УДК 624.04: 519.6

А. В. Игнатьев[а], С. А. Калиновский[б], М. И. Бочков[а], И. С. Завьялов[а]

[а] Волгоградский государственный технический университет
[б] Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НИТИ С УЧЕТОМ ЕЕ ФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Рассматривается задача расчета нити, закрепленной на двух опорах, находящихся на одинаковой высоте, при действии на нее системы сосредоточенных нагрузок, приложенных в точках пролета, расположенных через одинаковые интервалы. При этом учитывается растяжение нити. Для расчета используется разработанный авторами нелинейный конечный элемент нити со смешанными неизвестными. Элемент разработан в рамках развиваемого авторами метода конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики. Расчет выполнен с учетом нелинейной работы нити при различных значениях удлинения нити — припуска. Построены графики зависимости распоров и усилий в нити от припуска, которые могут быть применены инженерами-проектировщиками для обоснования параметров нити.

К л ю ч е в ы е с л о в а: нагруженная сосредоточенными силами нить, стрела провисания, величина припуска, распор, растягивающие усилия, соотношение стрелы провисания и припуска, зависимость припуска от внутренних усилий.

Введение

Расчет нитей имеет важное значение для различных областей проектирования. Нити используются во многих конструкциях, в виде простых веревок и тросов или в виде сложных канатов и стальных тросов [1—3], которые применяются в мостах, канатных дорогах и других сооружениях. Понимание поведения растяжимых нитей при различных нагрузках необходимо для обеспечения безопасности и надежности вантовых конструкций, линий электропередач и других инженерных сооружений, включающих подобные конструктивные элементы [4—6]. Вантовые конструкции применяются в строительстве сооружений различного класса [7—10], а методы их расчета применяются и в других областях конструирования [11].

Развитие нелинейных методов строительной механики [12] является актуальной задачей строительной науки. Учет нелинейности позволяет решать задачи строительной механики в более общем смысле — описать напряженно-деформированное состояние конструкции на разных этапах ее жизненного цикла, что позволит, с одной стороны, сделать возможным проектирование более сложных инженерных сооружений, а с другой — оптимизировать конструкции сооружений, распространенные в проектной практике. Существует значительное количество публикаций, посвященных нелинейному расчету строительных конструкций, основанных на различных методах и подходах [13—18].

Необходимость и значение учета растяжимости конструкций напрямую связаны с разработкой новых материалов, из которых разрабатываются строительные конструкции. Гибкие нити из современных композитных материалов играют значительную роль в современной инженерии и строительстве,

предоставляя широкий спектр возможностей для разработки инновационных архитектурно-конструктивных решений. Материалы данного типа, включая углеволокно и армированные полимеры, обладают высокой прочностью, упругостью и гибкостью, что делает их идеальными для применения в различных инженерных задачах.

Благодаря своей высокой гибкости нити из современных материалов позволяют создавать сложные формы и структуры, что открывает широкие возможности для инновационного проектирования архитектурных объектов [19, 20]. Кроме того, они обладают высокой стойкостью к различным агрессивным воздействиям, таким как влажность, химические агенты и экстремальные температуры, что делает их надежным и долговечным материалом для использования в строительстве.

Таким образом, гибкие нити из современных материалов являются важным инженерным компонентом современного строительства, способствуя развитию устойчивых, инновационных и функциональных конструкций и сооружений [21], а методы, разработанные в процессе этих исследований, могут также применяться к расчету специфических инженерных сооружений, вроде ЛЭП [22]. Или, например, самые большепролетные мосты в мире имеют подвесную конструктивную схему, одним из главных элементов которой является криволинейная нить, называемая кабелем. Именно расчету кабеля подвесного моста в наибольшей степени соответствует решаемая в настоящей работе задача.

Для расчета нитей используют численное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и аналитические методы. В нашей работе к решению таких задач применен модифицированный метод конечных элементов в форме классического смешанного метода [23—25], а также разложение нагрузки в тригонометрический ряд [26], что позволяет учесть нелинейность в поведении материала и получить аналитическое решение для задачи о растяжении нити.

