

Нелинейная модель механики изонатяжения вантовых конструкций

© М.С. Марченко¹, С.Б. Киселев², В.С. Горячкин¹, В.А. Кузь²,
И.А. Киселев²

¹ООО «СТС», Москва, 117405, Российская Федерация

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Рассмотрен алгоритм расчета параметров изонатяжения вант мостовых конструкций, основанный на нелинейной модели механики систем такого рода. Ванта состоит из отдельных металлических прядей, и метод изонатяжения позволяет обеспечить равное усилие между всеми прядями в ней, а также необходимое общее целевое усилие во всей ванте, соответствующее усилию из проектного расчета. С помощью используемой модели можно рассчитывать линию провисания ванты и усилия в анкерных опорах на каждом шаге натяжения прядей. При этом модель учитывает такие эффекты, как смещение точек закрепления, нелинейность поведения ванты, а также действие монтажных нагрузок на ванту. В работе предложен алгоритм решения задачи изонатяжения на основе метода конечных элементов с использованием нелинейного конечного элемента типа трос и линейного конечного элемента пружины, позволяющего учесть жесткость анкерных опор. Данный алгоритм апробировался при возведении вантового моста через реку Оку на трассе М-12 в городе Муроме. В результате расчета была получена зависимость усилия в анкерных опорах от количества прядей в ванте при последовательном их натяжении. Для оценки точности алгоритма после монтажа всех прядей было выполнено сравнение между полученным и проектным целевым усилием.

Ключевые слова: метод конечных элементов, изонатяжение, ванта, мост, анкерная опора, конечный элемент типа трос

Введение. В современной строительной практике вантовые конструкции пролетных строений мостов (рис. 1) получили широкое распространение благодаря их экономичности, архитектурной привлекательности и удобству монтажа, особенно в условиях ограниченного времени и пространства [1]. Учитывая требования к надежности подобных сооружений, точность инженерных расчетов при монтаже вантовой системы является крайне важной и актуальной задачей.

Один из наиболее ответственных этапов при возведении мостов подобного типа — монтаж вантовой системы А на рис. 1. В данной статье рассматриваются ванты, которые представляет собой пучки из параллельных семипроволочных прядей (канатов), обеспечивающих передачу нагрузки от балки жесткости Б на пилоны В (см. на рис. 1).

Согласно методу изонатяжения, процесс натяжения ванты, выполняющийся с помощью гидравлического домкрата, заключается в поочередном натяжении прядей [2]. Изонатяжение представляет

собой способ натяжения, при котором, с одной стороны, удастся достичь целевого усилия в ванте по проекту, а с другой — обеспечить равномерное распределение усилий между всеми прядями после окончания процедуры монтажа. Для реализации метода изонатяжения первую прядь во время монтажа оснащают датчиком силы, с помощью которого контролируют фактический уровень ее натяжения. После этого каждую новую прядь натягивают до состояния, когда создаваемое домкратом усилие сравнивается с величиной натяжения первой пряди.

