



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2011, ТОМ 17, НОМЕР 2, 63–84

УДК 624.21

(11)-0233-1

ПРОБЛЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ВАНТ

М. І. Казакевич

*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту,
вул. Ак. В. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010.*

E-mail: mkazak@rambler.ru

Отримана 15 березня 2011; прийнята 22 квітня 2011.

Анотація. Стаття присвячена одній зі складних проблем забезпечення надійності і довговічності сучасних вантових мостів великих прольотів не тільки в процесі тривалої експлуатації, але і на всіх етапах монтажу. Стаття містить короткі відомості про фізичні процеси виникнення і умови існування інтенсивних коливань вант в полі вітрових, сейсмічних і рухомих навантажень. Представлені енергетичні спектри вітрових і сейсмічних дій і описані їх специфічні особливості, що дозволяє виділити інтервали частот власних коливань гнучких конструкцій, в т. ч. вант, чутливих до цих двох найважливіших природних явищ. Розглянута математична модель коливань вант, яка лежить в основі обчислень частотних спектрів вант залежно від їх довжини, зусилля натягнення і номера форми коливань. На прикладі вантового моста через протоку Босфор Східний на о. Російський в м. Владивостоці прольотом 1 104 м приведений аналіз динамічних характеристик пролітної споруди на стадіях монтажу і при експлуатації, а також вант – в процесі експлуатації. При цьому встановлений надзвичайно щільний дискретний спектр в інтервалі інфранизьких значень частот в діапазоні 0,06–1,00 Гц. Показана чутливість вант до таких метеорологічних чинників, як утворення ожеледо-наморозових відкладень, зливи і мусонні дощі, і їх вплив на динамічну поведінку вант при вітрових діях. У статті наданий аналіз переваг і недоліків існуючих способів стабілізації вібрацій вант при вітрових діях, особливо в процесі монтажу. Надані рекомендації щодо ефективних способів стабілізації вант і їх конструктивних рішень.

Ключові слова: вантові мости, ванти, стабілізація, енергетичні спектри.

ПРОБЛЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ВАНТ

М. И. Казакевич

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта,
ул. Ак. В. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010.*

E-mail: mkazak@rambler.ru

Получена 15 марта 2011; принята 22 апреля 2011.

Аннотация. Статья посвящена одной из сложнейших проблем обеспечения надежности и долговечности современных вантовых мостов больших пролетов не только в процессе длительной эксплуатации, но и на всех этапах монтажа. Статья содержит краткие сведения о физических процессах возникновения и условиях существования интенсивных колебаний вант в поле ветровых, сейсмических и подвижных нагрузок. Представлены энергетические спектры ветровых и сейсмических воздействий и описаны их специфические особенности, что позволяет выделить интервалы частот собственных колебаний гибких конструкций, в т. ч. вант, чувствительных к этим двум важнейшим природным явлениям. Рассмотрена математическая модель колебаний вант, которая лежит в основе вычислений частотных спектров вант в зависимости от их длины, усилия натяжения и номера формы колебаний. На примере вантового моста через пролив Босфор Восточный на о. Русский в г. Владивостоке пролетом 1 104 м приведен анализ динамических характеристик пролетного строения на стадиях монтажа

и при эксплуатации, а также вант – в процессе эксплуатации. При этом установлен чрезвычайно плотный дискретный спектр в интервале инфранизких значений частот в диапазоне 0,06–1,00 Гц. Показана чувствительность вант к таким метеорологическим факторам, как образование гололедо-изморозевых отложений, ливни и муссонные дожди, и их влияние на динамическое поведение вант при ветровых воздействиях. В статье дан анализ преимуществ и недостатков существующих способов стабилизации вибраций вант при ветровых воздействиях, особенно в процессе монтажа. Даны рекомендации по эффективным способам стабилизации вант и их конструктивным решениям.

Ключевые слова: вантовые мосты, ванты, стабилизация, энергетические спектры.

PROBLEMS OF CABLE STABILIZATION

Kazakevitch Mykhaylo

*Dnepropetrovsk National University of Railway Transport,
2, V. Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010.*

E-mail: mkazak@rambler.ru

Received 15 March 2011; accepted 22 April 2011.

Abstract. The report is devoted to one of the most complex problems of reliability and durability control of the up-to-date cable-braced large-span bridges not only in operation but in assembling too. The report comprises the data in brief about the physical processes of occurrence and conditions of existence of intensive vibrations of cables under wind, seismic and moving loads. There are given the energy spectra of wind and seismic loads and their specific peculiarities are described and that allows determining the intervals of the natural-vibration frequencies of flexible structures, including cables sensitive to these two most important natural phenomena. There is considered a mathematical model of cable vibrations which is the base to calculate the cable frequency spectra depending on their length, drawing power and the number of the frequency form. By the example of the cable-brace bridge over the channel Bosphorus the Eastern on the island Russian in the city of Vladivostok of the span as long as 1 104 m there are analyzed the dynamic characteristics of the span structure at the stages of assembling and in the operation, the cables are analyzed in the process of operation. An extremely dense discrete spectrum within the intra-low frequencies in the range of 0,06–1,00 Hertz. There is shown the cable sensitivity to such meteorological factors as ice and hoarfrost loading, heavy showers and monsoon rains, and their influence on the dynamic behavior of the cables under wind loading. There are also analyzed advantages and disadvantages of the existing ways of the stabilization of cable vibrations under wind loading especially in the process of assembling. There are given the guidelines on the efficient ways of the cable stabilization and on their constructive decisions.

Keywords: cable-brace bridges, cables, stabilization, energy spectra.

1. Общие соображения

Инженерное сообщество в 50–80-е годы XX столетия пережило бум активной творческой деятельности на поприще развития теории и создания конструкций из пластин и оболочек самого разнообразного назначения. Но ни для кого не является откровением движущий мотив этого бума – самолеты, ракеты, корабли, подводные лодки, а также атомные реакторы и ядерные установки.

Значение этого события невозможно недооценить, поскольку параллельно с этим стре-

мительно развивались компьютерные технологии во всех направлениях: от создания современных разделов вычислительной математики до суперсовременных компьютеров и программного обеспечения.

Нечто подобное не по масштабам и значимости для современной цивилизации, но для технического прогресса и экономического развития наблюдается в современном мировом мостостроении.

Несомненно, этот бум означает не только характерную для современной стадии развития

мостостроения мосту, но и необходимость преодоления все большего количества препятствий значительной протяженности, при особых гидрологических условиях и прочих потребительских обстоятельствах.

Несмотря на логическое сходство эволюционного развития двух приведенных выше направлений научно-технического прогресса, отчетливо заметно различие, в котором отражено революционное развитие компьютерных технологий. Например, сейчас можно рассчитывать практически любую конструктивную форму сооружения на действие известных нагрузок и воздействий, и это обстоятельство является определяющим независимо от выбора типа моста: по виду, материалу, статической схеме размера.

Кажущаяся на первый взгляд простота, с которой можно выполнить расчеты сооружений на действие постоянных и временных нагрузок, легкомысленно переносится на расчеты этих же сооружений на действие метеорологических и сейсмических воздействий.

За пределами осмысления остаются физико-механические свойства этих видов воздействий кинематического характера, связанных с потоками кинетической энергии ветрового потока и сейсмических волн, с возникновением шестикомпонентных полей ветровых нагрузок и сейсмических сил и, как следствие, статических и динамических реакций сооружений в целом и отдельных элементов. Это особенно заметно при беспомощном положении авторов проектов мостов в выборе между висячей и вантовой расчетными схемами гибких мостов больших пролетов без учета общепринятых критериев рациональной области их применения в обеспечении надежности на всех этапах монтажа и в процессе длительной эксплуатации расчетной долговечности.

В этом же ряду находятся также трудноразрешаемые проблемы:

- статическая стабилизация конструкций (снижение параметров ветровой нагрузки);
- динамическая стабилизация конструкций (устранение или снижение амплитуд и ускорений колебаний элементов конструкций, вызванных сейсмическими и, особенно, ветровыми воздействиями).

Актуальность этих проблем не вызывает сомнений, но в их ряду стабилизация вант в вантовых мостах занимает особое место.

Действительно, различные длины вант, их диаметр, погонная масса и усилие натяжения на различных этапах монтажа и в процессе эксплуатации в нагруженном и незагруженном состояниях обеспечивают переменные значения частот в очень широком диапазоне низкочастотного спектра.

Поэтому фактически при любом значении скорости ветра любого направления какая-либо из вант окажется в возбужденном состоянии и будет колебаться на одной или нескольких низших частотах в поперечном направлении.

Данная работа посвящена описанию условий возникновения и режимов колебаний вант в ветровом потоке, энергетических аспектов взаимодействия вант с ветровым воздействием и современным направлениям стабилизации вант.

2. Физическая модель динамического поведения вант

Исходя из реальной работы вант и учитывая приведенные ниже основные источники возбуждения их колебаний, с достаточной степенью достоверности можно принять в качестве физической модели систему, представленную на рис. 1, где стрелками указаны возможные колебания пилона, ванты и пролетного строения моста по главным направлениям: в плоскости и из плоскости моста.

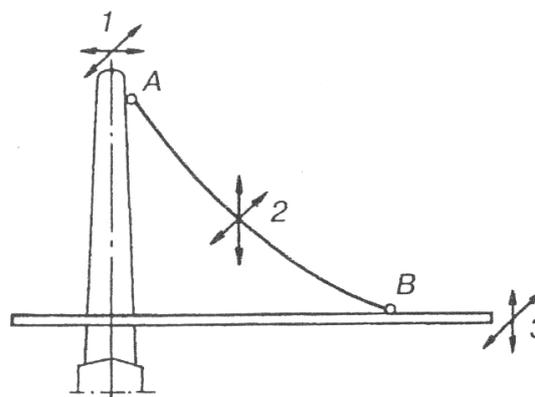


Рисунок 1. Физическая модель ванты: 1 – направления колебаний пилона; 2 – то же, ванты; 3 – то же, пролетное строение.

Наибольшую опасность по усталостной прочности вант представляют колебания, вызванные динамическим поведением пилона и пролетного строения при следующих соотношениях частот:

– параметрические резонансы

$$2f_{\text{в.}} = \begin{cases} f_{\text{пил.}} \\ f_{\text{пр.стр.}} \end{cases};$$

– обычные резонансы

$$f_{\text{в.}} = \begin{cases} f_{\text{пил.}} \\ f_{\text{пр.стр.}} \end{cases},$$

где $f_{\text{в.}}$, $f_{\text{пил.}}$, $f_{\text{пр.стр.}}$ – частоты колебаний вант, пилона и пролетного строения моста, соответственно.

