости и утяжелению конструкций, к ухудшению изготовления и монтажа балки.

Поэтому при строительстве висячих мостов малых и средних пролетов вынуждены переходить к применению систем повышенной жесткости.

Одной из лучших систем повышенной жесткости является двухкабельная висячая система, которая впервые предложена и применена в Советском Союзе (С. А. Цаплиным 1932 г.). Висячая ферма такого моста состоит из двух кабелей, очерченных по параболам, вершины которых смещены в четверти пролета.

Загружение половины пролета двухкабельного моста не вызывает изменение формы равновесия кабеля, (как это происходит с однокабельной системой) — такое положение нагрузки соответствует равновесию одного из кабелей.

Прогибы двухкабельной системы являются, в основном, следствием продольных деформаций кабеля: изменение формы равновесия кабеля в двухкабельной ферме значительно меньше по величине, чем в однокабельной. Балка двухкабельного моста испытывает меньшие изгибающие моменты, а поэтому может быть легче и иметь меньшую высоту, чем балка однокабельного моста.

Существует два вида двухкабельной фермы: со средним шарниром на пересечении цепей (со средней подвеской) и без шарнира.

Для исследования мы выбрали первую схему, более жесткую, чем схема без средней подвески.

Расчет двухкабельной фермы со средней подвеской не сложен, но довольно трудоемок и требует определенной точности в вычислениях, не допускающей, например, вычислений с помощью логарифмической линейки. Это затрудняет возможность быстрого расчета при выборе вариантов.

Мы предлагаем новый приближенный способ расчета с помощью таблиц и графиков.

Нами доказано, что линии влияния основных неизвестных (распоров кабелей и усилия в средней подвеске) состоят из суммы гармоник, амплитуды которых зависят от геометрических характеристик фермы и жесткости балки.

При расчете табличных коэффициентов сделано предположение, что площади поперечного сечения верхнего и нижнего кабеля равны между собой, что близко к действительности для мостов малых и средних пролетов.

Расчет по данному способу занимает мало времени, может быть произведен с помощью логарифмической линейки и имеет большую точность, чем ранее известный приближенный способ, основанный на введении трех шарниров в балку жесткости.

Во второй части главы нами исследовано влияние изменения геометрических характеристик на распределение усилий в элементах двухкабельной системы со средней подвеской.

Мы пришли к следующим выводам:

1) Изменение стрелок ценой влияет на распределение усилий в ферме так же, как и в статически определимой системе с тремя шарнирами в балке.

2) С увеличением жесткости балки линии влияния усилий в кабеле и изгибающие моменты становятся однозначными, абсолютная величина изгибающих моментов растет, а распыры ценой уменьшаются.

3) Сопоставление линий влияния двухкабельной и однокабельной висячих систем приводит к выводу, что применение двухкабельной фермы для гибких висячих мостов является весьма эффективным. Изгибающие моменты в балке двухкабельной системы в 3—4 раза меньше моментов однокабельной, прогибы при частичном нагружении пролета — меньше на 50—60%.

IV. Висячие мосты с кабелем и вантами

Висячие мосты с кабелем и вантами отличаются от обычной висячей системы тем, что имеют дополнительные ванты, служащие для увеличения жесткости моста.

Таковы, например, схемы с нисходящими и восходящими вантами.

Висячие мосты с кабелем и вантами имеют повышенную жесткость и обладают достоинствами обычной системы: простотой конструкции и несложностью монтажа.

Данные схемы висячих ферм могут быть применены не только для вновь строящихся мостов, но и для последующего усиления легких пионерных мостов, реконструируемых для пропуска тяжелой нагрузки.

Из двух рассматриваемых схем первая — более применима для мостов малых и средних пролетов, так как при нагружении распределенной нагрузкой всего пролета (расчетная нагрузка мостов малых и средних пролетов) нисходящие ванты получают натяжение и способствуют уменьшению прогибов, тогда как при нагружении аналогичной нагрузкой моста с восходящими вантами последние полностью выключаются.

Ванты второй схемы применимы к мостам больших пролетов для обеспечения аэродинамической устойчивости кабеля, а также для мостов малых и средних пролетов, если в качестве расчетной нагрузки принят одиночный груз и имеются благоприятные условия для устройства дополнительных анкеров вант.

На основании исследования висячей системы с кабелем и нисходящими вантами мы пришли к выводу, что для приближенного рас-

чета данных систем могут быть сделаны следующие упрощающие предпосылки:

1) Расчет может быть проделан без учета прогибов, так как данная схема менее деформативна, чем обычная висячая ферма без вант.

2) Расчет фермы с нисходящими вантами может быть произведен, как расчет системы с постоянными связями, так как запас на растяжение нисходящих вант (отношение положительной части площади влияния к отрицательной) для мостов малых пролетов равен 1,50—2.

3) При расчете на жесткость систему с несколькими вантами можно свести к системе с одним равнодействующим вантом, так как при жесткой балке форма изгиба и величина прогибов в первом и втором случае почти одинаковы.

Нами показано на общем примере с одной парой нисходящих вант, что:

1) Площадь поперечного сечения вант незначительно сказывается на величине прогибов. Следует применять тонкие ванты, рассчитанные по прочности.

2) Наилучшее место прикрепления вант к балке с точки зрения жесткости находится в четверти пролета.

3) С увеличением жесткости балки линия влияния усиления вант становится однозначной.

4) При загрузке пролета распределенной нагрузкой нисходящие ванты участвуют в работе и разгружают основную кабель.

V. Экспериментальное исследование систем повышенной жесткости

В последней главе работы описано экспериментальное исследование различных систем повышенной жесткости и обычной висячей системы.

