



Козьмин Николай Андреевич — аспирант заочной формы обучения кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения. Окончил с отличием факультет «Мосты и тоннели» в 2008 г., в 2009 г. поступил в аспирантуру. Научный руководитель — Сергей Анатольевич Бахтин, кандидат технических наук, профессор кафедры «Мосты».

Научные интересы — висячие и вантовые мосты, оптимизация строительных конструкций. Имеет восемь публикаций по связанным с научными интересами темам.

E-mail: 4sci@bk.ru

УДК 624.53

Н.А. КОЗЬМИН

О НЕКОТОРЫХ СПОСОБАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ В ВАНТОВО-БАЛОЧНЫХ МОСТАХ

Рассмотрены аналитические способы нахождения для вантовых мостов регулирующих усилий натяжения вант, отмечены их недостатки. Предложен и реализован способ автоматизированного подбора оптимальных усилий, лишенный данных недостатков и значительно снижающий расчетные напряжения в балке жесткости.

Ключевые слова: вантовые мосты, регулирование усилий, оптимальное проектирование конструкций, метод ИПП.

Одним из направлений решения транспортных проблем больших городов является строительство наземных пешеходных переходов. Применяемые для этих целей вантовые мосты, имеющие высокие архитектурно-эстетические показатели, составляют конкуренцию традиционным мостовым системам при пролетах более 30 м. Регулирование усилий, производимое в вантовых мостах, представляет собой главное средство снижения внутренних усилий в их элементах и, как следствие, — снижения общего веса и стоимости сооружения. Целью регулирования усилий является получение плавного проектного профиля пролетного строения и улучшение огибающих эпюр усилий, действующих в балке жесткости. Как правило, эта цель достигается натяжением либо ослаблением вант в собранной системе.

Как показано в [1], задачу регулирования усилий в вантовом мосту вполне допустимо свести к регулированию усилий в балке жесткости, поскольку некоторое превышение расхода материала на ванты и пилон, возникающее вследствие возможного увеличения приходящихся на них при регулировании усилий, сполна окупается снижением расхода материалов на балку жесткости.

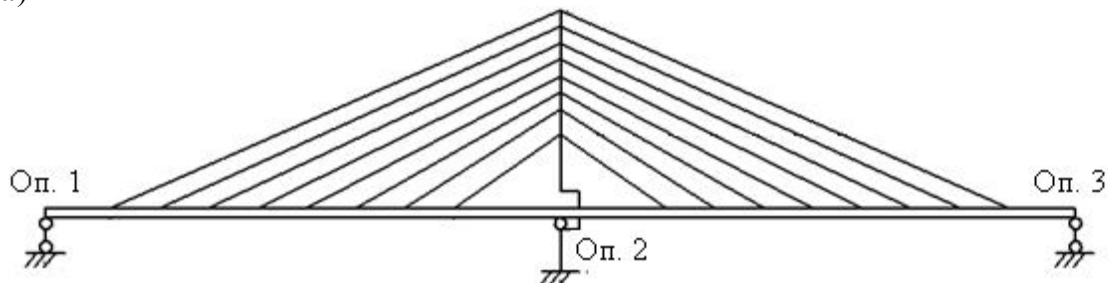
Одним из аналитических способов, рассмотренных в литературе [2], является выравнивание модулей ординат огибающей эпюры изгибающих моментов. Пусть максимальный расчетный момент в некотором сечении балки жесткости без проведения регулирования $M_{\max} > 0$, минимальный $M_{\min} < 0$. Тогда эти значения выравниваются при создании в сечении дополнительного момента $M_{\text{reg}} = (M_{\max} + M_{\min})/2$.

Рассмотрим однопильный симметричный вантовый мост, подкрепленный $2n$ вантами (см. рис. 1, а). Пусть стоит задача создать в n сечениях дополнительные моменты от регулирования M_{reg} , описываемые матрицей-столбцом B из n элементов. Матрица влияния A имеет в этом случае размерность $n \times n$, а ее элементы a_{ij} равны изгибающему моменту, возникающему в i -м сечении от натяжения j -й ванты на единич-

ное усилие. В этом случае матрица соответствующих усилий натяжения X однозначно определится как решение системы линейных алгебраических уравнений из условия

$$X = A^{-1}B. \quad (1)$$

а)



б)

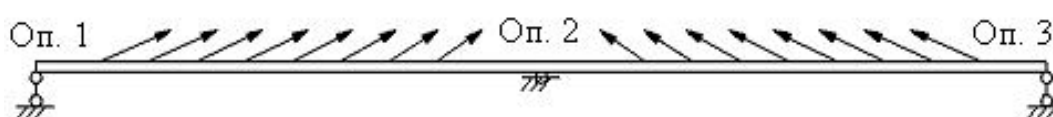


Рис. 1. Схема однопильонного симметричного вантового моста — а; схема к определению усилий регулирования — б

При этом в качестве расчетной схемы рассматривается балка жесткости, действие сил натяжения вант на которую заменяется сосредоточенной нагрузкой (см. рис. 1, б).