Как показывает анализ [17], максимальные амплитуды колебаний вант можно приближенно оценить по формулам:

– при параметрических резонансах

$$a_{\text{в.}} \cong \frac{2}{\pi} \sqrt{2a_{\text{пил.}} L}$$

или

$$a_{\text{в.}} \cong \frac{2}{\pi} \sqrt{2a_{\text{пр.стр.}} L};$$

– при обычных резонансах

$$a_{\text{в.}} \cong a_{\text{пил.}} / \sqrt{\mu}$$

или

$$a_{\text{в.}} \cong a_{\text{пр.стр.}} / \sqrt{\mu},$$

где $\mu = m_{\text{в.}} / m_{\text{пил.}}$; $m_{\text{в.}}$ – масса ванты; $m_{\text{пил.}}$ – масса пилона; $a_{\text{пил.}}$, $a_{\text{пр.стр.}}$ – составляющая амплитуды колебаний пилона и пролетного строения, соответственно, вдоль луча АВ; L – длина ванты.

Причины, вызывающие вибрации вант, различны:

1. Аэроупругая неустойчивость вант в турбулентном потоке (вихревое возбуждение, бафтинг, галопирование в следе).
2. Динамические реакции пилонов на ветровые и сейсмические воздействия.
3. Динамические реакции пролетного строения в поле ветровых, сейсмических воздействий и подвижных нагрузок.

4. Отложения мокрого снега и гололедно-изморозевые отложения, в результате чего изменяется характер обтекания вант ветровым потоком и возникают их динамические реакции (галопирование, вихревое возбуждение, бафтинг).

5. Параметрическая связь между изгибно-крутильными колебаниями пилонов и пролетного строения и поперечными колебаниями вант (кратность собственных частот).

6. Взаимодействие вант с ветровым потоком при ливневых дождях.

3. Энергетические аспекты ветра и сейсмике

Наряду с подвижной нагрузкой важным источником вибраций вант, как было перечислено выше, являются ветровые и сейсмические воздействия. Оба вида воздействий представляют собой потоки кинетической энергии различного происхождения и обладают различными энергетическими свойствами.

Поскольку реальный ветровой поток характеризуется неупорядоченным изменением скорости во времени и в пространстве, его движение носит турбулентный характер. Следствием этого являются пульсации скорости ветрового потока в приземном слое атмосферы, обладающие энергетическим спектром. В свою очередь, максимальная доля кинетической энергии турбулентного ветрового потока приходится на продольный компонент скорости.

Существует известное многообразие математических моделей энергетических спектров продольного компонента атмосферного турбулентного ветрового потока. Их сопоставительный анализ приведен, например, в работе [12].

Таким образом, энергетический спектр продольных пульсаций турбулентного ветрового потока в приземном слое атмосферы отражает его динамические свойства и служит мерой оценки динамического поведения конструкций, в т. ч. вант в их доминирующем спектре частот собственных колебаний.

На рис. 2 представлен нормированный спектр Кармана (а), реализованный в Еврокоде (Eurocode), по крайней мере, в его последней редакции [13].

Выбор в пользу спектра Кармана связан с тем, что он практически не чувствителен к та-

ким параметрам, как высота над поверхностью земли и шероховатость пограничного (подстилающего) слоя земли (тип местности).

Достоверность спектра Кармана была установлена в ряде работ автора по натурным наблюдениям и мониторингу висячих и вантовых мостов больших пролетов [4–8], расположенных в различных географических районах. В частности, в работе [6] приведены результаты спектрального анализа синхронных и непрерывных записей механической структуры ветрового потока штатными анеморумбографами (мгновенные значения скорости и направления ветра) и параметров колебаний балки жесткости, пилонов и несущих канатов вибродатчиками С5С в инфранизком спектре частот в течение достаточно длительного времени. На рис. 3 представлены спектральные плотности распределения энергии колебаний конструкций висячего моста пролетом 720 м через р. Днепр в реальном ветровом потоке. Стрелками на этом рисунке указаны области частот, соответствующие ветровому воздействию (а) и реакции на него основных элементов конструкций висячего моста (б)–(д).

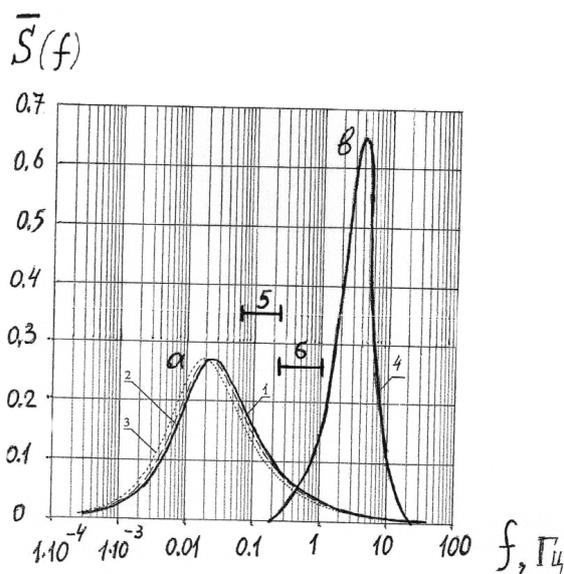


Рисунок 2. Спектры пульсаций скорости турбулентного ветрового потока (а) и ускорений сейсмических волн (б): 1 – тип местности А; 2 – тип местности В; 3 – тип местности С; 4 – низкочастотная область спектра сейсмического воздействия.

Результаты спектрального анализа естественного турбулентного ветрового потока и реакции висячего моста приведены также в табл. 1.

Анализ спектров как турбулентного ветрового потока, так и реакции конструкций висячего моста свидетельствует о наличии инфранизкочастотной составляющей спектров и воздействия и реакции $f = 0,02$ Гц, что совпадает с современными представлениями и существующими теориями ветрового потока в приземном слое атмосферы.

Сейсмические волны природного происхождения обладают огромной энергией, мерой которой можно с уверенностью считать аналогичный спектр ускорений при землетрясениях. Изменение спектральной плотности распределения энергии сейсмических волн природного происхождения в интервале низких и инфранизких значений частот, характерных для гибких элементов конструкций, в т. ч. вант, зависит от условий распространения сейсмических волн в грунтах с различной структурой и физико-механическими свойствами [1].

Для расчетов динамических откликов на сильные землетрясения достаточно точно можно представлять как случайный процесс с продолжительностью 30 сек. [1].

На рис. 2 приведен характерный спектр ускорений при сильных землетрясениях (в), наложенный на спектр Кармана (а).

Наложение двух спектров (см. рис. 2) позволяет выделить интервалы частот собственных колебаний гибких конструкций, чувствительных к двум видам природных явлений.

4. Математическая модель колебаний вант

Математической моделью колебаний вант является известное уравнение струны, описывающее малые поперечные колебания однородной натянутой струны. Исторически это первый пример уравнения математической физики – гиперболического уравнения вида

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + F(x, t),$$

где a – константа, отражающая свойства струны; x – координата вдоль струны; t – время; $y(x, t)$ – отклонение струны в точке x в момент

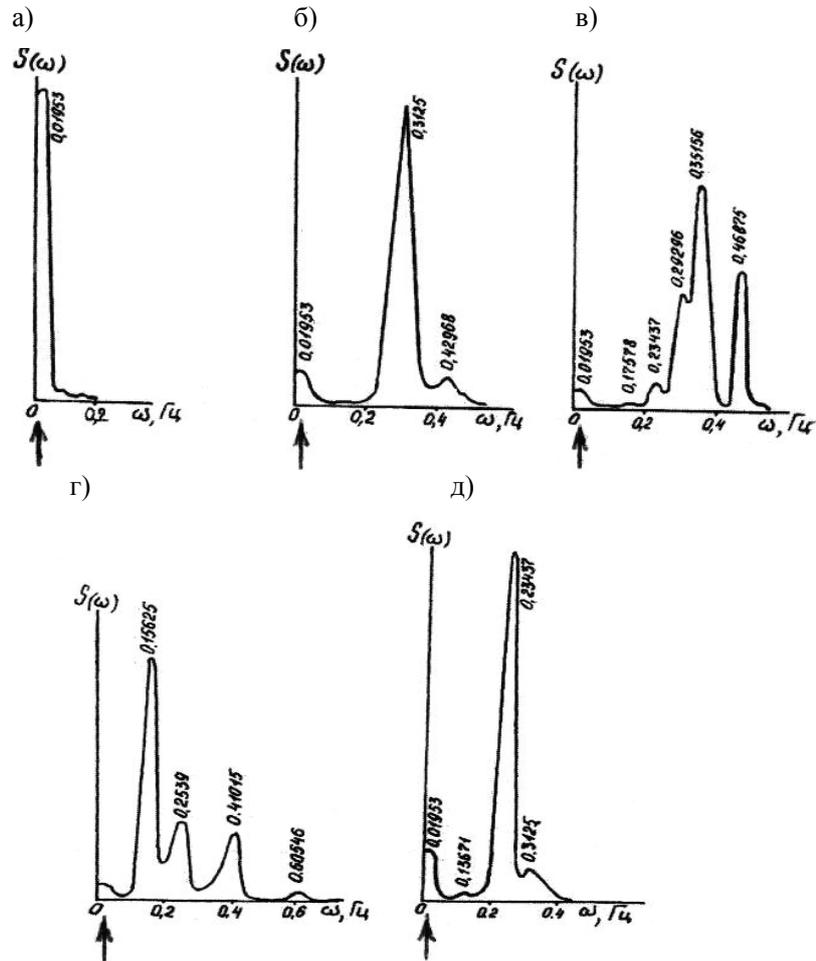


Рисунок 3. Спектральная плотность распределения энергии колебаний конструкций висячего моста аммиакпровода через р. Днепр пролетом 720 м в естественном турбулентном потоке в процессе мониторинга сооружения.

Таблица 1. Частоты пульсаций ветрового потока и колебаний конструкций висячего моста *

Частоты пульсаций ветра, Гц	Частоты колебаний конструкций моста, Гц						Несущие канаты
	Балка жесткости				Пилоны		
	Вертикальные		Горизонтальные		поперек моста	вдоль моста	
	$1/2l$	$1/4l$	$1/2l$	$1/4l$			
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,078	0,02	0,02
0,059	0,31	0,18	0,156	0,137	0,156	0,293	0,156
0,12	0,43	0,23	0,254	0,23	1,19	1,41	0,23
0,176		0,293	0,41	0,31	1,33		0,37
0,27		0,35	0,61				0,43
		0,47					

* Жирным шрифтом указаны значения частот доминирующих форм колебаний элементов конструкций вантового моста в реальном турбулентном ветровом потоке.

