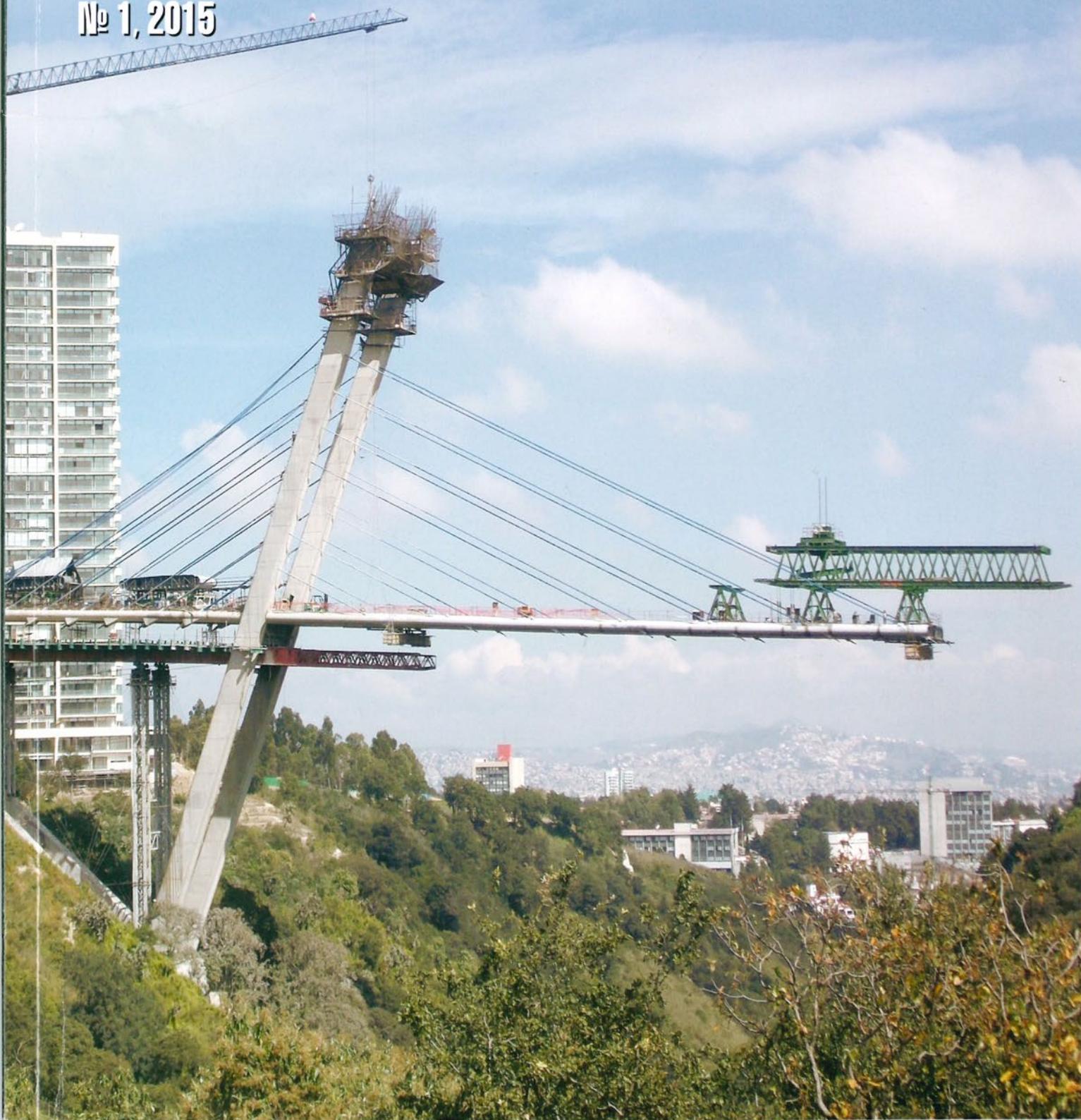


МОСТОСТРОЕНИЕ МИРА



Журнал Ассоциации мостостроителей (Фонд «АМОСТ»)

№ 1, 2015



Альтернативный вариант моста через Мессинский пролив



Впервые опубликовано на английском языке в Сборнике трудов Симпозиума IABSE «Деятельность инженеров на службе Прогрессу, Окружающей среде и Людям», Мадрид, 3–5 сентября 2014 г., под названием *An alternative design idea for Messina strait crossing*.