Особенностью МКЭ в форме классического смешанного метода является наличие двух групп разрешающих уравнений: равенства усилий в узлах и неразрывности деформаций. В связи с чем в уже обозначенные уравнения входят как неизвестные перемещения, так и усилия, возникающие в узлах. Параметры, определяющие характер нелинейной работы материала, не требуется вычислять дополнительно, что дает ряд преимуществ при решении задач с помощью алгоритмов, обозначенных в статьях [25, 26] и других работах, посвященных этому методу.

Методы

В качестве объекта исследования в данной статье выбрана нить с неподвижными опорами, установленными на одном уровне, загруженная симметрично сосредоточенными силам (рис. 1).

На рис. 1 используются следующие обозначения: l — длина перекрываемого пролета, l' — длина нити с припуском, но без учета растяжения, тогда l'' — длина растянутой нити, d — горизонтальные расстояния между точками приложения сил (межузловые расстояния). Несомненно, что нить также дополнительно загружена и распределенной нагрузкой (собственный вес). Но для упрощения расчетной схемы распределенную нагрузку придется условно заменить на систему сосредоточенных сил. При расстановке узлов дискрет-

ного приложения нагрузки с фиксированным шагом d по горизонтали на каждый узел по одну сторону от оси симметрии пролета будет действовать различная нагрузка.

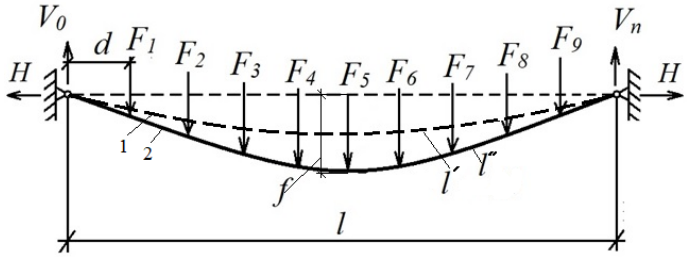

Рис. 1. Расчетная схема растянутой нити

Величина такой сосредоточенной силы Q_i будет составлять:

$$Q_i = q\left(\frac{\sqrt{\left(f_{i-1}-f_i\right)^2+d^2}+\sqrt{\left(f_i-f_{i+1}\right)^2+d^2}}{2}\right), \quad (1)$$

где q — интенсивность равномерно распределенной нагрузки; f_{i-1}, f_i и f_{i+1} — стрела провисания нити в $i-1$, i и $i+1$ узлах соответственно.

Значения сил Q_i прибавляются в соответствующих узлах к значениям сосредоточенных сил, действующих на кабель от вертикальных подвесок. Исправленные на величины Q_i силы F_i могут быть записаны в виде дискретного тригонометрического ряда:

$$F_i = \sum_{i=1}^{n-1} F_k \sin\frac{k\pi i}{n}. \quad (2)$$

Коэффициенты разложения F_k определяются также разложением в дискретный тригонометрический ряд по синусам:

$$F_k = \frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n-1} F_i \sin\frac{k\pi i}{n}. \quad (3)$$

Узловые смещения f_i, которые приобретает нить при отсутствии растяжения и смещения растянутой нити f'_i, также можно представить в виде разложения в дискретный тригонометрический ряд по синусам [26]. Провисание нерастянутой нити в любой точке определяется согласно выражению

$$f_i = \frac{M_i^b}{H}. \quad (4)$$

Тогда провисание растянутой нити определяется выражением

$$f'_i = \frac{M_i^b}{H'}, \quad (5)$$

где M_i^b — так называемый балочный момент; H' — распор, который в данном случае является постоянным; f_i' и H' — провисание растянутой нити и распор после растяжения соответственно.