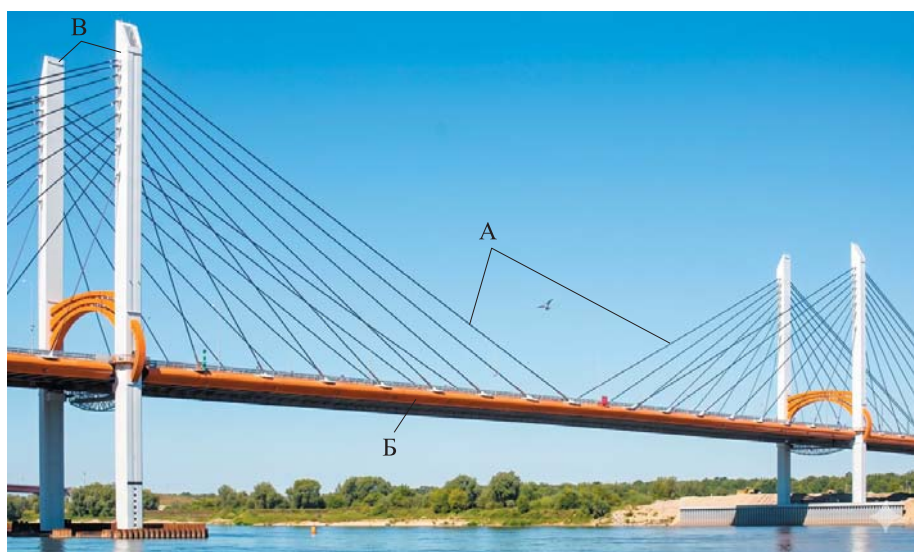


Рис. 1. Вантовый мост через реку Оку на трассе М-12 в г. Муроме

При использовании метода изонатяжения на практике требуется точный подход к определению усилия натяжения первой пряди. Вследствие конечной жесткости пилона и балки в процессе натяжения каждой новой пряди происходит смещение опор ванты. Изменение расстояния между точками крепления ванты приводит к снижению усилий в ранее смонтированных прядях. При этом описанный процесс имеет существенно нелинейный характер. Таким образом, достижение целевого состояния ванты при условии равенства усилий натяжения прядей не представляется возможным без расчетного анализа их равновесного состояния на стадии монтажа каждой из прядей.

На сегодняшний день в литературе предложено большое количество методов расчета равновесного состояния элементов типа «трос» в различных постановках, основанных на теории абсолютно гибкой нити и методе конечных элементов (МКЭ). Первые работы с использованием численных методов показали, что для анализа вантовых систем не применимы линейные стержневые и балочные конечные

элементы (КЭ). Например, авторы работы [3] отмечают, что классический линейный балочный КЭ не позволяет учесть эффект провисания троса и приводит к нефизичным результатам. В работе [4] был предложен модифицированный стержневой КЭ, учитывающий эффект провисания, для определения равновесного состояния троса. Результаты работы показали, что при решении задачи требуется учитывать большие перемещения и их нелинейную связь с силой натяжения. В работе [5] рассмотрено применение нелинейного конечного элемента типа «трос» для моделирования поведения вант. Авторы используют упрощенную математическую модель ванта, обладающую рядом недостатков и приводящую к погрешностям расчета. В частности, если в системе возникают большие горизонтальные смещения опор, модель может плохо описывать равновесное состояние. Кроме того, приведенная модель не позволяет учитывать распределенные на части длины и сосредоточенные нагрузки, которые могут действовать на ванту.

Работа [6] посвящена определению силы натяжения в вантах, обеспечивающих заданную форму пролетного строения в равновесном состоянии. В статье не рассматривается отдельно вопрос равновесной конфигурации ванта, ее геометрия принимается прямой без учета провисания, а также не обсуждается процесс монтажа и натяжения ванта. В работе [7] дается нелинейная формулировка конечного элемента ванта. В математической модели используется ряд допущений, что позволяет получить достаточно простую матрицу жесткости, но приводит к ограниченности применения такого элемента. Авторы показывают, что при небольшом провисании элемент достаточно точно описывает равновесное состояние, но в конструкциях с большим провисанием результаты теряют точность.

Конечный элемент на основе точного аналитического уравнения растяжимой цепной линии рассматривается в работе [8]. Авторы приводят алгоритм для определения равновесного состояния гибкого троса, а также формулу для матрицы касательных жесткостей. В работе результаты расчета с применением данного КЭ сравниваются с результатами, полученными другими авторами. В отличие от ранее описанных КЭ, у приведенного авторами [8] элемента нет ограничений на степень провисания ванта.

В работе [9] рассматривается конечный элемент, подобный элементу из работы [8], но с рядом модификаций, который позволяет учитывать распределенную нагрузку, приложенную не в плоскости провисания ванта, а также температурные деформации.

Приведенные выше методы решения основывались на численных итерационных процедурах, однако не теряют актуальность и аналитические методы расчета, основанные на теории абсолютно гибкой нити [10]. Эффективный инструмент для анализа равновесного состояния

ванты предложен в работе [11]. Авторами разработана методика, основанная на разложении функции формы гибкой нити и внешней нагрузки в тригонометрические ряды с последующим преобразованием дифференциального уравнения равновесия. Однако ввиду ограничения на пологость вант описанный метод не применим для задачи изонатяжения.

Обзор открытых источников показывает, что несмотря на высокую степень проработки методов анализа равновесного состояния гибкого троса, вопрос расчета параметров последовательного изонатяжения прядей вант недостаточно освещен. Задачу в такой постановке рассматривают авторы работы [2]. Для определения равновесного состояния на каждом этапе монтажа используется упрощенная модель ванты, позволяющая учитывать смещения опор и собственный вес ванты. Монтажные нагрузки в предложенном авторами подходе не учитываются.