Исследование проведено с целью сопоставления в одинаковых условиях жесткости различных висячих систем. Дана расчетная проверка прогибов обычной висячей системы, проведенная по методу I-й главы.

Модель моста имела 10 метровый пролет со стрелой кабеля 1,25 м (1 : 8 пролета) и деревянной балкой жесткости.

В качестве временной нагрузки использовалась тележка узкой колеи с балластом (полный вес 900 кг, 450 кг и 175 кг). В процессе испытаний изменялась жесткость балки (три ступени), а также давалось три варианта постоянной нагрузки.

Таким образом, были исследованы типы висячих мостов на широком диапазоне жесткости и нагрузок.

Подробно были изучены следующие системы:

- 1) обычная висячая система (цепь с балкой);
- 2) схема с нисходящими вантами;
- 3) схема с восходящими вантами.

Менее подробно был поставлен эксперимент со следующими висячими фермами:

- 4) двухкабельная схема со средней подвеской;
- 5) радиально-висячая система;
- 6) три схемы с одиночными вантами, в том числе схема с горизонтальным вантом.

Из экспериментального исследования нами сделаны следующие выводы:

1) Полученные опытные прогибы обычной системы имеют хорошее совпадение с теоретическими которые рассчитаны по формулам, выведенным в I-й главе.

2) Результаты экспериментального исследования системы с нисходящими вантами подтверждают ранее полученные теоретические выводы IV-й главы.

Дополнительно найдено, что:

а) следует рекомендовать малое число вант (1—3), так как увеличение числа вант не ведет к увеличению жесткости системы;

б) если предварительное натяжение вант обеспечивает включение их в работу при проходе временной нагрузки, то дальнейшее натяжение вант не оказывает влияния на повышение жесткости моста;

в) с увеличением жесткости балки эффективность применения системы с нисходящими вантами не уменьшается.

3) Совоставление материалов испытаний систем с нисходящими и восходящими вантами приводит к выводам в пользу I-й схемы:

а) восходящие ванты выключаются при загрузении всего пролета поездом грузов;

б) число восходящих вант в схеме не должно быть меньше трех пар;

в) с увеличением жесткости балки эффективность схемы с восходящими вантами падает, следовательно, нецелесообразно применять данную схему к мостам малых и средних пролетов.

4) Схема с горизонтальным вантом практического значения не имеет, так как сложна в конструктивном оформлении, а эффект увеличения жесткости не больше, чем в схемах с нисходящими и восходящими вантами.

5) Двухкабельная и радиально-висячая схемы имеют повышенную жесткость в сравнении с обычной системой.

Выводы

1. Расчет висячих мостов с учетом прогибов по формулам, выведенным с помощью метода начальных параметров, весьма прост, не требует много времени и доступен рядовому проектировщику.

2. Поправочные коэффициенты к расчету по методу отвердения, вычисленные по формулам I-й главы, пригодны к расчету висячих мостов малых и средних пролетов, так как учитывают соотношение временной и постоянной нагрузок.

3. Простейший способ увеличения жесткости обычной висячей системы заключается в увеличении высоты балки. Но наименьшая возможная высота балки по условиям жесткости и при полном использовании материала балки по прочности для мостов малых и средних пролетов не всегда может быть удобной при возведении моста. Поэтому часто принимают меньшую относительную высоту балки, что приводит к утяжелению ее.

4. Обычные висячие мосты с легкой проезжей частью имеют наибольший прогиб в середине пролета при загрузении всего пролета вследствие преобладания продольных удлинений кабеля.

Простые висячие мосты с тяжелой проезжей частью имеют в качестве наибольшей деформации — амплитуду прогибов в четверти пролета — вследствие значительного изменения параболической формы равновесия кабеля при загрузении части пролета.

Поэтому для мостов малых и средних пролетов рационально применять системы повышенной жесткости.

5. Двухкабельная висячая система со средней подвесной является эффективной системой повышенной жесткости. Прогибы и изгибающие моменты двухкабельной фермы при действии местной нагрузки значительно меньше прогибов и моментов однокабельной системы. Наиболее полно проявляются качества двухкабельной фермы в применении ее к легким висячим мостам с большими допускаемыми прогибами (до 1 : 300).

6. Из висячих систем с вантами наиболее применимой к мостам малых и средних пролетов является схема с нисходящими вантами.

Ванты в данной схеме, воспринимая на себя часть усилий от временной нагрузки, способствуют уменьшению прогибов моста. Доказана целесообразность устройства в таких системах небольшого числа вант (одной — трех пар) и рекомендуется место крепления вант к балке на расстоянии 0,2—0,25 пролета от опоры.

7. Система с восходящими вантами уступает в жесткости системе с нисходящими вантами при загрузении пролета распределенной нагрузкой и менее применима для мостов малых пролетов с жесткой балкой. Схема с восходящими вантами требует большого числа вант и поэтому она более сложна конструктивно, чем схема с нисходящими вантами.

8. Система с горизонтальным вантом по характеру работы и по величине прогибов почти не отличается от схемы с восходящими вантами, хотя является конструктивно более сложной. По этой причине следует воздержаться рекомендовать схему с горизонтальным вантом для мостов малых и средних пролетов.

9. Радиально-висячая система в четверти и середине пролета имеет значительно меньшие прогибы, чем обычная висячая схема.

Конструктивно радиально-висячая система не сложна при малом числе вант, то есть в мостах малых пролетов, имеющих небольшое число панелей.

Ответственный редактор: канд. техн. наук Я. А. КАРЕЛИН

Л1-161401

Подписано к печати 14/XI-50 г.

Тираж 100

Объем 1 п. л.

Заказ 689

Тип. МИСИ им. В. В. Куйбышева