Значение балочного изгибающего момента может быть выражено также в виде дискретного тригонометрического ряда:

$$M_i = \sum_{k=0}^{n-1} F_k \frac{d}{4\sin^2 \frac{k\pi}{2n}} \sin \frac{k\pi i}{n}. \tag{6}$$

Таким образом, провисание нерастяжимой и растяжимой нити можно представить соответственно как

$$f_i = \frac{1}{H} \sum_{k=0}^{n-1} F_k \frac{d}{4\sin^2 \frac{k\pi}{2n}} \sin \frac{k\pi i}{n}, \tag{7}$$

и

$$f_i' = \frac{1}{H'} \sum_{k=0}^{n-1} F_k \frac{d}{4\sin^2 \frac{k\pi}{2n}} \sin \frac{k\pi i}{n}. \tag{8}$$

Обозначим за $\Delta l''_{i;i-1}$ разницу длин растянутой и нерастяжимой нитей на каждом участке:

$$\Delta l''_{i;i-1} = l''_{i;i-1} - l'_{i;i-1}, \tag{9}$$

где $l''_{i;i-1}$ — длина участка нити при ее растяжении.

Одновременно

$$\Delta l''_{i;i-1} = \frac{N_{i;i-1} l'_{i;i-1}}{EA}, \tag{10}$$

где $N_{i;\,i-1}$ — величина продольного растягивающего усилия на рассматриваемом участке нити; E — модуль упругости материала; A — площадь поперечного сечения.

Тогда припуск для растяжимой нити на каждом участке

$$\Delta l'_{i;i-1} = \Delta l_{i;i-1} + \Delta l''_{i;i-1} \tag{11}$$

или, при подстановке (10) в (11),

$$\Delta l'_{i;i-1} = \Delta l_{i;i-1} + \frac{N_{i;i-1} l'_{i;i-1}}{EA}. \tag{12}$$

Длина участка:

$$l'_{i;i-1} = \sqrt{\left(f_i - f_{i-1}\right)^2 + d^2}. \tag{13}$$

Тогда, согласно (12) и (6),

$$\Delta l' = \Delta l + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} N_{i;i-1}\sqrt{\left(f_i - f_{i-1}\right)^2 + d^2}}{EA} = \Delta l + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} N_{i;i-1}\sqrt{\frac{\left(M_i - M_{i-1}\right)^2}{H^2} + d^2}}{EA}$$

или

$$\Delta l' = \Delta l + d\sum_{i=1}^{n-1}\frac{N_{i;i-1}}{EA}\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n-1} F_k^2\left(\sin\frac{k\pi i}{n} - \sin\frac{k\pi(i-1)}{n}\right)^2}{16H^2\sin^4\frac{k\pi}{2n}} + 1}. \quad (14)$$

Определим величину распора в растянутом состоянии.

Длину участка растянутой нити можно выразить следующим образом:

$$l''_{i;i-1} = \sqrt{\left(f_i' - f'_{i-1}\right)^2 + d^2}. \quad (15)$$

Посредством подстановки (10), (13) и (15) в (9) можно выразить распор растянутой нити через внутренние усилия и распор в нерастяжимой нити:

$$\frac{N_{i;i-1}\sqrt{\left(f_i - f_{i-1}\right)^2 + d^2}}{EA} = \sqrt{\left(f_i' - f'_{i-1}\right)^2 + d^2} - \sqrt{\left(f_i - f_{i-1}\right)^2 + d^2};$$

$$\sqrt{\left(f_i' - f'_{i-1}\right)^2 + d^2} = \sqrt{\left(f_i - f_{i-1}\right)^2 + d^2}\left(1 + \frac{N_{i;i-1}l'_{i;i-1}}{EA}\right);$$

$$\left(f_i' - f'_{i-1}\right)^2 = \left(\left(f_i - f_{i-1}\right)^2 + d^2\right)\left(1 + \frac{N_{i;i-1}l'_{i;i-1}}{EA}\right)^2 - d^2.$$