Цель настоящей работы состоит в описании общего подхода для решения задачи изонатяжения вант в нелинейной постановке, построенного на основе МКЭ и позволяющего учесть монтажные нагрузки, большие перемещения и податливость опор.

Расчетная схема. В качестве исходных данных для расчета параметров изонатяжения используется информация о целевом состоянии: координаты точек крепления ванты $((X_N^t, Y_N^t, Z_N^t); (X_K^t, Y_K^t, Z_K^t))$ и модуле силы натяжения (T^t) в одной из опор, полученные по результатам проектного расчета. Под целевым состоянием понимается равновесное состояние ванты после натяжения всех ее прядей и снятия монтажных нагрузок (рис. 2).

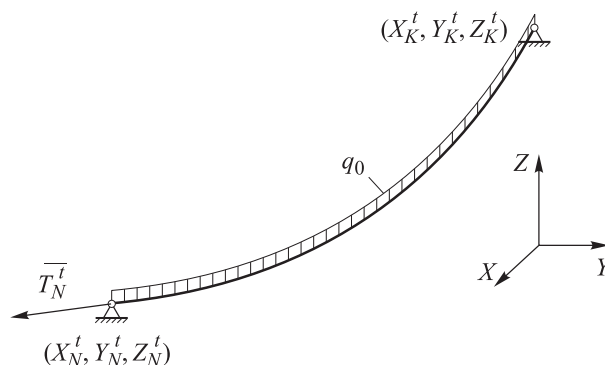


Рис. 2. Схема целевого состояния ванты

Помимо целевого состояния ванты известны монтажные нагрузки, представляющие собой систему распределенных сил (q_m^i) и сосредоточенных сил (F_m^i) , действующих в плоскости провисания прядей

в процессе натяжения, фактическое положение опор до начала установки первой пряди $((X_N^0, Y_N^0, Z_N^0); (X_K^0, Y_K^0, Z_K^0))$, и параметры прядей: модуль Юнга (E), площадь поперечного сечения (A_0) и количество прядей в ванте (n). Таким образом, общую расчетную схему задачи изонатяжения можно представить в виде, показанном на рис. 3.

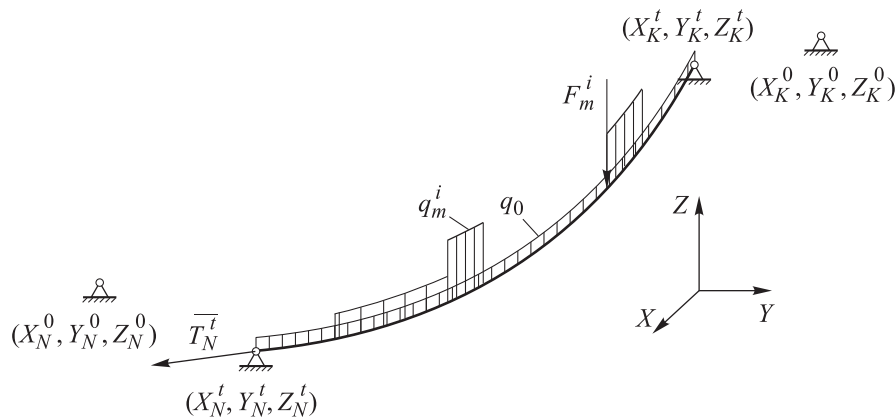


Рис. 3. Общая расчетная схема для задачи изонатяжения ванты

Описание конечного элемента. В качестве математической модели в силу необходимости учета геометрической нелинейности используется модель конечного элемента типа трос, основанная на точном аналитическом решении упругой цепной линии [8]. Согласно этой модели, КЭ типа трос представляет собой абсолютно гибкий двухузловой элемент (рис. 4), для которого [8]:

- поперечное сечение не изменяется в процессе деформирования;
- в поперечном сечении возникает только нормальная сила;
- в недеформированном состоянии элемент обладает собственной погонной массой интенсивностью q_0 . Закон сохранения массы при растяжении элемента обеспечивается за счет соответствующего изменения интенсивности q_0 .