времени t от положения равновесия; $F(x,t)$ – функция внешних сил.

Принятые современные синонимические понятия аэроупругих колебаний:

- вихревое возбуждение;
- вызванные срывом вихрей колебания;
- индуцированные срывом вихрей автоколебания, ранее в строительной нормативной литературе назывались ветровым резонансом или «эоловыми колебаниями». В древнегреческой мифологии Эол – повелитель ветров, бог ветров. Отсюда выражения «эоловы колебания», «эолова арфа» – арфа Эола, издававшая нежные звуки при восходе солнца и легчайшем дуновении ветра.

Таким образом, колебания вант можно мифологически называть эоловыми колебаниями.

Однако для реальных инженерных сооружений, таких как вантовые мосты, особенно больших пролетов эти колебания могут оказаться сущим адом.

Опуская в данном докладе решение исходного дифференциального уравнения, приведем формулы частоты и периода малых поперечных колебаний струны

$$\omega_n = n\pi\sqrt{Ng/ML}, \text{ рад/с;}$$

или

$$f_n = \frac{n}{2}\sqrt{Ng/ML}, \text{ Гц}$$

и, соответственно,

$$T_n = \frac{1}{f_n} = \frac{2}{n}\sqrt{ML/Ng}, \text{ сек,}$$

где n – номер формы (тона) и, соответственно, частоты или периода колебаний; M – общая масса струны; N – усилие натяжения струны; l – длина струны; g – ускорение земного тяготения.

Приведенные формулы являются основным математическим аппаратом, позволяющим определить усилие натяжения i -ой ванты

$$N_i = M_i l_i (\omega_n)_i^2 / n^2 \pi^2 g = 4M_i l_i (f_n)_i^2 / n^2 g$$

при их монтаже и в дальнейшем, в период длительной эксплуатации вантовых сооружений.

5. Корреляция спектров

Анализ корреляции спектров ветровых и сейсмических воздействий с частотными спектрами гибких элементов конструкций в т. ч. вант, является очень важным фактором оценки и прогнозирования их динамического поведения в поле ветровых и сейсмических воздействий на основе сопоставления спектра собственных частот пространственных колебаний с соответствующими спектрами воздействий.

Большая масса вант обуславливает возникновение значительных инерционных сил вдоль и поперек ветрового потока, вдоль действия сейсмических волн.

Этот физический факт обуславливает динамические реакции вант на оба вида воздействий.

Вместе с тем, ванты защищены в большей мере от сейсмических воздействий, чем от ветровых в первую очередь по той причине, что последние воспринимаются вантами с очень низким уровнем диссипации, т. е. рассеяния энергии * непосредственно и носят длительный характер. А сейсмические воздействия, в отличие от ветровых, имеют кратковременный характер и воспринимаются вантами в значительно более ослабленном энергетически состоянии. Это обусловлено поглощением энергии сейсмических волн основанием, фундаментами и опорами мостов, несущими конструкциями пролетного строения и пилонов, асфальтобетонными покрытиями проезжей части мостов.

На примере вантового моста через пролив Босфор Восточный на остров Русский выполнен анализ динамических характеристик пролетного строения (на стадии монтажа и при эксплуатации) и вант – на стадии эксплуатации **.

На рис. 4 показан спектр собственных частот пространственных колебаний пролетного строения низших тонов на последней стадии монтажа ($n=8$), перед замыканием его в середине руслового пролета, и при эксплуатации ($n=11$).

* Логарифмический декремент колебаний вант составляет $\delta = 0,01 - 0,02$.

** Проверенная информация о тренде частот поперечных колебаний вант в процессе монтажа даже для низшего тона, которые значительно ниже, чем в эксплуатационном состоянии, отсутствуют.

Значительная погонная масса вант Freyssinet этого моста допускает предположение о малой вероятности вибраций их на высоких тонах тем, более, что с повышением номера тона возрастает частотно-зависимая диссипация энергии в вантах.

Это означает, что при возникновении колебаний высоких тонов ($n > 10$) они будут быстро затухать. Вместе с тем, даже при ограничении учета первых трех тонов колебаний вант как руслового, так и береговых пролетов при диапазоне их длин от 135,3 до 580,5 м и масс от 8 до 70 т в общем количестве 168 суммарный дискретный спектр собственных частот поперечных колебаний представляет собой чрезвычайно плотное множество. В реальных условиях работы вант с учетом флуктуаций усилий их натяжения в поле внешних нагрузок и воздействий он будет еще более плотным. К этому необходимо добавить влияние тренда частот вант в процессе монтажа.

Таким образом, практически при любом направлении и любом значении скорости ветра реального турбулентного потока всегда найдется случайная группа вант, которые могут вой-

ти в режим автоколебаний или нестационарных колебаний. Аналогичное заключение можно сделать об иницировании вибрации вант вследствие реакции пилонов и / или пролетного строения на ветровые и сейсмические воздействия и подвижную нагрузку.

О плотности дискретного спектра первых трех тонов поперечных колебаний вант руслового и береговых пролетов для стадии эксплуатации можно судить при анализе табл. 2 и рис. 5.

Воспроизведенные на рис. 5 дискретные спектры охватывают значения частот, приведенные в табл. 2, и фактически заполнены дискретным множеством из 126 значений частот только для первых трех тонов в интервале значений от $f_{21} = 0,245$ Гц до $f_1 = 3,102$ Гц для руслового пролета.

Приведенные выше спектры первых трех тонов поперечных колебаний пролетного строения и вант отображены на рис. 2 (см. интервалы частот 5 и 6). Таким образом, сопоставительный анализ спектров частот колебаний пролетного строения и вант со спектрами ветрового и сейсмического воздействий убедительно пока-

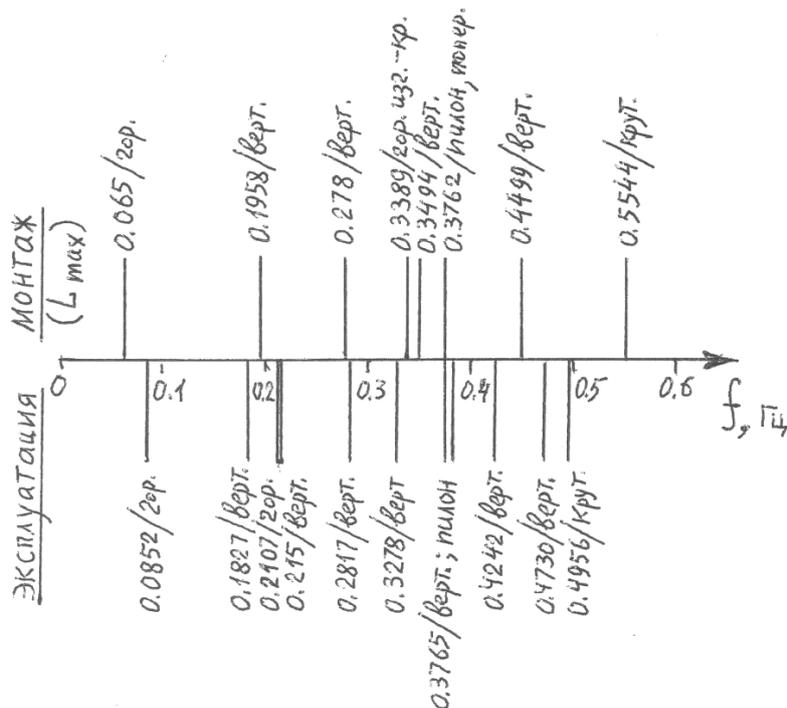


Рисунок 4. Спектр собственных частот пространственных колебаний пролетного строения (нижние тона) вантового моста.

зывает доминирующее влияние ветрового воздействия на динамическое поведение конструкций вантового моста.

6. Влияние наледи

Отдельного внимания заслуживает анализ реакций вант на метеорологические воздействия в виде мокрого снега, гололедице-изморозевых отложений на вантах, а также интенсивных ливневых осадков в период муссонов совместно с ветровым воздействием.

Вследствие изменения профиля поперечного сечения вант за счет перечисленных воздействий изменяется режим обтекания и создаются условия, благоприятствующие возникновению интенсивных аэроупругих автоколебаний галопирующего типа, что неоднократно наблюдалось в естественном поведении вант.

Реальность подобных изменений профиля канатов и вант иллюстрируют примеры, приведенные на рис. 6.

Выполненные в аэродинамической трубе ДГУ им. О. Гончара экспериментальные исследования четырех моделей наиболее часто встречающихся типов образования наледи на поверхности круглоцилиндрических элементов конструкций (рис. 8) позволили обнаружить диа-

пазоны направлений ветрового потока, при которых возможно возникновение аэроупругой неустойчивости галопирующего характера по критерию Ден Гартога (рис. 9). Более подробная информация об этих исследованиях и их результатах содержится в работах [2, 5, 16].

7. Стабилизация вибрации вант в поле внешних воздействий

Стабилизация вант – это комплекс расчетных, конструкционных, конструктивных и организационных мероприятий, обеспечивающих предотвращение возникновения стационарных и нестационарных колебаний любой из вант в процессе монтажа и при эксплуатации [2–5, 10, 14, 15, 17, 18].

Для вант как гибких элементов, имеющих небольшую в сравнении с пролетными строениями изгибную жесткость и работающих преимущественно на растяжение, характерны колебания не только по первой (безузловой, с одной полуволной) форме, но и по более высоким формам * со многими волнами, подобно «пляске» проводов ЛЭП.