Несмотря на значительные усилия, затраченные на разработку проекта перекрытия широкого Мессинского пролива, все предложения, которые представлялись до настоящего времени, ограничивались системой классического висячего моста. Исследования сосредоточивались только на аэродинамических свойствах пролетного строения и не предлагали идеи реально новой системы подвески. В связи с этим автор статьи хотел бы предложить новую оригинальную статическую систему моста в виде протяженной конструкции, которая не только позволяет обеспечить аэродинамическую устойчивость пролетного строения под действием ветровой нагрузки, но будет также сравнима по экономическим показателям с вариантами, предложенными ранее.

**Марко Перони
(Marco Peroni),**
инженер-строитель, компания
Marco Peroni Engineering
Faenza, Италия,
peroni@marcoperoni.it

Предлагаемое проектное решение

Основная идея предложения

Еще в 1969 г. архитектор Серджио Мусмеки (Sergio Musmeci) предложил использовать для моста через Мессинский пролив напряженную систему канатов, названную «двойной эффект», в которой

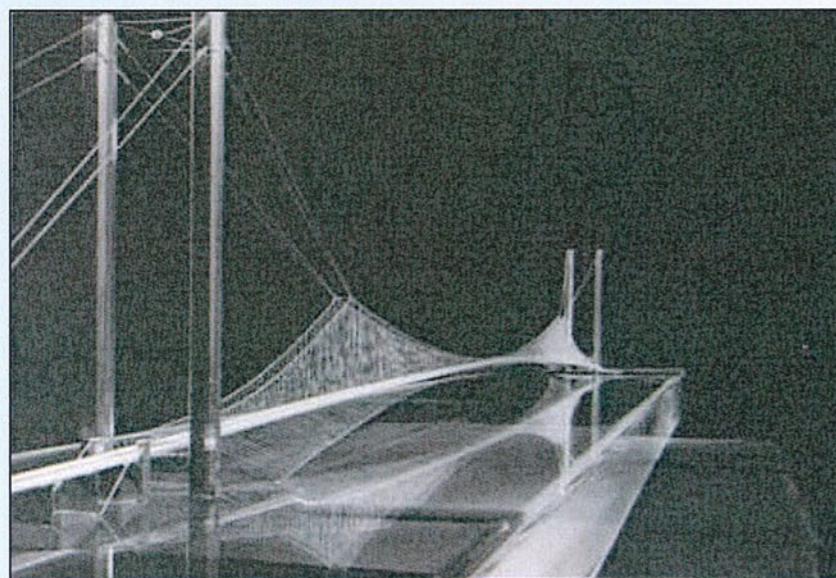


Рис. 1. Проект моста через Мессинский пролив, предложенный Мусмеки в 1969 г.

впервые был принят во внимание феномен аэроупругости, благодаря чему она противостоит действию флаттера, что, в свою очередь, повышает критическую величину расчетной скорости ветра.

Предложение Мусмеки (рис. 1), которое получило первую премию на международном конкурсе, представляло собой висячую конструкцию, в которой, помимо других нововведений, предложена стабилизирующая система канатов, расположенных в нижнем уровне. Подобная система обладает способностью гасить крутильные колебания,

разрабатывая концепции, выдвинутые Ле-Риколе и Мусмеки, автор статьи предложил для моста через Мессинский пролив трехмерную протяженную конструкцию в форме, близкой к гиперболоиду. Она состоит из пространственной (3D) сетки канатов, которые, подобно плетёной корзине, переплетаются между собой, а внутри нее находится пролетное строение моста с проезжей частью.

