

НАДЕЖНОСТЬ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ ВАНТОВЫХ МОСТОВ С УЧЕТОМ ИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

А. А. Ничипуренко
Научный руководитель – И. Я. Богданов

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: revenge-aguero@mail.ru

Рассмотрены вопросы, касающиеся надежности опорных частей вантовых мостов с учетом их температурных деформаций. Проанализировано действие температуры на состояние конструкций, рассмотрена возможная работа вантового моста в суровых условиях Сибири на основе характеристик Русского моста.

Ключевые слова: Вантовый мост, опорные части вантовых мостов, температурные деформации.

Развитие строительной отрасли, и в частности дорожной, способствовали стремительному развитию вантовых сооружений. Вантовые мосты сейчас «олицетворяют наше время» в крупномасштабном мостостроении, демонстрируя новизну и современную инженерную мысль. В вантовых мостах нагрузки на пролетные строения от собственного веса и подвижного транспорта передаются высоким пилонам через систему вант (тросов), которые представляют собой металлические канаты, выполненные либо в виде переплетения высокопрочной проволоки, либо в виде параллельных пучков из неё. Первые применяются в небольших вантах для легких мостов, так как в них часть прочности вант тратится на гашение напряжений, вызванных спиральной свивкой. Вторые более предпочтительны, так как полностью используют прочность всех пучков, входящих в вант [1].

Замена железобетонных несущих конструкций стальными вантами делает мостовые сооружения более экономичными. Известно, что в железобетонных элементах растягивающие напряжения воспринимает в большинстве своем металлическая арматура, а сжимающие – бетон, а так как ванты работают, в основном, на растяжение, то в них задействована вся площадь поперечного сечения. Использование высокопрочной стали в тросах позволяет добиться существенного уменьшения расхода строительного материала, предназначенного для восприятия сжимающих напряжений.

Вантовые мосты особенно эффективны при преодолении широких водных преград и горных ущелий. Использование традиционных балочных, арочных и других схем мостов, а также их комбинаций требует большого количества промежуточных опор, что является очень затратным. Вантовые и подвесные мосты позволяют устраивать перекрытия большой протяженности с малым количеством промежуточных опор.

Таким образом, вантовые конструкции дают возможность реализовывать визуально «парящие» сооружения, которые, помимо эстетической значимости, имеют и экономические выгоды, так как уменьшается количество промежуточных опор и объем строительных материалов, по сравнению с другими схемами мостовых переходов.

Возведение мостов с большими пролетами является актуальным для полноводных судоходных рек, к которым относятся великие сибирские реки, такие как Енисей, Лена, Обь и другие. Если учесть тот фактор, что на участках нижнего течения их русла имеют достаточно большие размеры, и в устьях рек действуют морские порты, то применение

там вантовых мостов становится целесообразным [2]. Водосборные бассейны сибирских рек расположены в регионах с суровым климатом. Из-за особенностей их течения – с юга на север – размеры речных долин, глубины и объемы стока воды возрастают по мере приближения к арктическим районам. Однако именно в северных регионах наиболее существенной становится проблема температурных деформаций мостов, в том числе и вантовых.

Известно, что с увеличением длины элементов увеличиваются и линейные удлинения в результате температурного воздействия [3]. Большинство мостов испытывают эти деформации только в плоскости балок. Однако для вантовых сооружений температурные деформации проявляются еще и в направлении вант. В результате воздействия отрицательной температуры укорачивается и пролет моста, и вант, что деформирует систему в двух направлениях одновременно.

Наибольшие деформации происходят в окрестности крайней точки подвесной части вантового моста. Часть перемещения вдоль оси вант компенсируется изгибом подвесного пролета, однако это лишь небольшая часть и перемещение в вертикальном направлении все же произойдет. А при возведении большепролетных мостов в суровых климатических условиях такие перемещения могут принимать достаточно большие значения.

Проведем оценку температурных деформаций сооружения, подобного мосту, соединившему остров Русский с материком во Владивостоке, для суровых климатических условий Сибири.