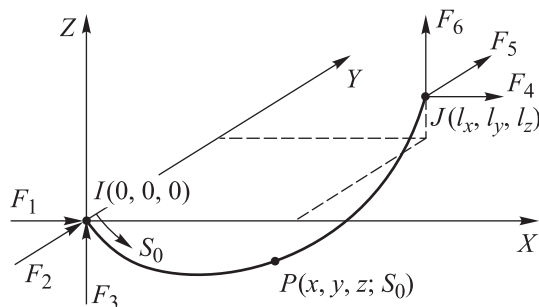


Рис. 4. Схема КЭ типа трос

Применяемая математическая модель гибкой нити позволяет свести задачу определения параметров равновесия ванты в целевом состоянии к итерационной процедуре расчета недеформированной длины прядей L_0 [8], представленных в виде одного КЭ с приведенной площадью поперечного сечения. Для организации итерационной процедуры используется варьирование вектора, содержащего компоненты реакций в опоре I (см. рис. 4) и недеформированную длину ванты, согласно соотношению [8]

$$\begin{Bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \\ \Delta F_3 \\ \Delta L_0 \end{Bmatrix} = C_c^{-1} \begin{Bmatrix} \Delta I_x \\ \Delta I_y \\ \Delta I_z \\ \Delta T_i \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь ΔF_j — приращение j -й компоненты силы в опоре « I »; ΔL_0 — невязка по недеформированной длине ванты; C_c — матрица производных, определяемая соотношением

$$C_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_x}{\partial F_1} & \frac{\partial l_x}{\partial F_2} & \frac{\partial l_x}{\partial F_3} & \frac{\partial l_x}{\partial L_0} \\ \frac{\partial l_y}{\partial F_1} & \frac{\partial l_y}{\partial F_2} & \frac{\partial l_y}{\partial F_3} & \frac{\partial l_y}{\partial L_0} \\ \frac{\partial l_z}{\partial F_1} & \frac{\partial l_z}{\partial F_2} & \frac{\partial l_z}{\partial F_3} & \frac{\partial l_z}{\partial L_0} \\ \frac{\partial T_i}{\partial F_1} & \frac{\partial T_i}{\partial F_2} & \frac{\partial T_i}{\partial F_3} & \frac{\partial T_i}{\partial L_0} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\Delta I_{x,y,z}$ — компоненты вектора невязки координат опоры J ; ΔT_i — невязка модуля силы натяжения в опоре I на i -й итерации.

Определяемая в результате расчета недеформированная длина прядей L_0 является одним из ключевых параметров предлагаемого в работе алгоритма моделирования процесса изонатяжения прядей ванты. Для обеспечения условий изонатяжения недеформированная длина всех прядей после монтажа должна быть одинаковой. Таким образом, полученное в целевом состоянии значение L_0 должно обеспечиваться на каждой стадии натяжения, начиная от первой пряди и заканчивая последней.

Учет жесткости опор. Жесткость опор в задаче изонатяжения может быть определена на основе информации о фактическом положении координат точек крепления прядей на пилоне и балке до начала монтажа и параметров, рассчитанных для целевого состояния ванты (рис. 5).

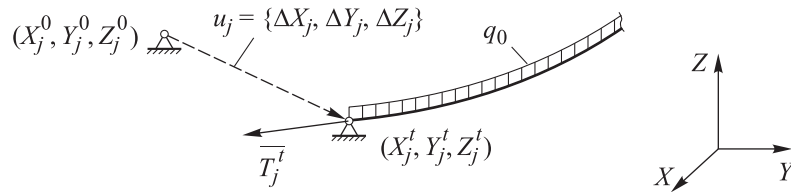


Рис. 5. Расчетная схема для определения жесткости опор ванты

Предполагая, что жесткость опор подчиняется линейному закону, ее компоненты могут быть определены согласно соотношению

$$k_x^j = \frac{T_x^j}{\Delta X_j}; \quad k_y^j = \frac{T_y^j}{\Delta Y_j}; \quad k_z^j = \frac{T_z^j}{\Delta Z_j}, \quad (3)$$

где T_x^j , T_y^j , T_z^j — компоненты вектора силы натяжения в опоре j в целевом состоянии ванты; ΔX_j , ΔY_j , ΔZ_j — изменение координаты j -го узла в результате монтажа ванты.

Учет монтажных нагрузок. В процессе натяжения прядей помимо собственного веса на ванту действуют нагрузки (см. рис. 3) от монтажных элементов (корпус девиатора, антивандальная труба и др.), что затрудняет использование метода определения равновесного состояния, описанного выше.

В этом случае решение задачи требуется проводить в две стадии:

- 1) на первой определяются параметры равновесного состояния прядей, нагруженных только собственным весом;
- 2) на второй выполняется учет монтажных нагрузок. Для этого ванта после первой стадии разбивается на несколько КЭ, узлы которых совпадают с участками приложения монтажных нагрузок (рис. 6).