Описание конструкции моста

Предложенная модель для моста через Мессинский пролив основана на принципах «двойного эффекта», производимого с помощью канатной 3D-сетки в форме гиперболоида, ко-

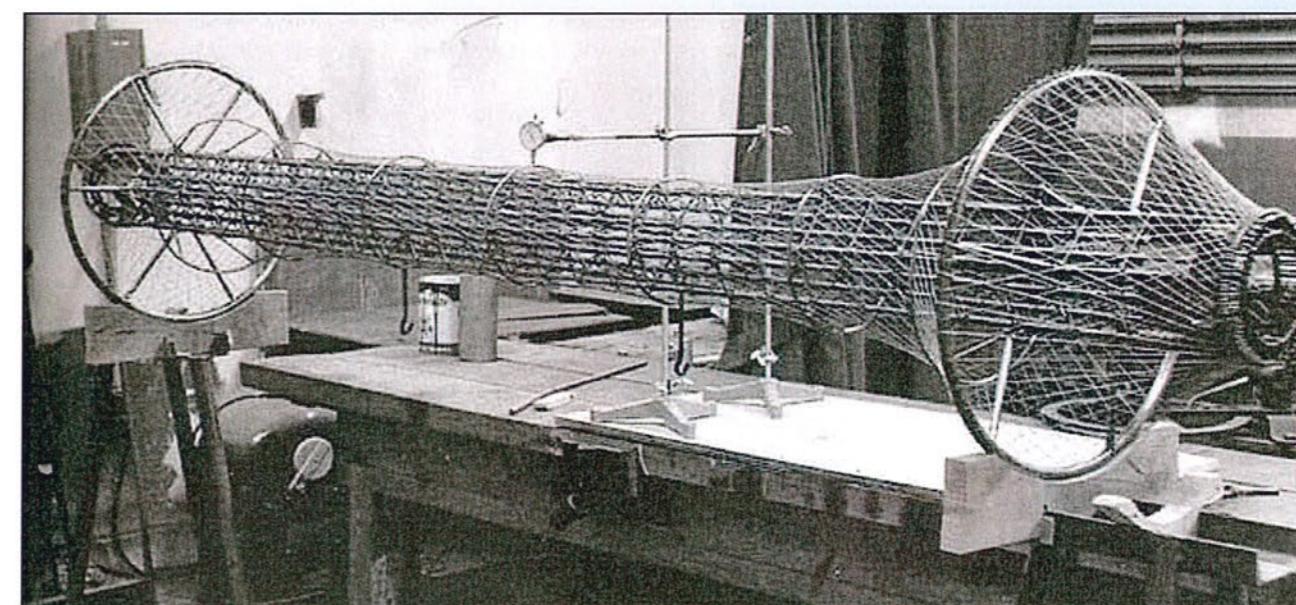


Рис. 2. Экспериментальная гиперболическая конструкция, предложенная Ле-Риколе

торая позволяет получить значительное увеличение крутильной жесткости (рис. 3). Уменьшение диаметров канатов, распределенных по замкнутому в поперечном сечении эллиптическому контуру, в сочетании с обтекаемой формой пролетного строения (подобно схеме Мусмеки) приводит к уменьшению погонной постоянной нагрузки и к снижению собственного веса конструкции.

Основная сетка канатов расположена между двумя пylonами эллиптической формы на концах пролетного строения на высоте 115 м от уровня моря. Каждый из пylonов огибает 20 канатов диаметром 0,4 м, составленных из высокопрочных проволок. Канаты расположены равномерно по пе-

риметру эллиптического контура пилона, причем к середине пролета моста расстояние между канатами равномерно сокращается (рис. 4).

Система переплетающихся канатов создает замкнутую поверхность, чрезвычайно устойчивую к воздействию горизонтальных и вертикальных сил и крутящих моментов от ветровой нагрузки.