Способ имеет следующие недостатки:

1) решение (1) может дать недопустимые значения усилий натяжения в вантах, при учете вместе с усилиями, возникающими на предыдущих стадиях монтажа, выключающие их из работы либо превышающие несущую способность ванты по прочности;

2) поскольку напряженно-деформированное состояние балки жесткости определяется не только изгибающим моментом, но и в несколько меньшей степени продольной силой, то выравнивание одной лишь эпюры изгибающих моментов может оказаться недостаточным.

Предложенная М.М. Корнеевым методика [3] подразумевает возможность регулировать многие силовые факторы и перемещения общим числом m , большим, чем число регулировок n . В этом случае задачей становится нахождение вектора неизвестных величин регулировок X по выведенной автором формуле:

$$X = (A^T K A)^{-1} A^T K M, \quad (2)$$

где A — матрица единичных регулировок, т.е. матрица усилий (перемещений), вычисленных в контролируемых точках от единичных воздействий сил регулирования; M — вектор желаемых результатов — величин изменений усилий (перемещений) в контролируемых точках системы; K — матрица весовых коэффициентов, определяющая относительную значимость каждой из контролируемых величин.

Эта формула соответствует минимальной величине суммы квадратов отклонений получаемых результатов от желаемых, т.е. наименьшему совокупному отклонению общей картины напряженно-деформированного состояния (НДС) от желаемого.

Наряду с недостатками вышеописанного способа, дополнительный недостаток этой методики видится в заведомой неопределенности и невозможности сопоставить с чем-либо осязаемым величины весовых коэффициентов, назначаемые исключительно на усмотрение проектировщика. При применении этой методики неизбежен перебор различных значений этих коэффициентов.

Усилия натяжения вант могут также быть найдены методами упорядоченного или случайного поиска. К методам упорядоченного поиска относятся: перебор по сетке, градиентный метод, метод штрафных функций и т.д. Случайный же поиск подразумевает использование случайно или квазислучайно генерируемых в некотором заданном диапазоне сочетаний параметров. Случайный поиск представляется более выгодным при решении задач с большим числом параметров. В независимости от того, какой способ поиска выбран, следует определиться с минимизируемой функцией. В случае рассмотрения задачи определения регулирующих усилий натяжения в вантах при заданных параметрах геометрической схемы и внутренних сечений элементов пролетного строения в качестве такой функции может быть задано максимальное нормальное напряжение, возникающее в балке жесткости на стадии эксплуатации.

При разработке компьютерной программы для оптимизации и автоматизированного проектирования вантового пешеходного однопилонного моста была составлена подпрограмма для нахождения усилий натяжения вант, минимизирующих максимальное нормальное напряжение, возникающее в сечениях балки жесткости в эксплуатационной стадии. Эта подпрограмма учитывает НДС пролетного строения, складывающееся как сумма состояний на таких стадиях его работы, как:

- 1) загрузка отдельных блоков пролетного строения, установленных на временных опорах, собственным весом;
- 2) первичное натяжение вант для передачи собственного веса блоков пролетного строения с временных опор на ванты, замыкание стыков между блоками;
- 3) демонтаж временных опор;
- 4) загрузка собранного вантового пролетного строения второй частью постоянной нагрузки — весом ограждающих конструкций, коммуникаций и т.д.;
- 5) регулирование усилий в конструкции, подготовленной к эксплуатации;
- 6) восприятие временной пешеходной нагрузки.

Определение НДС на стадиях 1–4, 6 производится стандартными методами строительной механики и методом конечных элементов. В стадии 5-й усилия натяжения вант определяются путем перебора элементов квазислучайной ЛПт-последовательности [4]. Каждый элемент такой последовательности представляет собой точку внутри n -мерного единичного куба, каждая координата которого определяет собой положение величины усилия натяжения соответствующей ванта в заданном диапазоне возможных значений. Этот диапазон назначается таким, чтобы не допустить возможности выключения ванта из работы на эксплуатационной стадии и в то же время не допустить превышения несущей способности ванта по прочности.

Усилия натяжения, соответствующие каждой из исследуемых точек, окончательно описывают картину суммарного НДС пролетного строения и позволяют определить расчетные значения наибольших величин нормального напряжения $\sigma_{\max}$ от сочетания изгибающих моментов M и продольных сил N в балке жесткости по формуле (8.18) СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» [5]:

$$\sigma_{\max} = \frac{|M|}{\Xi W_n} + \frac{|N|}{A_n} \chi. \quad (3)$$

Окончательным решением задачи является точка, соответствующее которой значение $\sigma_{\max}$ минимально.