Наиболее вероятной траекторией колебаний вант в любом сечении, как показывает анализ многочисленных наблюдений, является эллипс

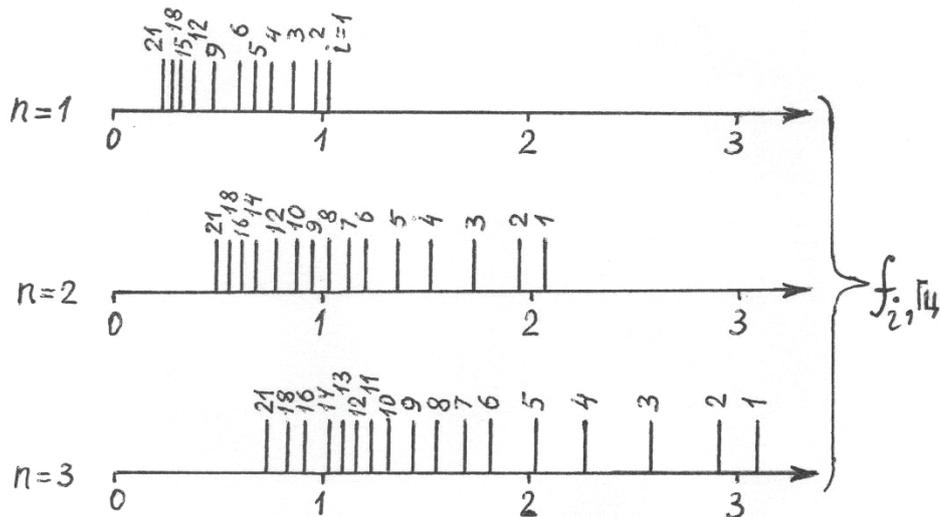


Рисунок 5. Дискретные спектры частот поперечных колебаний вант руслового пролета для первых трех тонов.

* Опыт эксплуатации вантового моста у г. Сургут через р. Обь показывает, что возможны колебания вант до 20-й формы.

с вытянутой в вертикальной плоскости осью. Эти же наблюдения показывают, что противофазные колебания двух смежных вант при аэроупругих колебаниях равновероятны синфазным. Их амплитуды достигают значений $\bar{a} = a/D = 2 \div 10$, или $a/L = 0,001 \div 0,010$, где D, L – диаметр и длина ванты.

Многолетний опыт в области теории, испытаний и наблюдений, в решении проблем стабилизации вант и оттяжек висячих и вантовых

мостов, а также участия в экспертизе ряда уникальных сооружений позволяет достаточно обоснованно ранжировать разнообразные способы стабилизации вант при взаимодействии элементов конструкций вантовых мостов с ветровым потоком. Критерием их эффективности является устранение причин, вызывающих вибрацию вант либо снижение амплитуд колебаний. Установлены сферы предпочтительного применения различных способов стабилизации вант.

Таблица 2. Частотный спектр вант

Частоты колебаний i -ой ванты, f_i , Гц	Пролеты					
	Русловой			Береговые		
	Тон колебаний, n			Тон колебаний, n		
	1	2	3	1	2	3
1	1,034	2,068	3,102	1,034	2,068	3,102
2	0,973	1,946	2,919	0,879	1,758	2,637
3	0,864	1,728	2,592	0,798	1,596	2,394
4	0,758	1,516	2,274	0,727	1,454	2,181
5	0,679	1,358	2,037	0,660	1,320	1,980
6	0,607	1,214	1,821	0,590	1,180	1,770
7	0,564	1,128	1,692	0,553	1,106	1,659
8	0,518	1,036	1,554	0,528	1,056	1,584
9	0,478	0,956	1,434	0,509	1,018	1,527
10	0,443	0,886	1,329	0,489	0,978	1,467
11	0,412	0,824	1,236	0,471	0,942	1,413
12	0,389	0,778	1,167	0,455	0,910	1,365
13	0,366	0,732	1,098	0,437	0,874	1,311
14	0,345	0,690	1,035	0,418	0,836	1,254
15	0,326	0,652	0,978	0,403	0,806	1,209
16	0,307	0,614	0,921	0,389	0,778	1,167
17	0,295	0,590	0,885	0,376	0,752	1,128
18	0,279	0,558	0,837	0,363	0,726	1,089
19	0,267	0,534	0,801	0,349	0,698	1,047
20	0,259	0,518	0,777	0,339	0,678	1,017
21	0,245	0,490	0,735	0,327	0,654	0,981

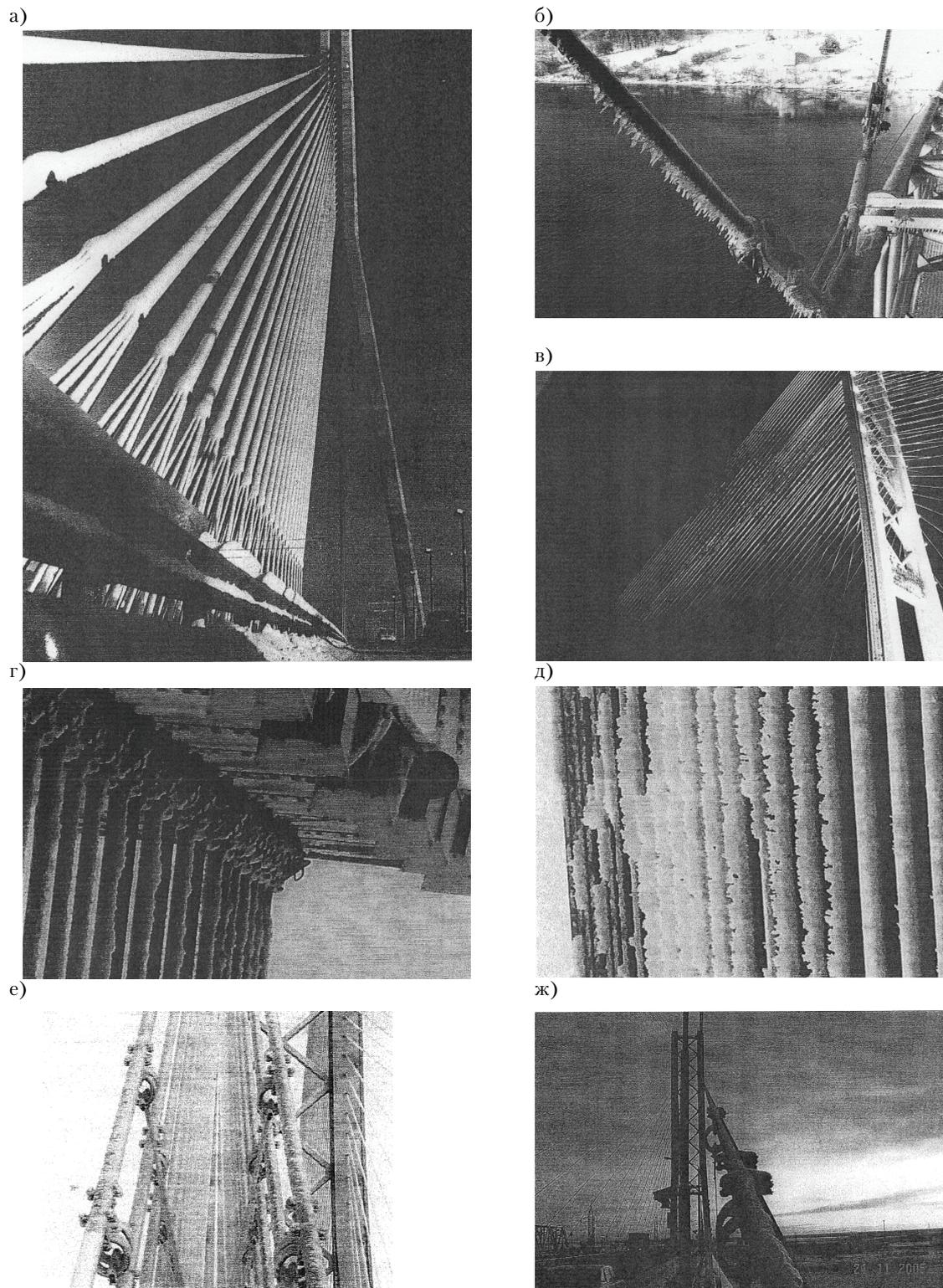


Рисунок 6. Отложения мокрого снега и гололедице-изморозевые отложения: а – на вантах вантового моста в г. Риге через р. Даугаву; б – на канатных элементах подвесок висячего моста аммиакопровода через р. Днепр у г. Днепропетровска; в – на вантах вантового моста через р. Обь у г. Сургута (общий вид); г – там же, вблизи узлов примыкания вант к пилону; д – там же, вблизи пролетного строения; е – там же, на вантах берегового пролета; ж – там же, на вантах руслового пролета.

7.1. Классификация способов стабилизации

Различные способы стабилизации вант можно условно подразделить на динамические, конструкционные, конструктивные и аэродинамические. Каждый из этих способов стабилизации имеет область рационального применения, однако доминирующими критериями выбора должны быть эффективность работы, эксплуатационные качества и ремонтпригодность [3, 5].

Динамические способы основаны на присоединении к каждой ванте дополнительной массы (от 1 до 10 % массы ванты) с помощью упругой или упруго-вязкой связи. В этом случае дополнительная масса играет роль динамического гасителя колебаний (ДГК).

Альтернативным способом стабилизации вант, получившим очень широкое распространение в практике мирового мостостроения, является применение демпферов в виде устройств поглощения (амортизации) энергии колебаний вант.

Как правило, эти устройства связывают каждую из вант с верхним поясом пролетного

строения напрямую и не содержат дополнительной массы. При этом рассеяние энергии возрастает, а частоты дискретного спектра вант несколько повышается, однако непредсказуемым образом. Поэтому для обеспечения их эффективной работы требуются постоянные изменения собственных частот всех вант и настройка каждого демпфера, если параметры демпферов не обладают оптимальной настройкой.

Применение демпферов без оптимальной настройки нецелесообразно, т. к. частоты колебаний каждой ванты флуктуируют в зависимости от тренда усилий в ванте в незагруженном состоянии с различным распределением подвижной нагрузки на мосту во времени и по длине, включая боковые пролеты, когда происходит разгрузка некоторых из вант.