В результате перехода на форму несущей конструкции в виде пространственного гиперболоида канаты, составляющие такую конструктивную систему, имеют ма-

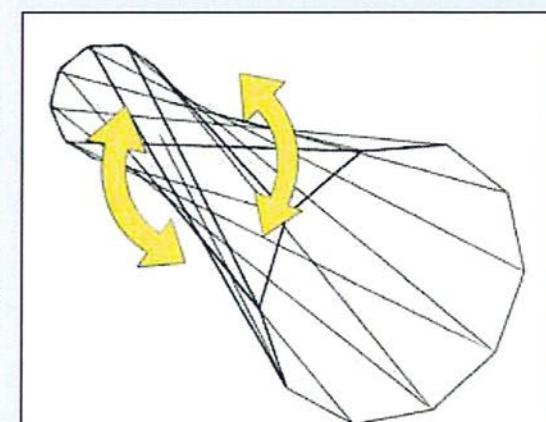


Рис. 3. Преимущества гиперболической конфигурации

лый собственный вес в сравнении с весом канатов в традиционных висячих мостах и, помимо этого, обладают высокой устойчивостью и со-

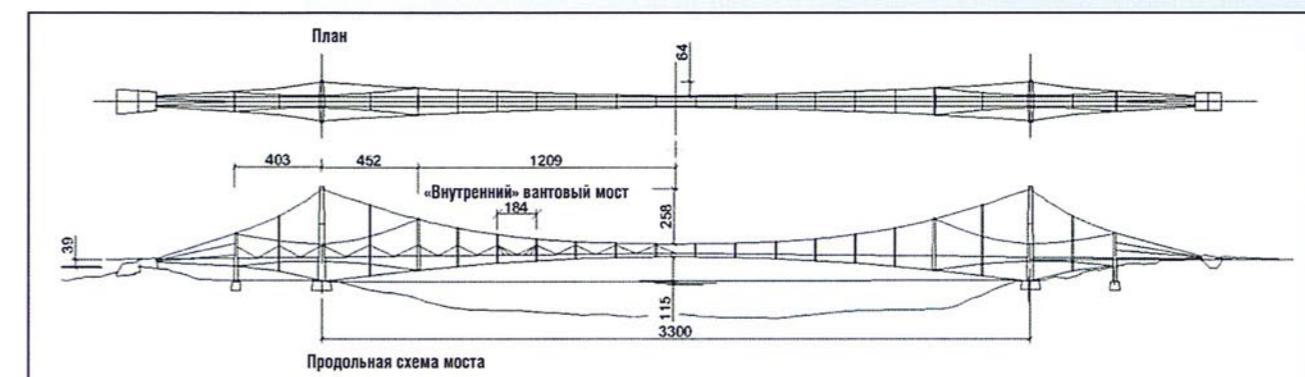


Рис. 4. План и продольный профиль моста

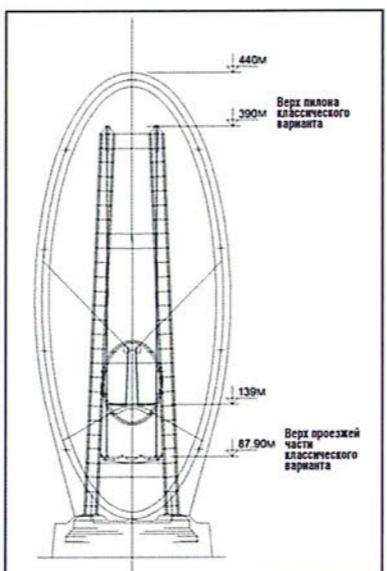


Рис. 5. Схематический рисунок и сравнение пилонов моста через Мессинский пролив по классическому проекту и по проекту новой концепции

противляемостью к воздействию нагрузок.

Новизна предлагаемой идеи мостовой конструкции состоит в образовании определенного числа «внутренних» вантовых мостов с пролетами длиной около 200 м (так называемые первичные мосты), причем работа каждого из них не зависит от степени загрузки остальных пролетов, подвешенных на рамках, которые служат для образования канатных сеток.

Последовательность образования конструкции трехмерной канатной сетки начинается с монтажа больших металлических рам, служащих для пространственной фиксации канатов. Канаты предварительно размещаются в пространстве с использованием технологии воздушного прядения, которая традиционно применяется для формирования главных несущих канатов висячих мостов. Таким образом формируется пространственный канатный гиперболоид.