а)



б)

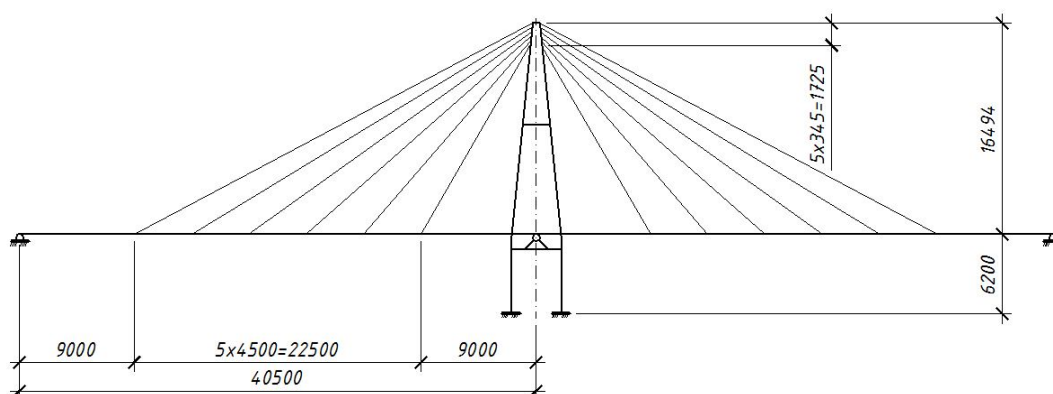


Рис. 2. Пешеходный вантовый мост через проезд Энергетиков в Новосибирске:
а — общий вид; б — геометрическая схема пролетного строения

Рассмотрим возможность применения алгоритма на примере существующего вантового пешеходного моста, располагающегося на проезде Энергетиков в г. Новосибирске (рис. 2, а). Геометрическая схема пролетного строения показана на рис. 2, б. Габарит пешеходной дорожки моста — 3,0 м. Каждый пролет разделен на два монтажных элемента длиной 20,25 м каждый. Пролетное строение имеет в своем составе две балки жесткости, объединенные поперечными балками, поставленными с шагом 1,5 м. Сечение балки — сварной двутавр высотой 700 и шириной 320 мм, толщина стенки — 12 мм, толщина полки — 22 мм. Пилон козловой, переменного сечения, из двух труб диаметром 426 мм толщиной стенки 10 мм. Для упрощения в программу заложено постоянное сечение пилона, принятое по его сечению в уровне середины высоты со следующими геометрическими характеристиками: площадь $A_{pl} = 261,38 \text{ см}^2$; момент инерции $I_{pl} = 3\,320\,704 \text{ см}^4$. Сечение вант из круглого проката, диаметром 36 мм. Действующие нормативные нагрузки (на одну балку): $p_1 = 9,313 \text{ кН/м}$; $p_2 = 0,422 \text{ кН/м}$; $p_f = 6,00 \text{ кН/м}$

(пешеходная нагрузка). Материал балки жесткости — сталь 15ХСНД с расчетным сопротивлением $R_y = 295$ МПа. Коэффициент условий работы к нему $m = 0,9$. Принятые коэффициенты ослабления сечения в стыках как по площади, так и по моменту сопротивления — 0,8.

Первоначальный расчет был сделан для пролетного строения, не подвергающегося регулированию усилий. При этом $\sigma_{\max,0} = 191\,821$ кПа, что меньше, чем $R_y m = 295\,000 \times 0,9 = 265\,500$ кПа. Предельный прогиб балки жесткости при заданных сечениях составляет 74,2 мм, что меньше предельно допускаемого, равного $40\,500/400 = 101,25$ мм. Таким образом, у построенного сооружения наличествуют резервы прочности и жесткости для его улучшения даже без проведения регулирования. Для поиска оптимального сочетания усилий натяжения была задана генерация ЛПт-последовательности из $2^{18} = 262\,144$ точек для шести параметров. В состав конечно-элементной схемы конструкции вошли 63 узла и 73 элемента. Время расчета на компьютере с процессором *Intel Core 2 Duo CPU* тактовой частотой 2,66 ГГц и объемом оперативной памяти 3,25 Гбайт составило около 1,5 мин. Расчет показал, что в точке T^{39585} расчетное нормальное напряжение оказалось равным $\sigma_{\max,39585} = 164\,614$ кПа. На рис. 3 показаны полученные огибающие эпюры изгибающего момента M без учета и с учетом регулирования усилий. Как видно, максимальный изгибающий момент снизился с 806 до 709 кНм, что повлекло за собой снижение расчетного нормального напряжения.