Динамические гасители вант имеют синонимически эквивалентные названия: демпферы, амортизаторы, поглотители. Различия между ними обуславливаются комбинацией упругих связей источника поглощения энергии ДГК

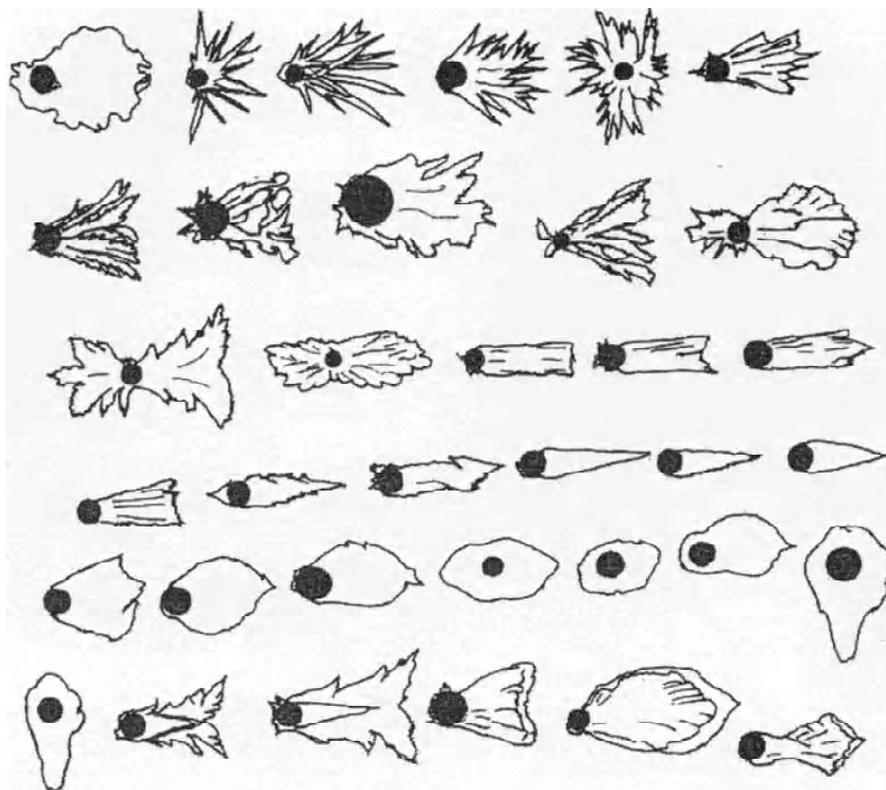


Рисунок 7. Характерные типы гололедо-изморозевых отложений на гибких элементах конструкций.

между объектом стабилизации и ДГК. Упругие связи при этом могут быть линейные, двух- и трехзвенные, с люфтом, с натягом, с люфтом и натягом, нелинейные. Источником по-

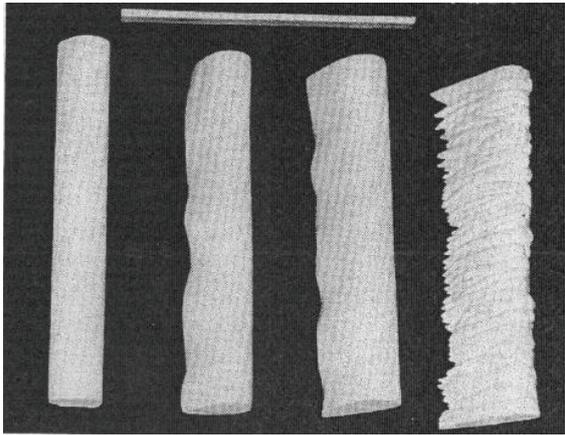


Рисунок 8. Общий вид четырех типов моделей элементов с гололедо-изморозевыми отложениями.

глощения энергии в конструкциях ДГК могут быть вязкое, сухое, комбинированное, нелинейное трение [11].

Конструкционное демпфирование (КД) происходит в результате энергетических потерь в вантах, содержащих элементы из материалов с высокими вибропоглощающими свойствами.

Конструктивные способы (КС) гашения колебаний предусматривают изменение расчетной схемы вант путем введения дополнительных связей (ДС), изменяющих спектр собственных частот колебаний ванты.

Аэродинамическое гашение (АГ) колебаний достигается изменением характера обтекания вант ветровым потоком [3–5]. Принципиальное отличие аэродинамических способов от остальных трех заключается в том, что он устраняет причину вихревого возбуждения, например, установкой интерцепторов, навивкой проволоки вокруг вант под некоторым углом к образующей или применением оболочки с винтообразными каналами.

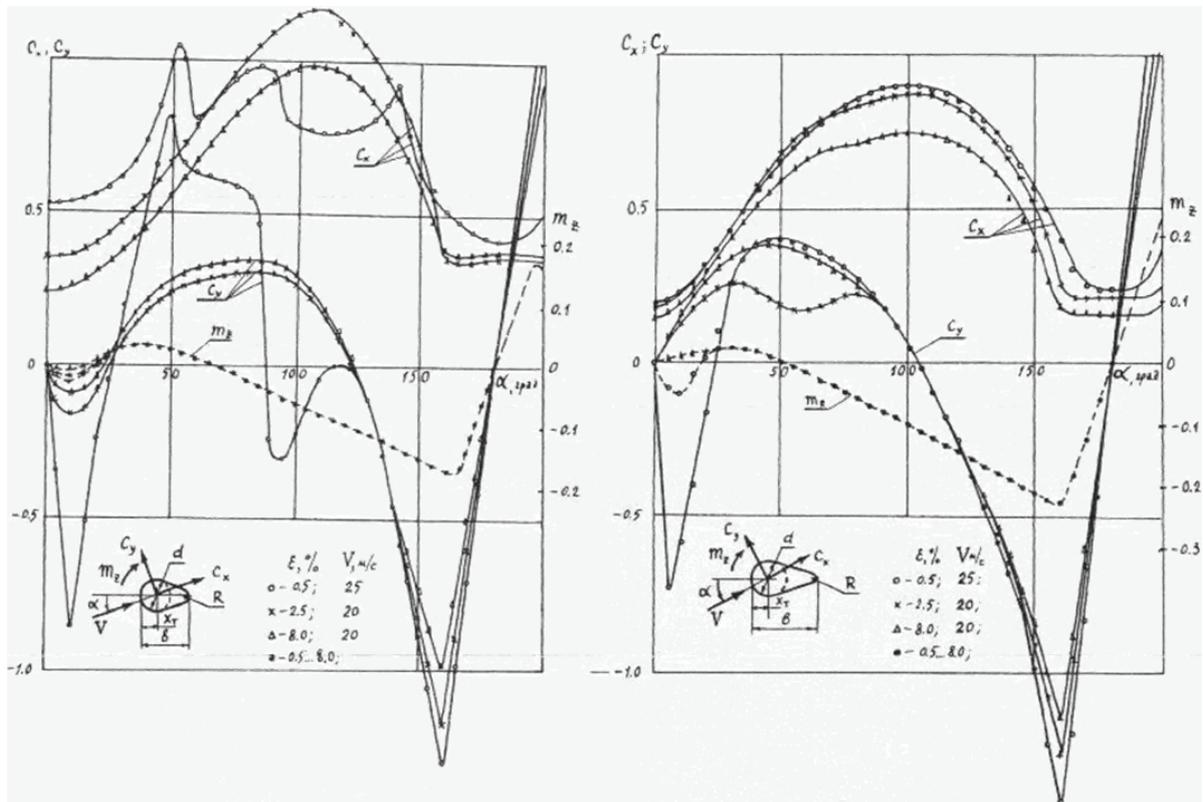


Рисунок 9. Аэродинамические характеристики двух типов моделей: а – модель № 2; б – модель № 3.

7.2. Динамическое гашение колебаний

Простейший динамический гаситель, который можно использовать для гашения колебаний вант типа Stockbridge damper, представляет собой короткий элемент стального троса с массами на концах (рис. 10). Трос выполняет роль и функцию упругого элемента и одновременно приводит к рассеиванию энергии колебаний вследствие трения между отдельными проволоками гибкого троса в процессе интенсивных его колебаний.

Эффективным способом гашения колебаний вант может быть применение дискретно расположенных дополнительных масс с источниками поглощения энергии (рис. 11).

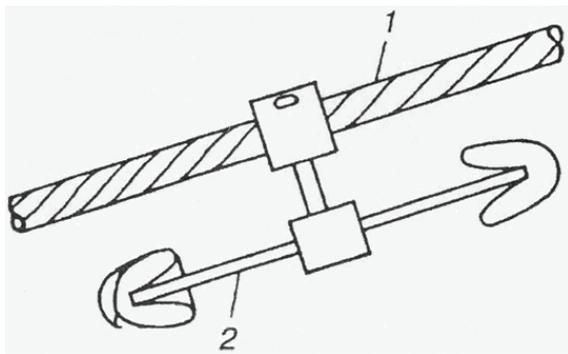


Рисунок 10. Конструкция простейшего динамического гасителя колебаний типа Stockbridge damper: 1 – ванта; 2 – гибкий стержень (трос) с грузами на концах.

Эффективность применения динамического способа гашения колебаний вант теоретически обоснована.

Разработаны рекомендации по оптимальному размещению гасителей по длине ванты [3–5, 10].

Вместе с тем динамическим способом свойственны некоторые недостатки, а именно:

- 1) применение ДГК некоторых типов в определенных случаях может привести к появлению дополнительных местных напряжений в местах крепления их к ванте;
- 2) эффективная работа ДГК обеспечивается только на определенной частоте или в узком спектре частот;
- 3) возможны соударения ДГК со смежной колеблющейся вантой.

Места размещения ДГК на каждой из вант в отдельности назначают, исходя из следующих соображений: чем дальше точка крепления гасителя от конца ванты, тем выше его эффективность и тем меньше жесткость связи гасителя с вантами. С этой точки зрения предпочтительно иметь расстояние между ними

$$l = (0,02 \div 0,10)L,$$

где L – длина ванты [10, 17, 18].

Соответствующие оптимальные значения параметров гасителей приведены в табл. 3.

В табл. 3 величина $f^* = f(1 + l/2L)$, где f – собственная частота колебаний ванты без гасителя. Параметры ДГК можно определить только по фактическим значениям параметров вант

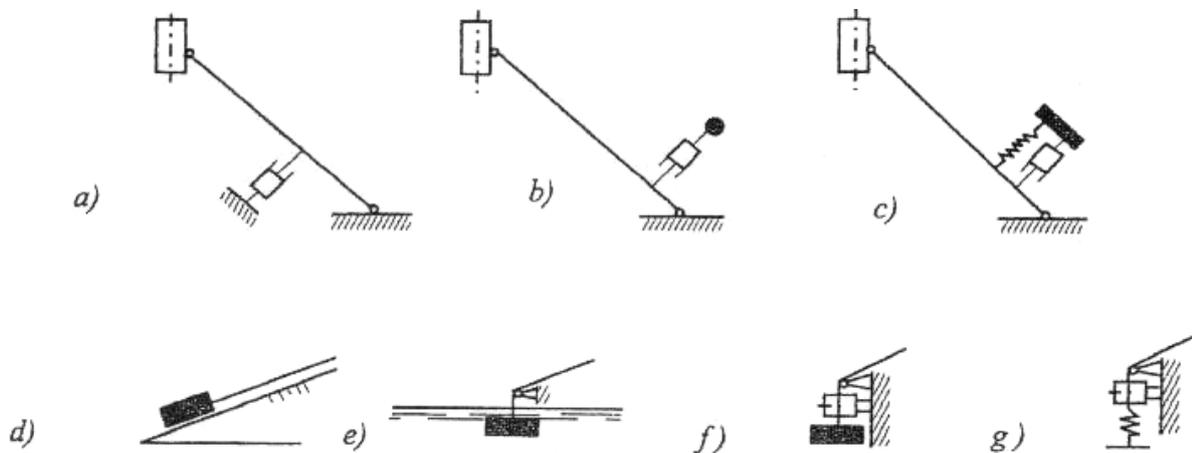


Рисунок 11. Схематическое изображение демпфирующих устройств вант.