Первыми симметрично с обоих берегов устанавливают рамы, ближайшие к эллиптическим пylonам. Их монтируют с помощью двух временных главных канатов, и их положение фиксируют двумя нижними канатами.

Принцип монтажа состоит в следующем: традиционным способом формируют «внутренние» вантовые мосты с относительно небольшими для вантовых мостов пролетами (длина максимального пролета не должна превышать 200 м). Новым в этой конструкции является создание внешней канатной сетки, которая несет на себе всю нагрузку.

Эта новая конструктивная схема позволяет снизить требования по крутильной жесткости и уменьшить собственный вес пролетного строения. В нашем варианте ширина пролетного строения составляет 40 м с сохранением того же числа полос автомобильного движения и железнодорожных путей, что и в классических проектах рассматриваемого мостового перехода. Снижение собственного веса в предлагаемом варианте достигается посредством уменьшения общей площади поперечного сечения канатов. При общем числе 20 главных несущих канатов и диаметре одного каната 0,40 м общая площадь несущих канатов равна 2,52 м², в то время как в классическом проекте моста, который выиграл тендерный конкурс, общая площадь главных несущих канатов составляет 4,8 м².

Кроме того, собственный погонный вес балки жесткости пред-

лагаемого пролетного строения равен 11 т/м в сравнении с тем же показателем классического варианта моста через Мессинский пролив, который равен 20 т/м. Расход канатов в предлагаемом варианте составляет 20 т/м, в классическом проекте он равен 32 т/м. Общая потребность в канатах на объект в предлагаемом варианте равна 105000 т, в тендерном проекте она составляет 166000 т. Эти величины красноречиво свидетельствуют о преимуществах предлагаемого варианта, не говоря уже о том, что новая конструкция обладает более высокими конструктивными качествами и более эффективна, чем конструкция, предусматриваемая традиционным проектом.

Что касается пилонов, то можно провести такое же сравнение расхода металла между предлагаемым вариантом (высота уникальных пylonов эллиптической конфигурации 440 м) и классическим тендерным проектом (высота пилона 390 м при наличии поперечной балки, которая соединяет обе стойки пилона). В новом предложении пylonные опоры опираются на фундаменты, аналогичные тем, которые предусмотрены в классическом решении (рис. 5).

Компьютерные расчеты

В прошлом году мы начали серию исследований, направленных на упрощение структуры расчетных моделей по методу конечных элементов для определения картины распределения усилий в канатной сетке. Эти последние исследования также будут способствовать уточнению сравнения между новым решением и тендерным проектом, который может быть действительно предложен к реализации перехода через Мессинский пролив. Это сравнение продемонстрирует, что объект, построенный в соответствии с новой концепцией, может оказаться менее дорогим и более эффективным в отношении аэродинамической устойчивости и вследствие этого – и в отношении эксплуатационных расходов (табл. 1).

Можно сравнить наши результаты с конечными результатами расчета «классического» решения, полученными специалистами компании Società Stretto di Messina (SM), (табл. 2).

В упомянутом первом упрощенном расчете по методу конечных элементов вертикальные нагрузки и горизонтальная ветровая нагрузка прикладывались к промежуточным эллиптическим балочным элементам (которые поддерживают «внутренние» первичные вантовые мосты). Эти элементы, как предполагается, обладают жесткостью, достаточной для того, чтобы они были в состоянии передавать усилие в каждом канате ка-

Таблица 1
Исходные данные для расчета по методу конечных элементов (новый вариант пролетного строения висячего моста через Мессинский пролив) и некоторые результаты расчета

Диаметр одиночного каната системы главных несущих канатов	0,40 м (20 канатов)
Диаметр вторичного каната канатной сетки	0,20 м
Максимальная вертикальная деформация под суммарной нагрузкой	5,5 м
Максимальная поперечная деформация от статической ветровой нагрузки	4 м
Период первой формы собственных колебаний (горизонтальных)	21 с
Максимальное растягивающее усилие в канате (статический нелинейный расчет)	45000 кН (4500 т)