Согласно (4)—(8), имеем следующее:

$$\frac{\left(M_i - M_{i-1}\right)^2}{H'^2} = \left(\frac{\left(M_i - M_{i-1}\right)^2}{H^2} + d^2\right)\left(1 + \frac{N_{i;i-1}}{EA}\right)^2 - d^2;$$

$$H' = \sum_{i=1}^{n}\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n-1} F_k^2\frac{\left(\sin\frac{k\pi i}{n} - \sin\frac{k\pi(i-1)}{n}\right)^2}{16\sin^4\frac{k\pi}{2n}}}{\left(\frac{\sum_{k=1}^{n-1} F_k^2\left(\sin\frac{k\pi i}{n} - \sin\frac{k\pi(i-1)}{n}\right)^2}{16H^2\sin^4\frac{k\pi}{2n}} + 1\right)\left(1 + \frac{N_{i;i-1}}{EA}\right)^2 - 1}}. \quad (16)$$

С приложением нагрузки к нити и ее растяжением изменяется площадь поперечного сечения. Причем изменяется неравномерно. Ввиду постоянства объема материала, который можно определить как произведение текущей длины участка нити и площади его поперечного сечения, площадь поперечного сечения на каждом участке нити составит

$$A'_{i;i-1} = \frac{A_{i;i-1}\left(d + \Delta l_{i;i-1}\right)}{d + \Delta l_{i;i-1} + \Delta l''_{i;i-1}}. \quad (17)$$

Результаты и обсуждения

Выполнен численный расчет нити из стального каната, закрепленной на двух опорах, со следующими упругими и геометрическими параметрами: пролет l = 100 м; диаметр каната Ø76 мм, погонный вес q = 0,198 кН. Нить разбивается узлами на n = 10 равных участков, длиной d = 10 м.

В табл. 1 представлены результаты расчета распора нити при величине припуска Δl = 15 м без учета разницы длин межузловых участков. Подобный расчет для данной нити произведен также для значений припуска Δl = 1; 3; 5; 10; 20; 25; 30; 35; 40 м. Рассматривались и другие нити.

Произведем сравнение нелинейного расчета с произведенным ранее линейным.

Таблица 1

Удлинения участков нити, провисания ее узлов и растягивающие усилия при величине припуска Δl = 15 м

i	F_i, кН	k	$\Delta l'_i$	f'_i	N_i
				0	
1	102,54358	1	2,83536	9,01835	684,76329
2	102,31896	2	2,33935	16,05363	621,75449
3	102,14288	3	1,54456	21,09094	569,39007
4	102,02941	4	0,69085	24,1184	531,31063
5	101,99007	5	0,08997	25,12843	511,10465
6	102,02941	6	0,08997	24,1184	511,10465
7	102,14288	7	0,69085	21,09094	531,31063
8	102,31896	8	1,54456	16,05363	569,39007
9	102,54358	9	2,33935	9,01835	621,75449
10			2,83536	0	684,76329

Таким образом, в результате нелинейного расчета была сформирована таблица соотношений геометрических характеристик загруженной нагрузки нити и возникающих в ней усилий для разных значений припуска нити (табл. 2). Полученные результаты были обработаны в виде графиков (рис. 2—4), на которых в то же время полученные значения были аппроксимированы с достаточно достоверной точностью.

Таблица 2

Значения стрелы провисания f_{max}, распора H и максимальных растягивающих усилий N_{max} для различных значений припуска Δl

Δl, м	f'_{max}, м	H', кН	N_{max}, кН
1	6,18527	2062,46908	2112,97726
3	10,79112	1182,44708	1268,092
5	14,02675	909,90017	1018,73554
10	20,18182	632,77403	781,34627
15	25,12843	508,5152	684,76329
20	29,47782	433,7471	631,40136
25	33,46113	382,34536	597,44423
30	37,19425	344,18101	573,96397
35	40,74452	314,38472	556,80878
40	44,15489	290,28279	543,77215