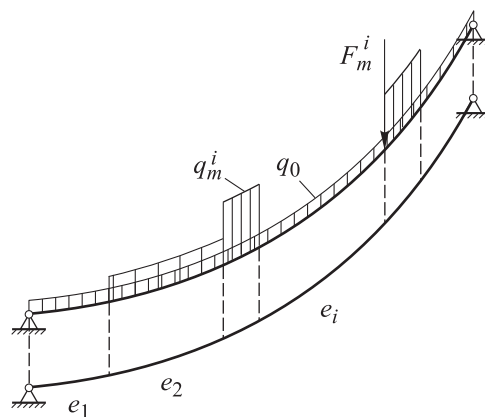


Рис. 6. Принцип разделения ванты на КЭ

Монтажная нагрузка в пределах каждого КЭ учитывается путем задания дополнительной эквивалентной погонной массы рассматриваемого участка. Решение задачи о равновесном состоянии сводится к итерационному уточнению координат точек крепления прядей и силы натяжения в одной из опор [8]. Итерационный процесс выполняется до тех пор, пока не выполнится условие

$$L_0 - L_k < \varepsilon, \quad (4)$$

где L_k — недеформированная длина прядей на k -й итерации; ε — заданная погрешность.

Следует отметить, что на приведенных стадиях расчета равновесного состояния необходимо учитывать дополнительное упругое перемещение опор под действием изменяющейся силы натяжения ванты, используя компоненты жесткости (3).

Алгоритм расчета параметров изонатяжения. Предлагаемый в настоящей работе алгоритм расчета параметров изонатяжения прядей ванты представляет собой комбинацию методов, описанных выше, и состоит из следующих этапов (рис. 7):

1) для целевого положения ванты выполняется расчет параметров равновесного состояния, по результатам которого определяется недеформированная длина прядей L_0 и неизвестные компоненты силы натяжения в опоре 2 (T_x^2, T_y^2, T_z^2);

2) на основе информации о фактических координатах точек крепления ванты до монтажа и координат в целевом состоянии, согласно соотношению (3), определяется жесткость опор;

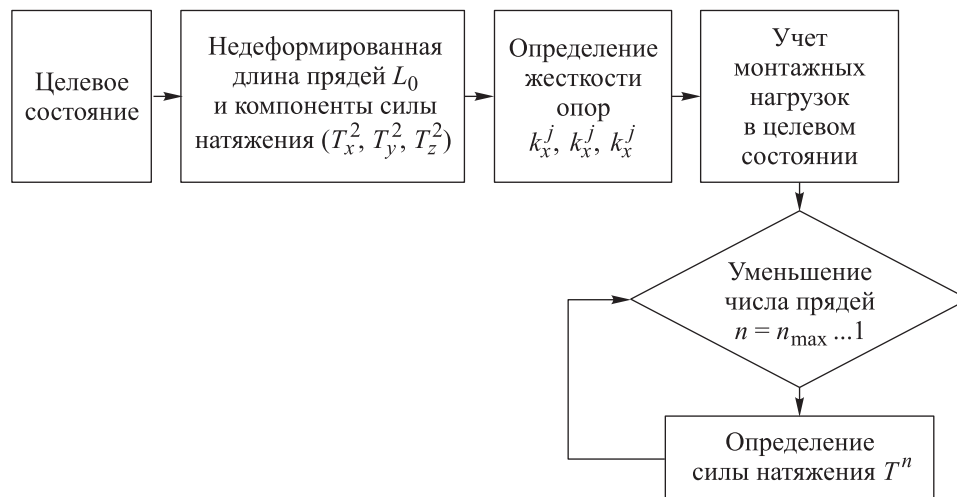


Рис. 7. Блок-схема алгоритма расчета параметров изонатяжения ванты

3) для целевого состояния ванты выполняется учет монтажных нагрузок, что соответствует состоянию системы после натяжения последней пряди. Для нового состояния выполняется расчет силы натяжения и координат опор из условия постоянства недеформированной длины прядей (см. п. 4);

4) дальнейшее решение задачи состоит в итерационном процессе уменьшения количества прядей в ванте, что эквивалентно уменьшению ее приведенной площади пропорционально промежуточному количеству прядей на текущей итерации расчета, и определению параметров равновесного состояния в новой конфигурации системы аналогично п. 3. Количество итераций определяется числом прядей в ванте.

Таким образом, приведенный алгоритм позволяет определить силу натяжения первой пряди, необходимую для достижения целевого состояния ванты при использовании метода изонатяжения.