Линейная температурная деформация $\Delta l_{\Delta t}$ определяется по известной формуле:

$$\Delta l_{\Delta t} = l \cdot \alpha \cdot \Delta t, \quad (1)$$

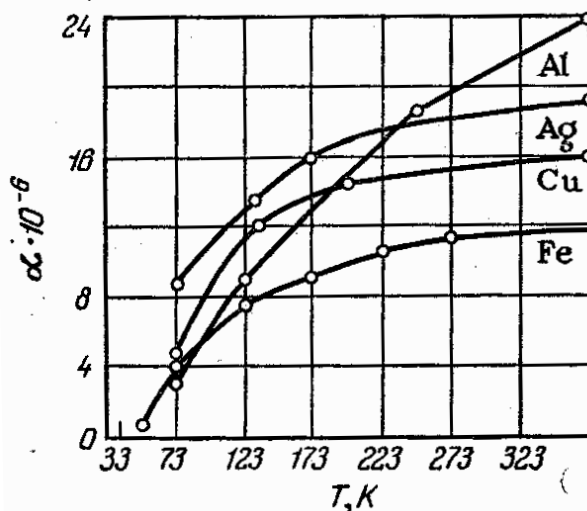
где l – начальный размер элемента, м; α – коэффициент линейного расширения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; Δt – изменение температуры, $^{\circ}\text{C}$.

Начальный размер элемента обычно определяют при расчетной температуре. На стадии проектирования в ее качестве обычно принимают среднюю температуру при эксплуатации элемента. Также возможно измерение при реальной температуре – это делается для того, чтоб узнать на уже готовой конструкции конкретные линейные деформации, которые произойдут при изменении температуры на определенное количество градусов.

Коэффициент линейного расширения (далее – КЛР) зависит от материала. На стадии проектирования используют табличные значения материалов, однако для ответственной конструкции нужно производить лабораторные испытания образцов. Ведь сам КЛР также зависит и от строения материала, технологий производства, цвета материала и многих других факторов и может серьезно отличаться от табличных значений. КЛР чистого железа составляет $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ при температуре близкой к $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако чистое железо не используется в строительстве – для придания нужных свойств используют стали с примесями. При температуре от $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ КЛР стали в среднем составляет от $10 \cdot 10^{-6}$ до $18 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. При отрицательных температурах значение КЛР может серьезно измениться. Зависимость коэффициента линейного расширения металлов от температуры показана на рисунке [4].

Из рисунка видно, что зависимость нелинейная, и при температурах близких к абсолютному нулю, значения КЛР будут стремиться к 0 K^{-1} . Исследуемый участок температуры для северных регионов находится в интервале от $-65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При пересчете на шкалу Кельвина диапазон составит от 208 до 313 К. Так как на данном участке изменения относительно небольшие, приближенно нелинейную зависимость можно заменить линейной и для расчетов брать усреднённое значение.

На рассматриваемом участке температур линия зависимости имеет относительно небольшой разброс показателя КЛР, что для простых расчетов может быть достаточно. Для высокоточных элементов и для элементов, имеющих большую длину вычисление деформации должно вестись с учетом изменяющегося КЛР при различных температурах.



Зависимость коэффициента линейного расширения α (K^{-1}) металлов от температуры T (К)

Изменение температуры в случае укорочения длины элемента подразумевает уменьшение температуры. В данной формуле знак изменения температуры и означает вид деформации элемента. (если Δt со знаком «-», то и элемент будет укорачиваться, а если Δt со знаком «+», то элемент удлиняется).

Подвесная часть вантового моста на остров Русский имеет длину 1872 м. Самый большой его пролет имеет длину ванта 578,08 м [5]. Если взять усредненный КЛР для углеродистой стали в $11,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и диапазон температур для северных регионов Красноярского края ($-65 \text{ } ^\circ\text{C} - 40 \text{ } ^\circ\text{C}$), то по формуле (1) деформация ванта составит 0,71 м со знаком «минус». Это означает, что крайняя подвесная часть моста переместится на 0,71 м в направлении ванта (сожмется). Вертикальная проекция данного перемещения составляет 0,46 м, а горизонтальная 0,54 м. Сама подвесная часть моста лишь висит на вантах и не имеет прямого упора в горизонтальном направлении. Из-за этого деформируются (сжиматься) будет вся подвесная часть моста.