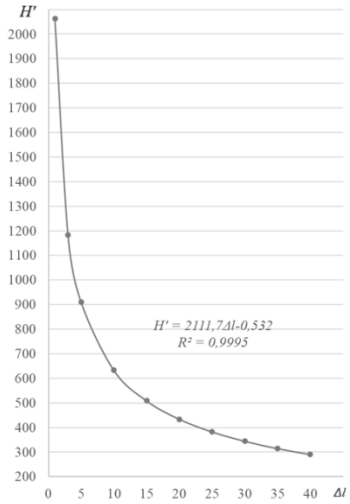

Рис. 2. График зависимости распора от припуска для стального каната

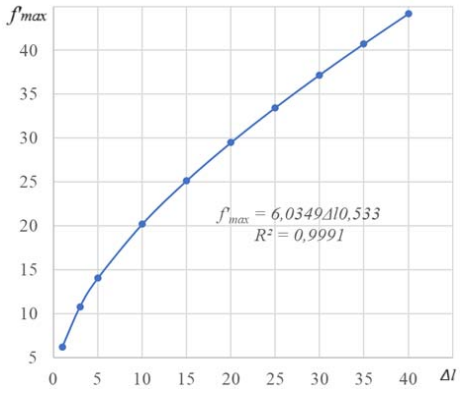

Рис. 3. График зависимости стрелы провисания от припуска для стального каната

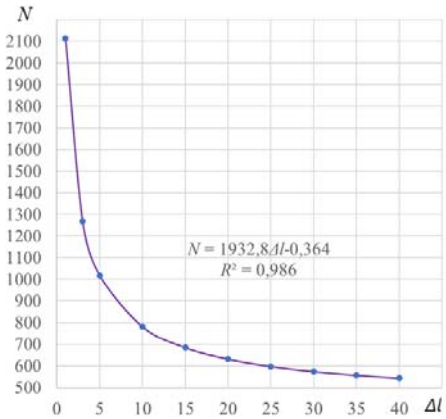

Рис. 4. График зависимости растягивающих усилий от припуска для стального каната

В данном случае видим незначительную разницу по сравнению с ранее произведенными нами результатами расчета, проведенного в предположении, что нить является нерастяжимой [26]. Однако в случае если уменьшить модуль деформации, то отличия окажутся весьма значительными. Ниже проведен расчет для нити с аналогичными прочими параметрами при условии, что модуль упругости составляет 100 МПа, что характерно для резин. В табл. 3 и 4 представлены результаты расчета нити с теми же геометрическими параметрами, выполненной из материала, модуль упругости которого $E = 100$ МПа. На рис. 5—7 аналогично представлены графики зависимости величин распора от припуска, стрелы провисания от припуска и максимальных растягивающих усилий от припуска.

Таблица 3

Удлинения участков нити, провисания ее узлов и растягивающие усилия при величине припуска $\Delta l = 15$ м

i	F_i, кН	k	$\Delta l'_i$	f'_i	N_i
				0	
1	102,5558	1	2,89711	9,20615	680,25011
2	102,32662	2	2,39121	16,38799	616,77692
3	102,1467	3	1,57988	21,53024	563,94657
4	102,0306	4	0,70725	24,62081	525,46939
5	101,99032	5	0,09216	25,65187	505,02778
6	102,0306	6	0,09216	24,6208	505,02778
7	102,1467	7	0,70725	21,53024	525,46939
8	102,32662	8	1,57988	16,38799	563,94657
9	102,5558	9	2,39121	9,20615	616,77692
10			2,89711	0	680,25011

Аналогично предыдущему, в результате нелинейного расчета была сформирована таблица соотношений геометрических характеристик загруженной нагрузки нити и возникающих в ней усилий для разных значений припуска нити (табл. 4). Полученные результаты были обработаны в виде графиков (рис. 5—7), на которых в то же время полученные значения были аппроксимированы с достаточно достоверной точностью.