(длина, диаметр, масса, погонная жесткость, диссипативные свойства). Независимо от способа стабилизации вант в поле действия возмущающих сил, вызванных ветровой или подвижной нагрузкой, необходимо предусмотреть возможность доступа обслуживающего персонала к местам установки сепараторов или гасителей колебаний в процессе эксплуатации.

7.3. Конструкционное демпфирование

К этому способу демпфирования колебаний вант относят их обетонирование и защиту всевозможными оболочками. Например, применяют цилиндрические покрытия, изготовленные методом экструзии из алюминия. На внутреннюю поверхность покрытия наклеивается демпфирующая прослойка из полиуретана, плотно взаимодействующая по всей поверхности с кабелями вант.

Конструкция алюминиевых покрытий такова, что кабели вант герметично защищены от атмосферных реагентов, а взаимодействие кабелей с демпфирующей полиуретановой прослойкой обеспечивает гашение колебаний.

Основное достоинство конструкционного демпфирования – сохранение первоначального архитектурного облика моста.

К его недостаткам следует отнести возможность электрохимической коррозии материала вант, вызываемой контактом его с другими материалами, а также усложнение технологии изготовления необходимостью их предварительного натяжения.

7.4. Конструктивные способы стабилизации вант

Гашение колебаний вант может быть осуществлено изменением расчетной схемы вантовой системы путем устройства дополнительных опорных точек или установки дополнительных оттяжек. Этой же цели можно достичь изменением соотношения частот собственных колебаний вант, пилона и балки жесткости.

Поскольку изменение частотных характеристик пилона и балки влечет за собой, как правило, значительный перерасход материальных ресурсов, а на стадии эксплуатации – практически невозможно, остается только применять конструктивные мероприятия для изменения динамического поведения вант.

При этом следует учитывать ограниченные возможности изменений сил натяжения вант. К тому же, ванты, имея различную длину, массу, жесткость, усилие натяжения, характеризуются разными частотами собственных колебаний. Все это затрудняет использование динамических гасителей колебаний для каждой ванты с точки зрения как настройки и расположения (компоновки) ДГК, так и архитектуры всего сооружения.

Наиболее целесообразно обеспечивать стабилизацию вант путем рассеяния энергии колебаний в вантовой системе: энергия колебаний вант при резонансе или параметрической неустойчивости перераспределяется в энергию колебаний смежных вант и далее, по всей вантовой системе. Этого можно достичь с помощью

Таблица 3. Оптимальные значения параметров гасителей

Отношение l/L	Собственная частота колебаний вант (с гасителем) f^* , Гц	Коэффициент усиления колебаний k	Логарифмический декремент колебаний δ	Жесткость упругой связи гасителя w , кН/м
0,02	1,01	50	0,063	22,5
0,05	1,025	20	0,157	5
0,10	1,05	10	0,314	2,5

установки элементов, объединяющих ванты. Такие элементы – сепараторы, распорки, иные способы – должны обладать высокой эффективностью, хорошей обтекаемостью, ремонтно-пригодностью всех узлов и элементов, низким уровнем эксплуатационных затрат.

Сопоставительный анализ приведенных выше способов стабилизации вант приведен в табл. 4. Анализ табл. 4 подтверждает, что одним из наиболее эффективных способов стабилизации вант в поле ветровых, сейсмических и подвижных нагрузок следует считать применение дополнительных связей, соединяющих между собой смежные ванты, с образованием единой вантовой системы.

Удачным примером такого способа стабилизации было применение жестких связей между канатами оттяжек висячего моста для газопроводного перехода через р. Амударья в Афганистане пролетом 660 м, а затем и для аммиакопровода через р. Днепр вблизи г. Днепропетровска пролетом 720 м. Для недопущения групповых колебаний шестнадцати канатов диаметром 98 мм эти связи соединили разные группы вант (рис. 12).

Наиболее эффективно этот способ стабилизации вант был использован на вантовых мостах через р. Даугава в г. Риге пролетом 312 м в 1980 г. для устранения интенсивных вибраций, особенно длинных вант (рис. 13), а также через р. Днепр в г. Киеве пролетом 270 м в 1992 г. уже на стадии монтажа при интенсивных колебаниях вант, сопровождавшихся их соударениями (рис. 14).

Принцип действия, положенный в основу стабилизации вант этих двух мостов, заключается в перераспределении энергии колебаний возмущенной ванты на смежные ванты и, в конечном итоге, на все ванты, в результате чего они быстро затухают.

Для повышения эффективности этого способа стабилизации узлы крепления дополнительных связей к вантам снабжены специальными прокладками из материалов с повышенными вибропоглощающими свойствами.

С физической точки зрения установка дополнительных связей преобразует очень плотный дискретный спектр собственных частот всех вант в чрезвычайно низком и ограничен-

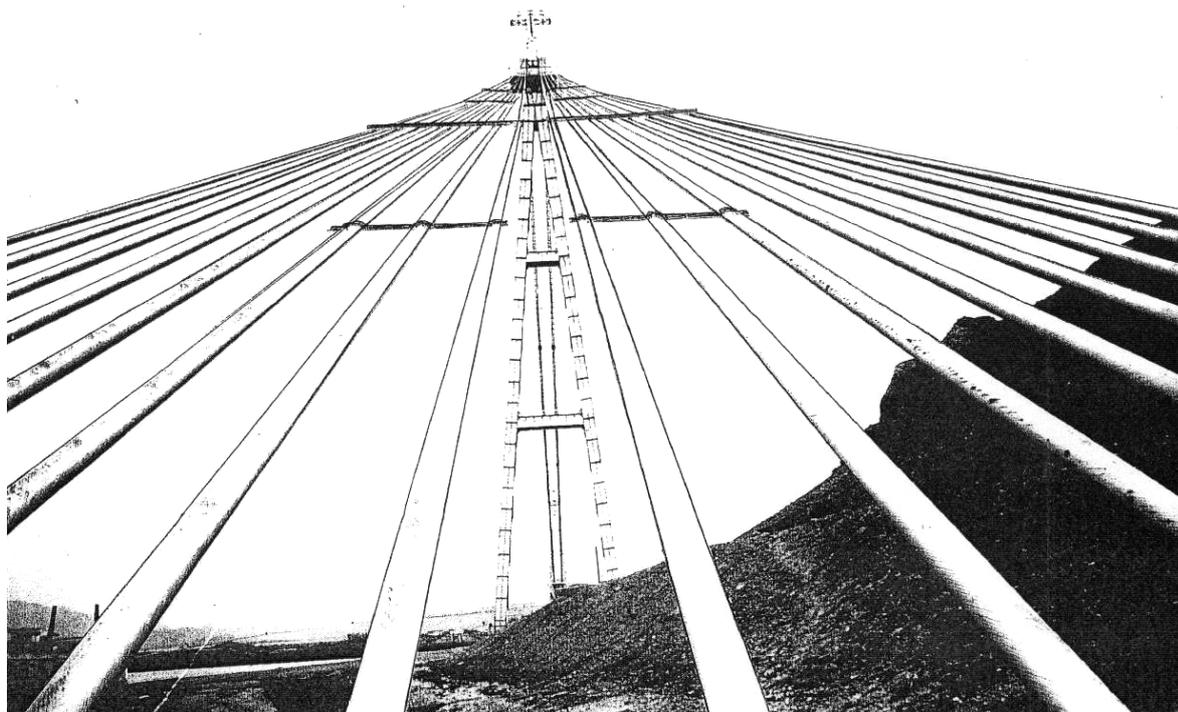


Рисунок 12. Установка жестких связей (распорок) между различными группами канатов оттяжек висячего моста через р. Амударья в Афганистане.

ном диапазоне в фактически непрерывный, «размазанный» спектр. При таком качественном изменении динамических свойств системы вант в целом невозможны их колебания как в изолированном состоянии, так и в составе вантовой системы. Длительная эксплуатация

обоих мостов доказала высокую эффективность принятой системы стабилизации вант.

При проектировании вантового двухъярусного моста через р. Волгу в г. Ульяновске пролетами 407+407 м для стабилизации вант, как в процессе монтажа, так и при эксплуатации

Таблица 4. Сравнение способов стабилизации вант

Типы стабилизации вант	Преимущества	Недостатки
Динамический	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ясная физическая модель. 2. Правдоподобное математическое описание процесса снижения амплитуд колебаний. 3. Ремонтпригодность. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимость регулярной настройки огромного количества ДГК. 2. Низкий ресурс элементов ДГК. 3. Необходимость сезонной замены смазки каждого ДГК. 4. Возникновение местных напряжений в местах их крепления к вантам вследствие интенсивной динамической работы ДГК. 5. Эффективность работы ДГК на одной конкретной частоте, причем, в чрезвычайно узком диапазоне ее изменений. 6. Необходимость систематического доступа к местам крепления ДГК.
Конструкционное демпфирование	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сохранение первоначального архитектурного облика мостового перехода. 2. Беспрепятственный доступ к вантам для осмотра с помощью специальных тележек. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Усложнение технологии изготовления и увеличение стоимости вант. 2. Невозможность ремонта или замены элементов из вибропоглощающих материалов по мере их износа.
Конструктивные способы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ясная физическая модель. 2. Высокая степень ремонтпригодности. 3. Значительный ресурс элементов, входящих в состав дополнительных связей (ДС). 4. Независимость эффективности функционирования ДС от тренда собственных частот колебаний вант. 5. Равнозначная эффективность применения ДС как в процессе монтажа, так и при эксплуатации. 6. Низкие эксплуатационные затраты на обеспечение эффективной работоспособности и в процессе эксплуатации. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Дополнительные затраты материалов на изготовление элементов ДС. 2. Проблемы доступа к вантам для технического осмотра при эксплуатации без специальных средств.

была предложена вантовая система, изображенная на рис. 15*.

Для поиска оптимальной геометрии единой вантовой системы были рассмотрены несколько вариантов, предусматривающих возможность функционирования такой системы одновременно при последовательном монтаже вант и в процессе эксплуатации моста. Отличительной особенностью этой системы вант было достаточно большое расстояние между нижними узлами крепления смежных вант к балке жесткости пролетного строения.