Апробация алгоритма изонатяжения ванты. Описанный в настоящей работе алгоритм изонатяжения прошел апробацию при возведении вантового моста через реку Оку на скоростной автомобильной дороге М-12 в г. Муроме (рис. 8). В рамках сопровождения монтажа вантовой системы специалистами ООО «СТС» выполнен комплекс инженерных расчетов по определению параметров изонатяжения каждой из вант. В расчетах учтены фактические значения монтажных нагрузок и их положение по длине вант, а также фактический модуль Юнга прядей каждой из вант. Начальное положение опор каждой ванты до начала монтажа определено по результатам геодезической съемки опорных плит на балке жесткости и в пилоне.



Рис. 8. Монтаж отечественной вантовой системы ООО «СТС» (мост через реку Оку)

Вантовая система моста состоит из 34 пар вант, количество прядей в которых варьируется от 9 до 60 шт. Общее количество смонтированных и поочередно натянутых прядей — 2180 шт., а общая длина — более 198 км. Поскольку алгоритм изонатяжения является общим для всех вант, в работе подробно рассмотрены результаты расчета усилия натяжения первой пряди для одной из вант, параметры которой приведены ниже:

Модуль Юнга материала прядей E , МПа	194 800
Площадь сечения 1-й пряди до натяжения A_0 , мм ²	151,17
Количество прядей в ванте $N_{\text{прядей}}$, шт.	52
Погонный вес, Н/м	12,95
Целевое усилие (на балке жесткости), кН	4699,5

Координаты анкерных опор до и после натяжения даны в табл. 1.

Таблица 1

Координаты анкерных опор

Измерение координат	Координаты опор, м					
	первой (балки)			второй (пилона)		
	X , м	Y , м	Z , м	X , м	Y , м	Z , м
До натяжения	138125,97	327930,538	98,921	138226,464	327866,387	152,559
После натяжения	138125,93	327930,564	98,928	138226,245	327866,527	152,554

При расчете параметров изонатяжения ванты в зависимости от этапа натяжения (номера устанавливаемой пряди) учитывались следующие монтажные нагрузки (табл. 2): вантовая труба, антивандальная труба, переходная труба, верхняя и нижняя трубы девиатора, верхний и нижний хомут, погонный вес направляющей трубы. Начало и конец действия монтажных нагрузок отсчитывается от опоры ванты, расположенной на балке моста, и задаются вдоль хорды в плоскости провисания прядей.

Таблица 2

Параметры нагрузок

Монтажные нагрузки	Погонный вес, Н/м	Действие нагрузки, м	
		начало	конец
Вантовая оболочка	38,04	12,589	128,865
Антивандальная труба	482,00	13,959	18,114
Переходная труба	47,67	122,462	126,116
Верхняя труба девиатора	734,00	126,116	127,026
Нижняя труба девиатора	2217,50	12,289	14,299
Верхний хомут	527,30	128,065	128,465
Нижний хомут	527,30	12,989	13,389
Погонный вес направляющей трубы	1786,00	127,026	128,065

Результаты расчета усилий натяжения каждой пряди рассматриваемой ванты показаны на рис. 9.

Полученное значение усилия натяжения первой пряди использовалось при монтаже ванты на объекте. По результатам монтажа отличие фактического усилия натяжения прядей от проектного в целевом состоянии ванты составило не более 2 %.