Таблица 4

Значения стрелы провисания f_{max}, распора H и максимальных растягивающих усилий N_{max} для различных значений припуска Δl

Δl, м	f'_{max}, м	H', кН	N_{max}, кН
1	9,26646	1376,8043	1604,79766
3	12,35177	1033,1144	1174,0891
5	15,1058	844,95109	981,19315
10	20,84721	612,60517	771,36695
15	25,65187	498,15878	680,25011
20	29,93403	427,15284	628,83535
25	33,87931	377,6399	595,78647
30	37,59055	340,56485	572,8022
35	41,12787	311,46565	555,94754
40	44,53091	287,84212	543,10701

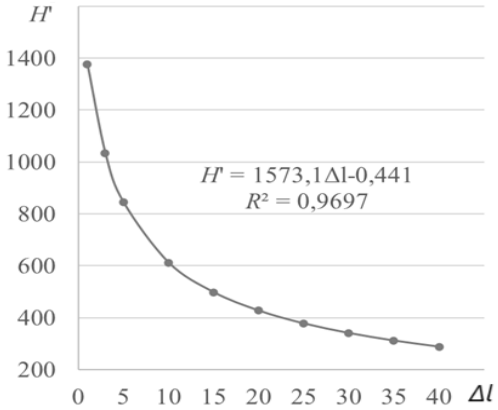

Рис. 5. График зависимости распора от припуска для полимерной нити

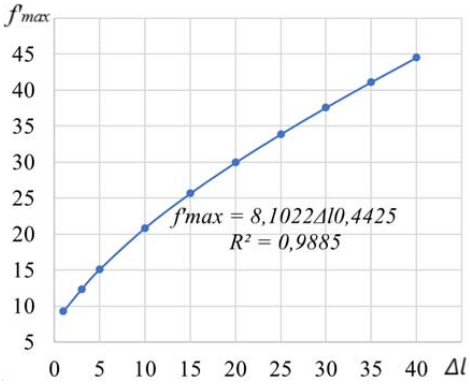

Рис. 6. График зависимости стрелы провисания от припуска для полимерной нити

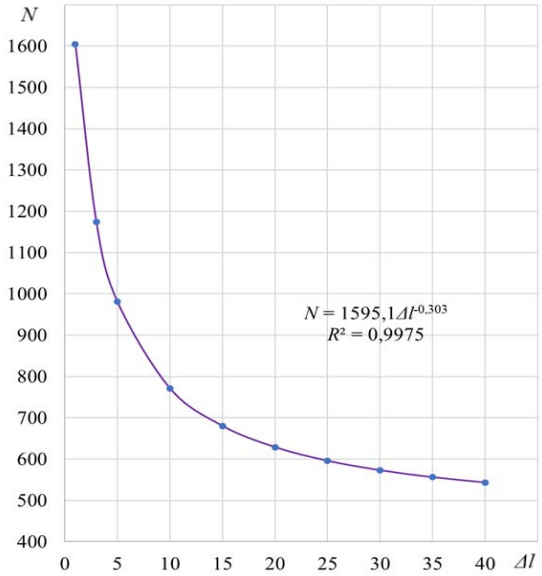

Рис. 7. График зависимости растягивающих усилий от припуска
для полимерной нити

Дополнительно можно отметить, что в ряде работ различных авторов расчеты производятся исходя из заданной величины стрелы провисания [26]. В наших расчетах показана зависимость стрелы провисания от припуска. Для нити, загруженной равномерно-распределенной нагрузкой, установить ее полную длину с достаточной точностью можно используя, например, выражения, предложенные в работе [27]. Наш метод позволяет соотнести эти геометрические параметры для нити, загруженной также и сосредоточенными силами.

Заключение

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Разработан алгоритм расчета гибких вантовых систем на узловую нагрузку, основанный на положениях метода конечных элементов в форме классического смешанного метода и метода обобщенных неизвестных. Алгоритм совмещает учет геометрической и физической нелинейности процессов, протекающих в вантовых системах.

2. Подтверждена нецелесообразность применения учета растяжения для расчета нитей, выполняемых из материалов, обладающих высокой жесткостью, рост напряжений для стальной нити в линейной и нелинейной постановке не превышает 1 %.

3. Составлены зависимости, описывающие соотношения между величиной возникающего распора, максимальных растягивающих усилий и стрелы провисания для различных значений припуска. Полученные соотношения могут использоваться в реальном проектировании гибких нитей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кривошапко С. Н.* Вантовые структуры // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 1. URL: https://journals.rudn.ru/structural-mechanics/issue/view/683.