Таблица 2

Характеристики из тендерного проекта моста через Мессинский пролив (версия SM)

Диаметр одиночного главного несущего каната	1,20 м (4 каната)
Максимальная вертикальная деформация под суммарной нагрузкой	15 м
Максимальная поперечная деформация от статической ветровой нагрузки	11 м
Период первой формы собственных колебаний (горизонтальных)	32 с
Максимальное растягивающее усилие в канате (статический нелинейный расчет)	81000 кН (81000 т)

натной сетки. На этой первой попытке расчета мы не рассматривали возможность предварительно-го натяжения канатов.

Окончательная расчетная компьютерная модель состоит только из растянутых элементов (канатов) и из балочных элементов (пилонов и рам).

Предполагалось, что на первой стадии нелинейного статического расчета будут определены деформации пролетного строения под действием постоянных и времен-

ных подвижных нагрузок в сочетании со статическим действием горизонтальной ветровой нагрузки.

Полученные результаты показали, что вертикальные деформации пролетного строения под действием полной временной подвижной нагрузки и постоянной нагрузки составляют 5,5 м (рис. 6), а горизонтальные деформации под статическим действием горизонтальной ветровой нагрузки равны 4 м (рис. 7).

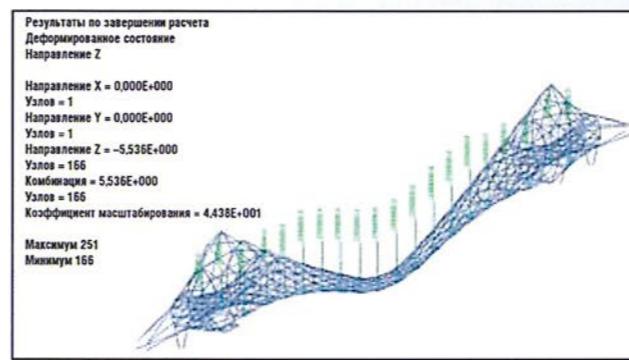


Рис. 6. Вертикальная деформация пролетного строения под действием общей нагрузки (автомобильной и железнодорожной)