Вариант 1. Связи шарнирно крепятся последовательно ко всем вантам, образуя два луча, объединяющих все ванты в третях и двух третях их длин. Этот вариант, как показывает динамический анализ, обладает одним существенным недостатком: возможны групповые колебания вант значительной интенсивности и, как следствие, раскачивание пилона и/или пролетного строения моста.

Вариант 2. Связи образуют аналогичные пять лучей (один из них факультативный), объединяющие все ванты в четвертях, третях

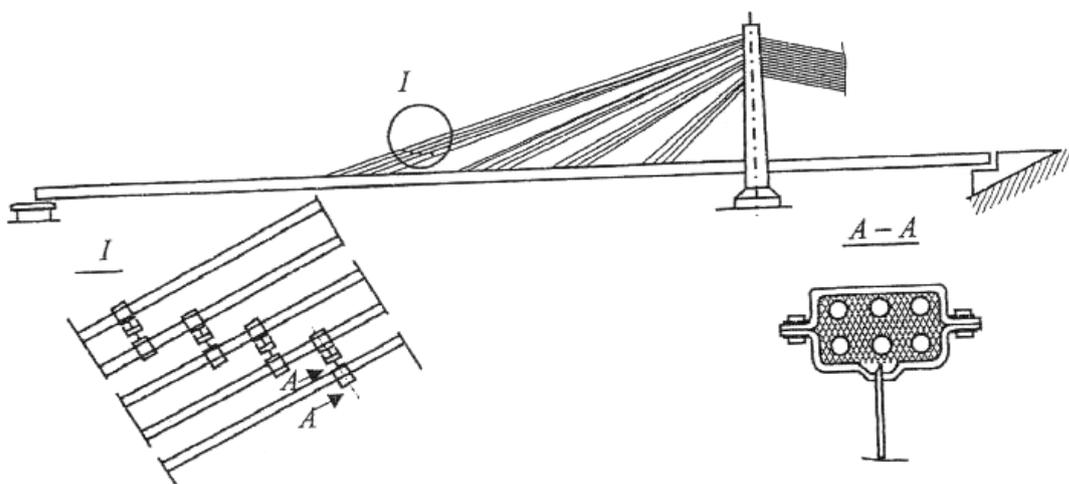


Рисунок 13. Система стабилизации вант моста через р. Даугава в г. Риге.

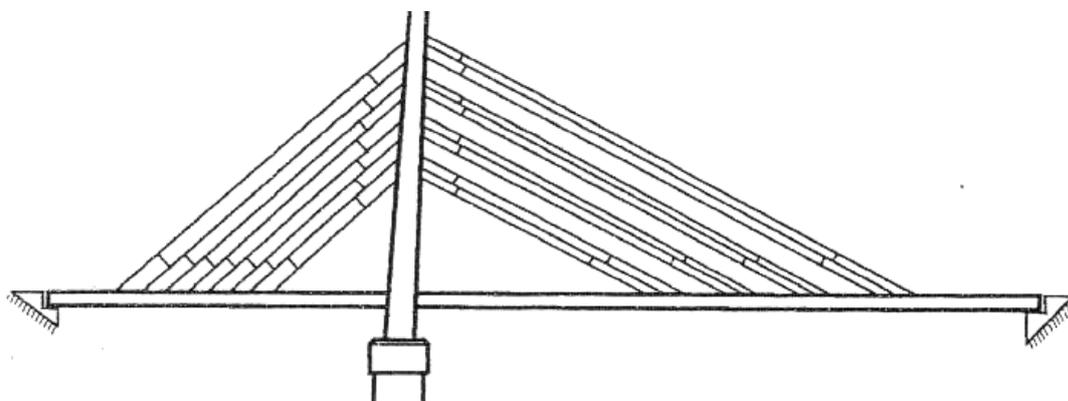


Рисунок 14. Система стабилизации вант моста через р. Днепр в г. Киеве.

* Аналогичные идеи, предложенные Monberg и Thorsen, отчасти реализованы при стабилизации колебаний вант моста Normandie по различным технологиям: для монтажных и эксплуатационных состояний [14].

(факультативно), серединах, двух третях и трех четвертях их длин. Этот вариант более предпочтителен, однако ему присущ тот же недостаток, что и первому.

Вариант 3. Связи образуют пять лучей (один из них факультативный), исходящие из точки пересечения осей пилона и пролетного строения и соединяющие четверти, трети (факультативно), середины, две трети и три четверти **самой длинной ванты**. Такая система более эстетична, чем в первых двух вариантах, и очень эффективна в стабилизации вант. Этому варианту присущи следующие недостатки:

- усложненный расчет геометрии узлов крепления дополнительных связей с вантами, кроме самой длинной;
- сложность учета естественного провисания вант;
- необходимость регулировки длин растяжек при подготовке моста к длительной эксплуатации для обеспечения проектной геометрии вант.

Несмотря на перечисленные недостатки, которые к тому же не представляют непреодолимых препятствий, этот вариант предпочтительнее двух первых по своей эффективности.

Вариант 4. Связи образуют два луча, исходящих из точки пересечения осей пилона и пролетного строения и образующих с горизонталью углы в 10 и 70°. Обладая теми же недостатками, что и предыдущий вариант, при несколько меньшей эффективности данный вариант значительно менее трудоемкий в установке дополнительных связей.

Аналитические исследования и вычислительный эксперимент показали, что достаточно узкий дискретный спектр собственных частот колебаний вант $f = 0,2174 \div 1,0000$ Гц, отражающий многообразие их длин, продольных усилий при монтаже и в эксплуатации благодаря созданию вантовой системы трансформируется в практически непрерывный «размазанный», спектр.

Оптимизация данного варианта может базироваться на расчетах, учитывающих конкретные

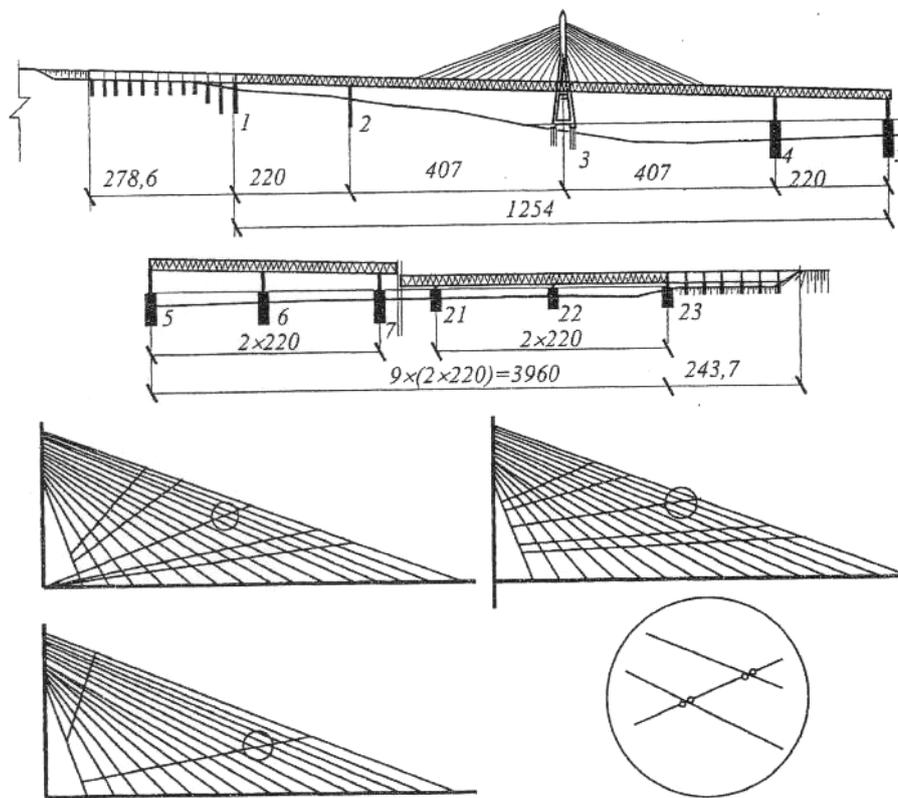


Рисунок 15. Проект стабилизации вант двухъярусного вантового моста через р. Волга в г. Ульяновске.

данные о массовых, геометрических и жесткостных характеристиках пилонов, вант пролетного строения и способов его опирания.

Серьезной альтернативой данному варианту может быть замена луча в 70° связями между вантами вблизи пилона в виде распорок по аналогии с решением проблем стабилизации вант вантового метрооста в г. Киеве (рис. 14).

Конструкция узлов крепления дополнительных связей к несущим вантам.

Узел крепления *j-ой* связи к *i-ой* ванте изображен на рис. 16. Геометрические свойства этого узла описываются выражением

$$\gamma_i = \alpha_i + \beta_j - 90^\circ,$$

где α_i – угол *i-ой* ванты к горизонтали; β_j – угол *j-ой* дополнительной связи к горизонтали.

Из условий надежности и долговечности длина обоймы L зависит от диаметра ванты D и составляет

$$L_{\text{обоймы}} = 3 \div 5D.$$

Изображенная на рис. 16 обойма для удобства монтажа выполняется составной, с соединением обеих половин высокопрочными болтами. Примыкающие к ним узлы дополнительных связей снабжаются фаркопфами (талрепами),

предпочтительно конструкции ЦНИИПСК, с контргайками.

Для повышения вибропоглощающих свойств единой вантовой системы **рекомендуется:**

1. Между обоймой и вантой каждого узла установить прокладку из алюминиевого сплава, например, АД-1 толщиной 1 мм.
2. Между проушиной талрепа и плоской частью обоймы установить прокладки из высокофрикционного материала, например, ленты феродо. Устанавливаемые последовательно в процессе монтажа вант дополнительные связи сохраняют свои свойства эффективной стабилизации и при завершении строительства моста, в процессе длительной эксплуатации сооружения.

Уровень натяжения дополнительных связей определяется следующими факторами:

- минимизация провисания канатов дополнительных связей;
- минимизация изменений естественной геометрии вант;
- обеспечение в максимальной мере вибропоглощающих свойств узлов крепления связей к вантам.

Исходя из этих критериев оптимальным следует считать усилие натяжения канатов в 2–5 т с нарастанием значений от коротких вант к длинным.