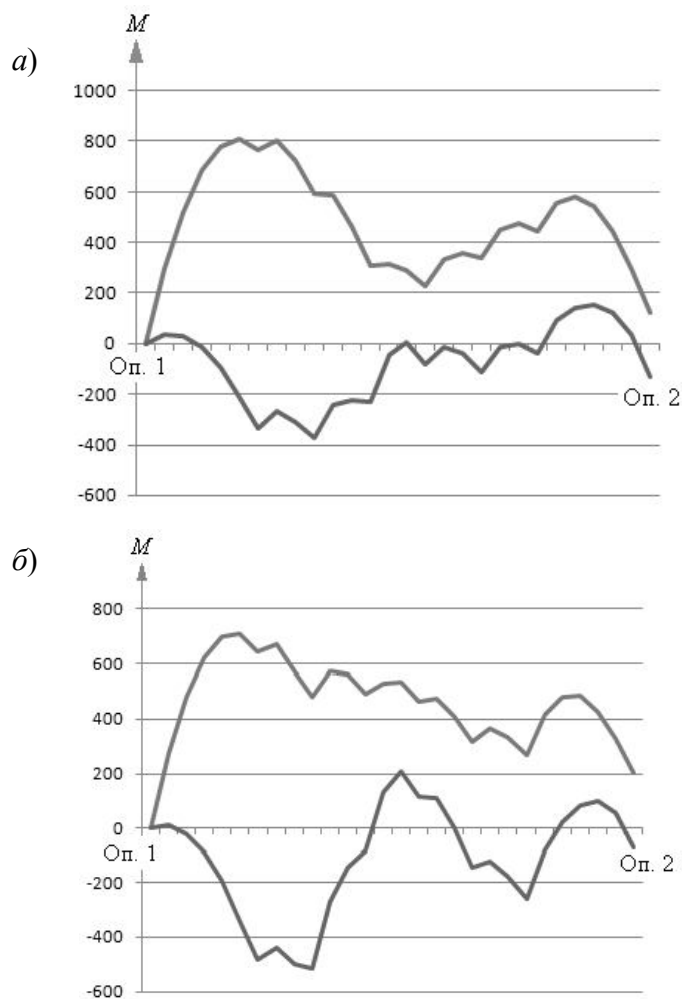


Рис. 3. Огибающие эпюры изгибающего момента в балке жесткости M , кНм:
 а — без проведения регулирования усилий; б — с регулированием усилий

Процедура регулирования усилий позволила снизить расчетные напряжения примерно на 14 %. Однако, как следует из расчетной записки к рассматриваемому сооружению, период первой формы вертикальных колебаний данного пролетного строения составляет 0,61 с, что опасно близко к верхней границе запрещенного нормами диапазона — 0,45...0,6 с, поэтому изменение жесткости балки следует производить, обращая строгое внимание на оказываемый этим изменением эффект на величину периода вертикальных колебаний.

Итак, проведенные исследования возможности реализации вышеописанного способа отыскания усилий регулирования подтвердили, что с его применением возможно добиться заметного снижения расчетных напряжений в балке жесткости относительно системы, в которой регулирование отсутствует. В то же время следует признать, что в силу наличия ограничений по жесткости и динамическим характеристикам снижение расчетных напряжений является действенной, но недостаточной мерой для всесторонней оптимизации пролетного строения по многим критериям. Таким образом, этот способ был принят как часть текущих работ по автоматизированной оптимизации вантовых пешеходных пролетных строений. Дальнейшие исследования в этой области должны быть связаны с поиском оптимального сочетания геометрической схемы и внутренних сечений элементов пролетного строения.

Библиографический список

1. Бугаев В.Я. Исследование вопросов проектирования вантово-балочных мостовых систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975. 26 с.
2. Качурин В.К., Брагин А.В., Ерунов Б.Г. Проектирование висячих и вантовых мостов / Под ред. В.К. Качурина. М.: Транспорт, 1971. 280 с.
3. Корнеев М.М. Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию. Киев, 2003. 547 с.
4. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006. 175 с.
5. СП 35.13330.2011. СНиП 2.05.03–84*. Мосты и трубы.

N.A. Kozmin. Methods of Determining Control Efforts in Cable-Stayed Beam Bridges.

The article describes analytical methods of control efforts determination of cable tension in cable-stayed bridges and their shortcomings. The proposed method of automatized choice of optimal efforts shows the lack of these shortcomings and considerably reduces calculation stresses in a stiffening girder.

Key words: *cable-stayed bridges, efforts control; optimal constructions design, PSI method.*