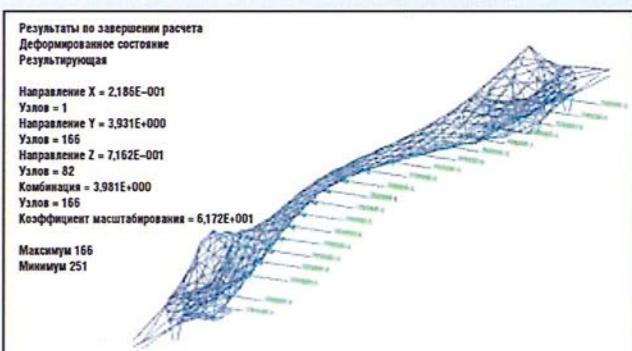


Рис. 7. Горизонтальная деформация под действием статической ветровой нагрузки

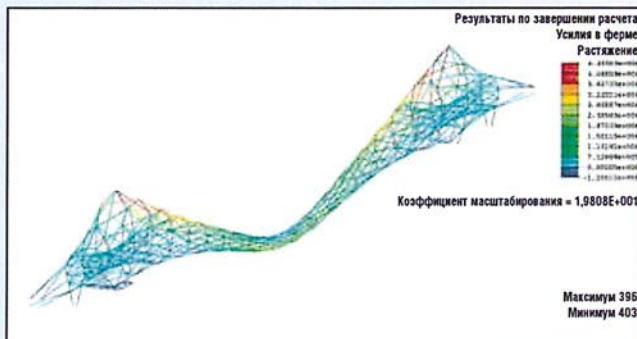


Рис. 8. Диаграмма растягивающих усилий в канатах

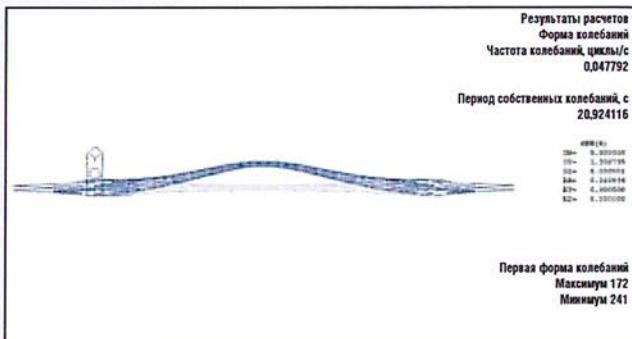


Рис. 9. Первая форма собственных горизонтальных колебаний

Анализ результатов расчета по предлагаемому варианту

Висячий мост с пролетом в свету	3300 м
Диаметр одиночного главного несущего каната (канаты наружной сетки)	0,40 м
Диаметр одиночного вторичного каната, которые расположены по эллиптическому контуру (внутренняя канатная сетка вблизи пилонов)	0,20 м
Ширина пролетного строения	40 м
Погонный вес пролетного строения	11 т/м
Высота пилонов	440 м
Период собственных горизонтальных колебаний в первой форме	19,5 с
Период собственных вертикальных колебаний в первой форме (f_v)	14,5 с
Период крутильных колебаний в первой форме (f_l)	5 с
Отношение периодов в первой форме (f_v/f_l)	2,85 (для моста Большой Бельт: 2,79)
Полный расход канатов	110000 т
Полный вес металлических рам первичных мостов	20000 т

Максимальное растягивающее усилие в канатах равно приблизительно 4500 т (рис. 8). Был проведен также динамический расчет по определению собственных форм колебаний конструкции (рис. 9).

Период первой формы собственных горизонтальных изгибных колебаний пролетного строения составил приблизительно 13 с. Период крутильных колебаний равен примерно 4,70 с, что свидетельствует о весьма высокой жесткости конструкции и об очень большой разнице между динамическими характеристиками двух главных форм колебаний системы. Согласно положениям нормативного расчета на опасность потери аэродинамической устойчивости при возникновении флаттера рекомендуется, чтобы эта разница была достаточно существенной.

Известно, что отношение крутильной частоты к вертикальной

частоте колебаний системы определяет характер и свойства реакции пролетного строения на воздействие ветровой нагрузки при наиболее опасной форме аэроупругой потери устойчивости. Явление классического флаттера возникает по причине одновременного появления крутильной и вертикальной форм колебаний. В нашем случае это условие становится вероятным без какого-либо увеличения аэrodинамической и крутильной жесткости. Однако новая конфигурация главных несущих канатов позволит снизить общий собственный вес пролетного строения.

Расчет подтвердил справедливость величины соотношения частот, которое равно приблизительно 2,85. Это соотношение близко к аналогичным динамическим показателям пролетного строения висячих мостов через Большой Бельт

Таблица 3

(Store bealt) и через реку Хамбер (Humber), в то время как в классическом проекте моста через Мессинский пролив эта характеристика равна 1,36.

Выводы

Как видно из расчетных данных, приведенных ранее в таблицах, применение рассмотренной новой концепции проекта мостового перехода через Мессинский пролив технически возможно. Экономические показатели предлагаемой конструкции пролетного строения сравнимы с аналогичными параметрами проекта, который победил на тендерном конкурсе и который имеет шансы быть реализованным. Что касается технических характеристик решения, которое было принято на тендерном конкурсе и остается до сих пор в силе, то новая идея позволяет получить более высокие эксплуатационные качества пролетного строения. В частности, и в первую очередь, имеется в виду его реакция на действие ветровой нагрузки, а также повышенные качества на стадии эксплуатации в части реакций на горизонтальные, крутильные и некоторые другие динамические воздействия (табл. 3).

Работа над новой концепцией моста была настоящим вызовом, который требует своего дальнейшего развития до уровня практического применения в качестве «альтернативного решения» конструкции моста, ставшей и остающейся предметом жарких споров.