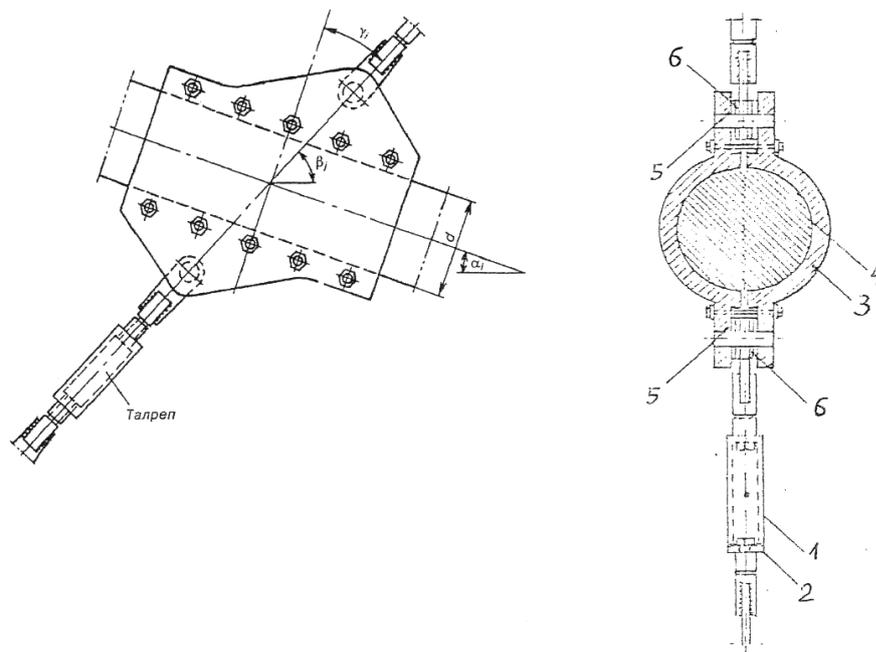


Рисунок 16. Узел крепления дополнительных связей к вантам: 1 – талреп; 2 – контргайка; 3 – обойма; 4 – прокладка из вибропоглощающего материала (алюминий); 5 – проушины; 6 – прокладки из вибропоглощающего материала (лента феродо).

Литература

1. Борджес, Дж. Ф. Проектирование железобетонных конструкций для сейсмических районов / Дж. Ф. Борджес, А. Равара ; Пер. с англ., под ред. С. В. Полякова. – М. : Стройиздат, 1978. – 135 с.
2. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи : [Моногр.] / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим ; Под ред. Е. В. Горохова. – Донецк : [б. и.], 2005. – 345 с. – ISBN 966-7477-50-9.
3. Загора, А. Л. Гашение колебаний мостовых конструкций / А. Л. Загора, М. И. Казакевич ; Под ред. Н. Г. Бондаря. – М. : Транспорт, 1983. – 143 с.
4. Казакевич, М. И. Аэродинамическая устойчивость надземных и висячих трубопроводов / М. И. Казакевич. – М. : Недра, 1977. – 200 с.
5. Казакевич, М. И. Аэродинамика мостов / М. И. Казакевич. – М. : Транспорт, 1987. – 240 с.
6. Реакция висячего перехода через р. Днепр пролетом 720 м на реальное ветровое воздействие / М. И. Казакевич, А. С. Мякшин, З. А. Шульман [и др.]. // Труды ДИИТ. Сб. «Вопросы динамики мостов и теории колебаний» / Под ред. акад. Н. Г. Бондаря. – Днепропетровск, 1982. – Вып. 214/25. – С. 45–55.
7. Экспериментальное исследование висячего моста через р. Урал у г. Чапаева. / М. И. Казакевич, В. Г. Гомаров, З. А. Шульман [и др.] // Исследование металлических конструкций мостовых сооружений : Сб. научн. трудов / ЦНИИПроектстальконструкция. – М., 1985. – С. 118–126.
8. Инструментальные наблюдения за работой вантовых трубопроводных мостов больших пролетов / М. И. Казакевич, З. А. Шульман [и др.] // Труды ЦНИИПСК / под ред. акад. Н. П. Мельникова. – М. : ЦНИИПроектстальконструкция, 1986. – С. 22–28.
9. Стабилизация вант при действии ветрового потока и подвижной нагрузки / М. И. Казакевич, А. Г. Василенко, М. М. Корнеев, Г. Б. Фукс // Вопросы теории колебаний, статистической и динамической работы... : Сб. научн. тр. – Днепропетровск : ДИИТ, 1988. – С. 62–65.
10. Казакевич, М. И. Стабилизация вант при действии ветра и подвижных нагрузок / М. И. Казакевич, А. Л. Загора // Вестник мостостроения. – 1998. – № 2. – С. 21–25.
11. Казакевич, М. И. Фазовые траектории нелинейных динамических систем. Атлас / М. И. Казакевич, В. Е. Волкова. – Днепропетровск : Наука и образование, 2002. – 94 с.
12. Пичугин, С.Ф. Ветровая нагрузка на строительные конструкции / С. Ф. Пичугин, А. В. Махынко. – Полтава : ASMI, 2005. – 342 с.
13. EUROCODE 1: Actions on structures – Part 1–4 : General actions. Wind actions. – 148 p.
14. Gimsing, N. J. Large bridges of the future / N. J. Gimsing // In Aerodynamics of Large Bridges. A., Larsen (ed.). Rotterdam : BALKEMA, 1992. – P. 295–304.

References

1. Borjes, J. F.; Ravara A. Design of reinforced concrete structures for seismic regions. Moscow: Stroizdat, 1978. 135 p. (in Russian)
2. Gorokhov, Ye. V.; Kazakevich, M. I.; Turbin, S. V.; Nazim, Ya. V. Ed. Ye. V. Gorokhov. Wind and ice loading on the overhead power transmission lines. Donetsk, 2005. 348 p. (in Russian)
3. Zakora, A. L.; Kazakevich, M. I. Ed. N. G. Bondar. Antihunting of bridge structure vibrations. Moscow: Transport, 1983. 143 p. (in Russian)
4. Kazakevich, M. I. Aerodynamic stability of the overhead and hanging pipelines. Moscow: Nadra, 1977. 200 p. (in Russian)
5. Kazakevich, M. I. Bridge Aerodynamics. Moscow: Transport, 1987. 240 p. (in Russian)
6. Kazakevich, M. I.; Miakshin, A. S.; Shulman, Z. A. et al. Response of a suspension passage over the Dnieper with the span of 720 m to a real wind loading. In Proc. of DnIET «Issues of the dynamics of bridges and theory of vibrations». Dnepropetrovsk, 1982, Vol. 214/25, p. 45–55. (in Russian)
7. Kazakevich, M. I.; Gomarov, V. G.; Shulman, Z. A. et al. Experimental study of the suspension bridge over the Ural near the town of Chapaev. In Proc. of the TsNIIProektstalkonstruktziya «Investigation of bridgework metal structures». Moscow, 1985, p. 118–126. (in Russian)
8. Kazakevich, M. I.; Shulman, Z. A. et al. Instrumental observation of the operation of cable-braced piping bridges with long spans. Proc. of the TsNIIProektstalkonstruktziya. Moscow: TsNIIProektstalkonstruktziya, 1986, p. 22–28. (in Russian)
9. Kazakevich, M. I.; Vasilenko, A. G.; Korneev, M. M.; Fuks, G. B. Cable stabilization under a wind flow and movable loading. Proc. «Issues of the theory of vibrations, statistic and dynamic operation ...». Dnepropetrovsk: DIIT, 1988, p. 62–65. (in Russian)
10. Kazakevich, M. I.; Zakora, A. L. Cable stabilization under winding and movable loading. Bulletin of bridge, 1998, No. 2, p.21–25. (in Russian)
11. Kazakevich, M. I.; Volkova, V. E. Phase paths of the nonlinear dynamic systems. The atlas. Dnepropetrovsk: Nauka i obrazovanie, 2002. 94 p. (in Russian)
12. Pichugin, S. F.; Mahinko, A. V. Wind loading on building structures. Poltava: ASMI, 2005. 342 p. (in Russian)
13. EUROCODE 1: Actions on structures – Part 1–4 : General actions. Wind actions. 148 p.
14. Gimsing, N. J. Large bridges of the future. In Aerodynamics of Large Bridges. A., Larsen (ed.). Rotterdam: BALKEMA, 1992, p. 295–304.
15. Kazakevitch, M. I. The Aerodynamic Problems of Cable-Stayed Bridges Under Erection. Intern. Symp. on Cable-Stayed Bridges, Shanghai, 1994, p. 308–324.
16. Kazakevitch, M.; Grafski, I. Interaction of Wind with Ice-Covered Structural Members. Proc. 12th Congress IABSE, Vancouver, BC, Sept. 3–7, 1984, p. 853–857.

15. Kazakevitch, M. I. The Aerodynamic Problems of Cable-Stayed Bridges Under Erection / M. I. Kazakevitch // Intern. Symp. on Cable-Stayed Bridges, Shanghai, 1994. – P. 308–324.
16. Kazakevitch, M. Interaction of Wind with Ice-Covered Structural Members / M. Kazakevitch, I. Grafski // Proc. 12th Congress IABSE, Vancouver, BC, Sept. 3–7, 1984. – P. 853–857.
17. Kazakevitch, M. The cable stabilization at the wind and moving load effect / M. Kazakevitch, A. Zakora // 2 EACWE, Genova, Italy, June 22–26, 1997, Vol. 2. – P. 1775–1781.
18. Kazakevitch, M.; Zakora, A. Cable stabilization for wind and moving load effect / M. Kazakevitch, A. Zakora // J. Wind Eng. and Ing. Aerodyn. 74–76 (1998). – P. 995–1003.
17. Kazakevitch, M.; Zakora, A. The cable stabilization at the wind and moving load effect. 2 EACWE, Genova, Italy, June 22–26, 1997, Vol. 2, p. 1775–1781.
18. Kazakevitch, M.; Zakora, A. Cable stabilization for wind and moving load effect. J. Wind Eng. and Ing. Aerodyn. 74–76 (1998), p. 995–1003.

Казакевич Михайло Ісаакович – заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри мости Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. Дійсний член Транспортної академії України. Член Української Асоціації з металевих конструкцій. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, динаміка і аеродинаміка будівельних конструкцій.

Казакевич Михаил Исаакович – заслуженный деятель науки и техники Украины, профессор кафедры мосты Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Действительный член Транспортной академии Украины. Член Украинской Ассоциации по металлическим конструкциям. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, динамика и аэродинамика строительных конструкций.

Kazakevitch Mykhaylo – is an Honored worker of science and engineering of Ukraine, professor of the «Bridges» Department at Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. He is a member of the Transport academy of Ukraine, a member of the Ukrainian Association of Metal Structures. Scientific interests: operating reliability of metal structures, dynamics and aerodynamics of structures.