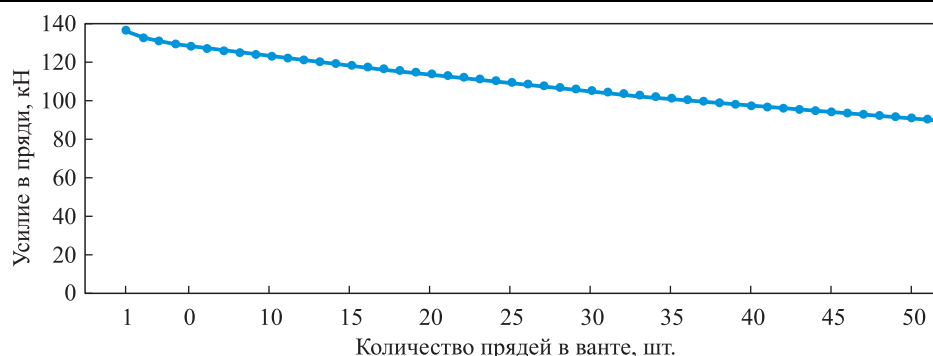


Рис. 9. Результаты расчета усилий натяжения прядей ванты

Таблица 3

**Результаты монтажа и натяжения вант
по расчетным параметрам изонатяжения**

Параметр изонатяжения	Значения фактического усилия и его отклонения ванты			
	34Л	34П	19Л	19П
Расчетное усилие натяжения первой пряди, кН	136,86	137,79	78,88	78,64
Фактическое усилие натяжения первой пряди, кН	136,09	137,3	78,83	78,56
Отклонение фактического усилия в первой пряди от проектного, %	-0,56	-0,36	-0,06	-0,1
Целевое усилие натяжения, кН	90,38	90,74	48,38	48,53
Фактическое усилие натяжения после монтажа, кН	89,24	90,33	48,68	48,4
Отклонение фактического усилия натяжения от проектного в целевом состоянии, %	-1,26	-0,45	0,62	-0,27

Дополнительно приведены фактические усилия натяжения нескольких вант (табл. 3), монтаж которых выполнен по результатам расчета параметров изонатяжения описанным в статье алгоритмом. Представленные в табл. 3 результаты показали, что приведенный алгоритм расчета параметров изонатяжения позволяет с высокой точностью определить усилие натяжения первой пряди, необходимое для достижения целевого проектного усилия натяжения всей ванты после монтажа.

Закключение. В работе приведен алгоритм расчета параметров изонатяжения вант в нелинейной постановке, построенный на основе метода конечных элементов и позволяющий учесть влияние монтажных нагрузок, больших перемещений и податливость анкерных опор на равновесное состояние прядей. Практическая ценность описанного алгоритма состоит в возможности определения усилия натяжения

первой пряди, обеспечивающего достижение заданного целевого усилия в ванте после монтажа. Для подтверждения корректности работы алгоритма проведена его экспериментальная апробация при монтаже вантовой системы на мосту через реку Оку на трассе М-12 в г. Муроме. Рассчитанные с помощью алгоритма усилия натяжения первых прядей вант позволили достичь требуемого результата с погрешностью не более 2 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Разживина А.Э., Соболева А.Н. Мостовые сооружения вантового типа. *Alfabuild*, 2018, № 3, с. 76–85.
- [2] Spasojević Šurdilović M., Živković S., Turnić D. Algorithms for Computer-Based Calculation of Individual Strand Tensioning in the Stay Cables of Cable-Stayed Bridges. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14 (13), p. 5410.
- [3] Freire A. M. S., Negrao J. H. O., Lopes A. V. Geometrical nonlinearities on the static analysis of highly flexible steel cable-stayed bridges. *Computers & Structures*, 2006, vol. 84 (31-32), pp. 2128–2140.
- [4] Ernst H. Der E-modul von seilen unter bercksichtigung des durchhanges. *Bauingenieur*, 1965, Bd. 40.
- [5] Wang P.H., Tseng T.C., Yang C.G. Initial shape of cable-stayed bridges. *Computers & Structures*, 1993, vol. 47 (1), pp. 111–123.
- [6] Chen D. W., Au F.T.K., Tham L.G., Lee P.K.K. Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method. *Computers & Structures*, 2000, vol. 74 (1), pp. 1–9.
- [7] Chunjiang W., Renpeng W., Shilin D., Ruojun Q. A new catenary cable element. *International Journal of Space Structures*, 2003, vol. 18 (4), pp. 269–275.
- [8] Coarita E., Flores L. Nonlinear analysis of structures cable-truss. *International Journal of Engineering and technology*, 2015, vol. 7 (3), pp. 160–169.
- [9] Abad M.S.A., Shooshtari A., Riabi A., Esmaeili V. Nonlinear analysis of cable structures under general loadings. *Finite elements in analysis and design*, 2013, vol. 73 (1), pp. 11–19.
- [10] Меркин Д. Р. *Введение в механику гибкой нити*. Москва, Наука, 1980, 240 с.
- [11] Чесноков А.В., Михайлов В.В. Усовершенствованная методика расчета гибких вант. *Вестник МГСУ*, 2024, №. 7, с. 1091–1103.