2. *Wai-Fah Chen, Lian Duan.* Bridge engineering handbook. 2nd ed. Fundamentals. CRC Press, 2014. 574 p.

3. *Перельмутер А. В.* Основы расчета вантово-стержневых систем. М. : Стройиздат, 1969. 190 с.

4. *Kara H., Bosia D.* Design engineering refocused (AD Smart). USA : John Wiley & Sons, 2016. 82 p.

5. *Orton A*. The way we build now. UK : Taylor & Francis, 2013. Pp. 94—95.

6. *Кужахметова Э. Р.* Методы расчета вант и вантовых конструкций // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. 2019. № 2. С. 39—48. DOI: 10.12737/article_5c73fc07ba7858.43737360.

7. *Cai J., Feng J., Jiang Ch.* Development and analysis of a long-span retractable roof structure // Journal of Constructional Steel Research. 2014. No. 92. Pp. 175—182.

8. *Тарасов Д. А., Семенов Д. Ю.* Математическое моделирование напряженно-деформируемого состояния гибких нитей с учетом физической нелинейности // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 3(23). С. 175—185.

9. *Пантелеева В. С.* Особенности строительства и конструкции Акаси-Кайке // Молодой ученый. 2020. № 22(312). С. 173—174. URL: https://moluch.ru/archive/312/70790.

10. *Ситников И. Р., Голиков А. В.* Регулирование усилий в большепролетных конструкциях при разработке рациональной конструктивной формы здания дельфинария в Волгограде // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 4. С. 278—292. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-278-292.

11. *Корнев В. А.* Аналитический расчет напорных рукавов методом гибкой нити // Проблемы современной науки и образования. 2016. № 30(72). С. 22—26.

12. *Ladevèze P.* Nonlinear computational structural mechanics. Springer Science & Business Media, 2012. 230 p.

13. Stress-strain state of elastic shell based on mixed finite element / Yu. V. Klochkov, V. A. Pshenichkina, A. P. Nikolaev, O. V. Vakhnina, M. Yu. Klochkov // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 4(120). Pp. 34—47. DOI: 10.34910/MCE.120.3.

14. Physically nonlinear shell deformation based on three-dimensional finite elements / Yu. V. Klochkov, A. P. Nikolaev, O. V. Vakhnina, T. A. Sobolevskaya, M. Yu. Klochkov // Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 5(113). Pp. 159—170. DOI: 10.34910/MCE.113.14.

15. *Lukashevich A. A.* Finite element models based on the approximation of discontinuous stress fields // Magazine of Civil Engineering. 2022. Vol. 110(2). Art. no. 11004. DOI: 10.34910/MCE.110.4.

16. *Кущ В. А., Ященко В. П.* Учет физической нелинейности при расчете плоской железобетонной рамы с использованием вычислительного комплекса SCAD // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 1. С. 38—47.

17. *Красноруцкий Д. А.* Методика расчета механики систем связанных тонких упругих стержней по дифференциальной модели // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. 2016. № 2. С. 69—88. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.06.

18. *Таранеуха Н. А., Жеребко К. В., Петров М. Р.* Математическая модель шарнирной стержневой системы с большими перемещениями узлов // Изв. высш. учеб. заведений. Стр-во. 2003. № 3. С. 12—18.

19. *Eremeev P. G., Vedyakov I. I., Zvezdov A. I.* Suspension large span roofs structures in Russia // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Iss. 2. Pp. 34—42. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41. EDN: NBSNNA.

20. *Бузало Н. А., Пономарев Р. Р., Смирнов В. А.* Деформационный расчет вантовых конструкций покрытий спортивных сооружений // Жилищное строительство. 2022. № 10. С. 46—49. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-10-46-49. EDN: RYGVJA.

21. *Гузеев Р. Н., Копров Р. О.* Свободные нелинейные колебания ванты с внешним демпфером // Вестн. гражданских инженеров. 2020. № 4(81). С. 100—105. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-100-105. EDN: YLHSHR.