Температурные деформации подвесной части моста также рассчитаем по формуле (1). Изменение длины составит 2,3 м снова со знаком «минус». Горизонтальное перемещение крайней точки подвесной части составит 1,15 м. Проекция горизонтального перемещения компенсируется большим перемещением подвесной части, а вот вертикальное перемещение не компенсируется. Данный расчет сильно упрощен и не учитывает множество других факторов, однако он уже показывает, что перемещения будут довольно большими, а вертикальное перемещение будет достаточно серьезным.

Работа вантовых мостов при отрицательных температурах еще недостаточно изучена. Одной из главных проблем таких конструкции при низких температурах, как видно из оценочных расчетов, становится устройство опорных частей. Они представляют собой различные конструкции, которые воспринимают нагрузки от пролетных строений и передают их на сами опоры. Сами пролетные строения в период эксплуатации перемещаются, поэтому необходимо устройство шарнирной опорной части, иначе напряжения от перемещений будут восприниматься самим материалом моста.

Большинство опорных частей мостов балочного или арочного исполнения предполагают либо поворот пролетного строения при прогибе, либо поворот и горизонтальное перемещение. Для компенсации таких перемещений часто используют качающиеся опорные части, либо скользящие. Однако для больших вантовых мостов они не подходят, так как крайняя подвесная часть моста имеет еще и вертикальное перемещение. Для таких условий опорная часть должна предполагать эти перемещения. Опора должна быть подвижной в горизонтальном и вертикальном направлении одновременно.

Вертикальные перемещения вантового моста как раз не позволяют использовать шарнирных или скользящих опор традиционного исполнения. Сама подвесная часть моста не нуждается в опоре – весь ее вес воспринимается вантами. Однако технически крайние части необходимо закрепить, но при этом позволить горизонтальные и вертикальные перемещения. Также есть одно дополнительное условие для опорной части – для вантовых мостов довольно опасной нагрузкой являются его колебания. Поэтому опора должна демпфировать эти колебания.

Проблема температурных деформаций будет со временем проявляться все серьезней и серьезней. Конструкции будут грандиозней, масштабней, что в любом случае приведет к увеличению размеров элементов. Сама проблема температурных деформаций будет уже заметна не только в северных регионах, однако именно в них данная проблема будет становиться довольно серьезной при проектировании и выходить на передний план. Развитие дорожной отрасли также требует новых масштабных проектов для решения проблем. И вантовые мосты могут решить некоторые эти проблемы. Однако нужно особенно ответственно подходить к вопросу проектирования таких конструкций – ведь температурные деформации будут существеннее, и не учитывать их просто нельзя.

Библиографические ссылки

1. Конструкции вантовых пролетных строений [Электронный ресурс]. URL: <http://vse-lekcii.ru/mosty-i-tonneli/metallicheskie-mosty/konstrukcii-vantovyh-proletnyh-stroenij> (дата обращения: 14.03.2019).

2. Сибирские реки и судоходство по Северному морскому пути [Электронный ресурс]. URL: https://studwood.ru/1095824/geografiya/sibirskie_reki_sudohodstvo_severno-mu_morskomu_puti дата обращения: 08.03.2019).

3. Формула линейного расширения [Электронный ресурс]. URL: http://sernam.ru/book_phis_t1.php?id=200 (дата обращения: 11.03.2019).

4. Ильинский А. А. Транспорт и хранение промышленных сжиженных газов. М. : Химия, 1976. 160 с.

5. Строительство моста на остров Русский через пролив Босфор Восточный во Владивостоке [Электронный ресурс]. 2011. URL: <http://www.rusmost.ru/about/> (дата обращения: 09.03.2019).

© Ничипуренко А. А., 2019