Статья поступила в редакцию 20.02.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Марченко М.С., Киселев С.Б., Горячкин В.С., Куць В.А., Киселев И.А. Нелинейная модель механики изонатяжения вантовых конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 6. EDN XPBPJG

Марченко Максим Сергеевич — технический директор ООО «СТС».
e-mail: marchenko@sts-hydro.ru

Киселев Сергей Борисович — аспирант кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: kiselevsb@student.bmstu.ru

Горячкин Владислав Сергеевич — руководитель отдела инженерных расчетов и исследований ООО «СТС». e-mail: goryachkin@sts-hydro.ru

Кузь Владимир Андреевич — старший преподаватель кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: vladimirkuts@bmstu.ru

Киселев Игорь Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: i.a.kiselev@bmstu.ru

Nonlinear Mechanics Model of Isotension in Cable Structures

© M.S. Marchenko¹, S.B. Kiselev², V.S. Goryachkin¹, V. A. Kuts²,
I. A. Kiselev²

¹STS Ltd., Moscow, 117405, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The paper presents an algorithm for calculating the isotension parameters of bridge cables based on a nonlinear model of the mechanics of such systems. A cable consists of separate metal strands, and the isotension method ensures equal force between all strands in the cable, as well as the required total target force throughout the cable, corresponding to the force from the design calculation. The model used calculates the cable sag line and the forces in the anchor supports at each strand tension increment. The model takes into account such effects as the displacement of anchor points, nonlinear behavior of the cable, and the effect of mounting loads on the cable. The paper proposes an algorithm for solving the isotension problem based on the finite element method, employing a nonlinear cable-type finite element and a linear spring finite element, which accounts for the stiffness of the anchor supports. This algorithm was tested during the construction of a cable-stayed bridge across the Oka River on the M-12 highway in Murom. The calculation resulted in a relationship between the force in the anchor supports and the number of strands in the cable stays during their sequential tensioning. To assess the algorithm's accuracy, a comparison was made between the obtained and the designed target force after all strands had been installed.

Keywords: Finite element method, isotension, cable, bridge, anchor support, cable-type finite element

REFERENCES

- [1] Razzhivina A.E., Soboleva A.N. Mostovye sooruzheniya vantovogo tipa [Cable-stayed bridge structures]. *Alfabuild*, 2018, no. 3, pp. 76–85.
- [2] Spasojević Šurdilović M., Živković S., Turnić D. Algorithms for Computer-Based Calculation of Individual Strand Tensioning in the Stay Cables of Cable-Stayed Bridges. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14 (13), p. 5410.
- [3] Freire A.M.S., Negrao J.H.O., Lopes A.V. Geometrical nonlinearities on the static analysis of highly flexible steel cable-stayed bridges. *Computers & Structures*, 2006, vol. 84 (31–32), pp. 2128–2140.
- [4] Ernst H. Der E-modul von Seilen unter Berücksichtigung des Durchhanges. *Bauingenieur*, 1965, Bd. 40.
- [5] Wang P.H., Tseng T.C., Yang C.G. Initial shape of cable-stayed bridges. *Computers & Structures*, 1993, vol. 47 (1), pp. 111–123.
- [6] Chen D.W., Au F.T.K., Tham L.G., Lee P.K.K. Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method. *Computers & Structures*, 2000, vol. 74 (1), pp. 1–9.
- [7] Chunjiang W., Renpeng W., Shilin D., Ruojun Q. A new catenary cable element. *International Journal of Space Structures*, 2003, vol. 18 (4), pp. 269–275.
- [8] Coarita E., Flores L. Nonlinear analysis of structures cable-truss. *International Journal of Engineering and Technology*, 2015, vol. 7 (3), pp. 160–169.

- [9] Abad M.S.A., Shooshtari A., Riabi A., Esmaeili V. Nonlinear analysis of cable structures under general loadings. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2013, vol. 73 (1), pp. 11–19.
- [10] Merkin D.R. *Vvedenie v mekhaniku gibkoi niti* [Introduction to the mechanics of a flexible string]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 240 p.
- [11] Chesnokov A.V., Mikhailov V.V. Uovershenstvovannaya metodika rascheta gibkikh vant [Improved method for calculation of flexible stays]. *Vestnik MGSU*, 2024, no. 7, pp. 1091–1103.

Marchenko M.S., Technical Director of STS LLC. e-mail: marchenko@sts-hydro.ru

Kiselev S.B., Postgraduate student, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: kiselevsb@student.bmstu.ru

Goryachkin V.S., Head of Engineering Calculations and Research Department, STS LLC. e-mail: goryachkin@sts-hydro.ru

Kuts V.A., Senior Lecturer, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: vladimirkuts@bmstu.ru

Kiselev I.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: i.a.kiselev@bmstu.ru