22. *Valiullin A. A., Danilin A. N., Feldshteyn V. A.* Normal vibrations of sagging conductors of overhead power lines // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. Iss. 3. Pp. 147—158. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-3-147-158. EDN: GRTLUR.

23. *Ignatyev A. V., Ignatyev V. A.* Specific features and advantages of the finite element method in the form of classical mixed method as an alternative for the traditional finite element method // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2014. Vol. 10. Iss. 4. Pp. 121—124.

24. *Игнатьев В. А., Игнатьев А. В.* Метод конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики (теория, математические модели и алгоритмы). М. : АСВ, 2022. 306 с.

25. *Bochkov M. I., Ignatyev V. A.* Development of single-node finite elements for the calculation of systems with unilateral constraints by FEM in the form of the classical mixed method // Proceedings of the 7th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS-2023), Sochi, Sept., 10—16, 2023. Springer Cham : Springer Cham, 2024. Pp. 222—231. EDN: DXJOTV.

26. *Игнатьев В. А., Игнатьев А. В., Калиновский С. А.* Расчет внутренних усилий и геометрических параметров нити, загруженной в равноотстоящих узлах по длине пролета // Изв. высш. учеб. заведений. Стр-во. 2024. № 4(784). С. 23—33. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-784-4-23-33. EDN: MIGXEE.

27. *Москалев Н. С.* Конструкции висячих покрытий. М. : Стройиздат, 1980. 331 с.

© Игнатьев А. В., Калиновский С. А., Бочков М. И., Завьялов И. С., 2026

Поступила в редакцию
04.05.2026

Ссылка для цитирования:

Игнатьев А. В., Калиновский С. А., Бочков М. И., Завьялов И. С. Напряженно-деформированное состояние нити с учетом ее физической и геометрической нелинейности // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 3(104). С. 45—56. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_45.

Об авторах:

Игнатьев Александр Владимирович — д-р техн. наук, доц., проф. каф. строительной механики, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Калиновский Сергей Андреевич — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; stroitmeh@mgsu.ru

Бочков Максим Иванович — канд. техн. наук, доц. каф. строительной механики, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; stroymech@vgasu.ru

Завьялов Иван Сергеевич — ассистент каф. строительной механики, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Alexander V. Ignatyev[a], Sergey A. Kalinovsky[b], Maxim I. Bochkov[a], Ivan S. Zavyalov[a]

[a] Volgograd State Technical University

[b] National Research Moscow State University of Civil Engineering

FINITE ELEMENT IN THE FORM OF A CLASSICAL MIXED METHOD CALCULATION OF A THREAD, CONSIDERING THE REAL GEOMETRIC CONFIGURATION

The paper considers the problem of calculating a thread fixed on two supports located at the same height, under the action of a system of concentrated loads applied at the points of the span, located at the same intervals. This takes into account the stretching of the thread. A nonlinear finite element of a thread with mixed unknowns developed by the authors is used for the calculation. The element was developed within the framework of the finite element method developed by the authors in the form of a classical mixed method of structural mechanics. The calculation is performed taking into account the nonlinear operation of the thread at different values of the elongation of the thread allowance. Graphs of the dependence of the struts and forces in the thread on the allowance have been constructed, which can be applied by design engineers to justify the thread parameters.

K e y w o r d s: thread loaded with concentrated forces, sagging boom, the amount of allowance, strut, tensile forces, the ratio of the sagging boom and the allowance, the dependence of the allowance on internal forces.

For citation:

Ignatyev A. V., Kalinovsky S. A., Bochkov M. I., Zavyalov I. S. [Finite element in the form of a classical mixed method calculation of a thread, considering the real geometric configuration]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. *Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 3, pp. 45—56. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_45.

About authors:

Alexander V. Ignatyev — Doctor of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0733-8808

Sergey A. Kalinovsky — Candidate of Engineering Sciences, Docent, National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

Maxim I. Bochkov — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; stroymech@vgasu.ru

Ivan S. Zavyalov — Assistant, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation