

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.071.22:531.62

DOI 10.52684/2312-3702-2022-40-2-5-9

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗГИБНО-ЖЕСТКИХ НИТЕЙ ПРИ ЗАДАНЫХ ДОПУСТИМЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ И ДЕФОРМАЦИЯХ

Д. А. Тарасов

Тарасов Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление», Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация; e-mail: den517375@ya.ru

Рассмотрена одна из основных проблем при проектировании любой механической системы, связанная с определением форм и размеров всех ее конструктивных элементов, которые обеспечивают общую прочность системы. Исходя из требований прочности, жесткости и экономичности поставлена задача по нахождению оптимальных форм и размеров проектируемой конструкции. В качестве объекта исследования выступали несущие элементы большепролетных покрытий общественных зданий и инженерных сооружений, работающие преимущественно на растяжение с частичным восприятием изгибающих моментов. Предметом исследования была методика оптимизации физических и компоновочных геометрических параметров изгибно-жестких нитей с учетом накладываемых ограничений. Оптимизация решения велась по нахождению минимальной длины нити в недеформированном состоянии. Предложенная методика позволила на этапе проектирования поставить и решить задачи по поиску оптимальных параметров конструктивных элементов, расчетной моделью которых является изгибно-жесткая нить.

Ключевые слова: изгибно-жесткая нить, нить конечной жесткости, оптимизация, нелинейное программирование, стрела провеса, напряжения, деформации.

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF FLEXIBLE RIGID THREADS UNDER GIVEN PERMISSIBLE STRESSES AND DEFORMATIONS

D. A. Tarasov

Tarasov Denis Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the "Automation and Control Department", Penza State Technological University, Penza, Russian Federation; e-mail: den517375@ya.ru

Considered one of the main problems in the design of any mechanical system associated with the definition of the shapes and sizes of all its structural elements, providing the overall strength of the system. Based on the requirements of strength, rigidity and economy, the task was set to find the optimal shapes and sizes of the designed structure. The object of the study was the load-bearing elements of long-span coatings of public buildings and engineering structures, working mainly in tension with partial perception of bending moments. The subject of the study was a technique for optimizing the physical and layout geometric parameters of flexural-rigid threads, taking into account the imposed restrictions. The optimization of the solution was carried out to find the minimum length of the thread in the undeformed state. The proposed technique allows at the design stage to set and solve problems of finding the optimal parameters of structural elements, the calculation model of which is a flexural-rigid thread.

Keywords: flexural-rigid thread, finite stiffness thread, optimization, non-linear programming, sag, stresses, deformations.

Введение

В настоящее время при строительстве общественных зданий и инженерных сооружений находят широкое применение конструкции, работающие преимущественно на растяжение с частичным восприятием изгибающих моментов [1]. Использование подобных висячих систем позволяет перекрывать большие пролеты ввиду особенности их работы при внешнем силовом воздействии [2]. Так, при одинаковых допустимых напряжениях несущая способность элемента, работающего на растяжение, в разы выше, элемента того же поперечного сечения – на изгиб. Следует отметить, что с увеличением пролета растянутый элемент предпочтительнее изгибаемого [3].

Объектом исследования выступают основные несущие элементы, обеспечивающие общую прочность указанных систем, расчетной моделью которых является изгибно-жесткая

нить. Нить конечной жесткости совмещает в себе свойства гибких нитей, способных сопротивляться растяжению, и балок, работающих только на изгиб [4].

Одной из основных задач при проектировании любой механической системы является определение форм и размеров всех ее конструктивных элементов [5]. Исходя из требований прочности, жесткости и экономичности результатом решения поставленной задачи является конструкция с оптимальными формами и размерами, т. е. конструкция с наименьшим объемом, а соответственно, весом и стоимостью, а также напряжениями в каждом ее элементе, возникающими от заданных нагрузок и стремящимися к расчетному сопротивлению материала или допустимым напряжениям, но не превышающими их значения. Вместе с тем в случае наложения

ограничения по деформациям возникающие перемещения в заданных сечениях проектируемой конструкции не должны превышать допустимых значений [6, 22].

Известно, что с увеличением первоначальной стрелы провеса напряжения в поперечных сечениях нити уменьшаются [7]. Это обусловлено снижением величины распора, возникающего при внешнем силовом воздействии [8]. Происходит изменение длины нити, а следовательно, ее объема, веса и стоимости. В связи с этим становится актуальной задача по оптимизации первоначального провеса с целью минимизации длины изгибно-жесткой нити. Цель достигается при удовлетворении установленных ограничений по допустимым деформациям и максимальным напряжениям в заданных сечениях по длине. В связи с этим предметом исследования является методика по решению поставленной задачи условной оптимизации. Научная новизна заключается в том, что предлагаемая последовательность действий позволит на этапе проектирования ставить и решать задачи по нахождению оптимальных параметров конструктивных элементов, не прибегая к малоуправляемому поиску при последовательном переборе.

Материалы и методы

Сформулируем задачу параметрической оптимизации. Необходимо найти вектор значений аргументов, при которых целевая функция достигает минимума. В качестве целевой функции будет выступать длина изгибно-жесткой нити в недеформированном состоянии. При этом минимизация производится по первоначальной стреле провеса и распор. Предварительно присваиваются некоторые первоначальные значения аргументам целевой функции.

Рассмотрим изгибно-жесткую нить, расчетная модель которой представлена на рисунке 1.

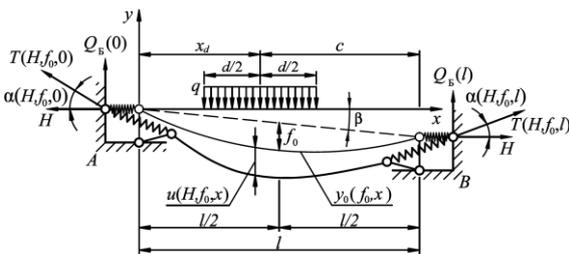


Рис. 1. Расчетная модель изгибно-жесткой нити

Запишем целевую функцию в виде:

$$L_0(H, f_0) = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} y_0(f_0, x)\right)^2} dx \rightarrow \min, \quad (1)$$

где H – распор, Н; f_0 – первоначальная стрела провеса, м; l – пролет, м; x – координата по длине, м; $y_0(f_0, x)$ – уравнение линии начального очертания, м.

Линию начального очертания изгибно-жесткой нити с достаточной степенью точности можно представить в виде квадратичной функции [9]:

$$y_0(f_0, x) = \frac{4 \cdot f_0}{l^2} \cdot x^2 - \frac{4 \cdot f_0}{l} \cdot x - x \cdot \text{tg} \beta, \quad (2)$$

где β – угол наклона хорды AB , соединяющей точки крепления, град.

В сформулированной задаче параметрической оптимизации ставится ряд ограничений.

Запишем первое ограничение по максимальным напряжениям, возникающим в крайних волокнах заданного сечения [10]:

$$\sigma(H, f_0, x_1) = \frac{T(H, f_0, x_1)}{A} \pm \left| \frac{M_H(H, f_0, x_1)}{W} \right| \leq [\sigma], \quad (3)$$

где $T(H, f_0, x_1)$ – значение функции продольного усилия в заданном сечении с абсциссой x_1 , Н; A – площадь поперечного сечения, м²; $M_H(H, f_0, x_1)$ – значение функции изгибающего момента в заданном сечении с абсциссой x_1 , Н·м; W – момент сопротивления сечения, м³; $[\sigma]$ – допустимое напряжение материала, Па.

Из расчетной модели, представленной на рисунке 1, графически определим продольное усилие, возникающее в изгибно-жесткой нити. Оно равно сумме проекций балочной поперечной силы и распора на касательную к линии конечного очертания. Запишем это в математическом виде [11]:

$$T(H, f_0, x) = Q_B(x) \cdot \sin \alpha(H, f_0, x) + H \cdot \cos \alpha(H, f_0, x), \quad (4)$$

где $Q_B(x)$ – функция балочной поперечной силы, Н; $\alpha(H, f_0, x)$ – угол между осью абсцисс и касательной в произвольной точке к линии конечного очертания, град.

Для определения функции изгибающего момента, воспринимаемого изгибно-жесткой нитью, запишем уравнение моментов, которое взято в произвольном сечении по длине [12]:

$$M_H(H, f_0, x) = M_B(x) - H \cdot (y_0(f_0, x) + x \cdot \text{tg} \beta + u(H, f_0, x)), \quad (5)$$

где $M_B(x)$ – функция балочного изгибающего момента, Н·м; $u(H, f_0, x)$ – функция прогиба, м.

Тригонометрические функции угла между осью абсцисс и касательной в произвольной точке к линии равновесия изгибно-жесткой нити в деформированном состоянии находятся так [10]:

$$\sin \alpha(H, f_0, x) = \frac{\frac{d}{dx}(y_0(f_0, x) + u(H, f_0, x))}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(y_0(f_0, x) + u(H, f_0, x))\right)^2}}; \quad (6)$$

$$\cos \alpha(H, f_0, x) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(y_0(f_0, x) + u(H, f_0, x))\right)^2}} \quad (7)$$

Определение внутренних усилий, возникающих при изгибе в балке тем же пролетом и нагруженной так же, как и нить конечной жесткости, не вызывает затруднений и ведется по формулам [13, 14]:

$$M_B(x) = \frac{q \cdot d \cdot c}{l} \cdot x \cdot (x \geq 0) - q \cdot \frac{\left[x - \left(x_d - \frac{d}{2}\right)\right]^2}{2} \cdot (x > x_d - \frac{d}{2}) + q \cdot \frac{\left[x - \left(x_d + \frac{d}{2}\right)\right]^2}{2} \cdot (x > x_d + \frac{d}{2}); \quad (8)$$

$$Q_B(x) = \frac{q \cdot d \cdot c}{l} \cdot (x \geq 0) - q \cdot \left[x - \left(x_d - \frac{d}{2}\right) \right] \times (x > x_d - \frac{d}{2}) + q \cdot \left[x - \left(x_d + \frac{d}{2}\right) \right] \cdot (x > x_d + \frac{d}{2}), \quad (9)$$

где q – равномерно распределенная нагрузка, Н/м; d – ширина зоны приложения нагрузки, м; c – расстояние от центра зоны приложения

рисунках 2а, 3а и 4а. Полученные значения в максимально нагруженном и деформированном сечениях с соответствующими абсциссами явились ограничениями для обратной задачи.

В результате решения условной задачи оптимизации параметров найдено значение первоначальной стрелы провеса нити. Оно составило $f_0 = 1,0543$ м. Вместе с тем построены эпюры нормальных напряжений и вертикальных перемещений, представленные на рисунках 2б, 3б и 4б.

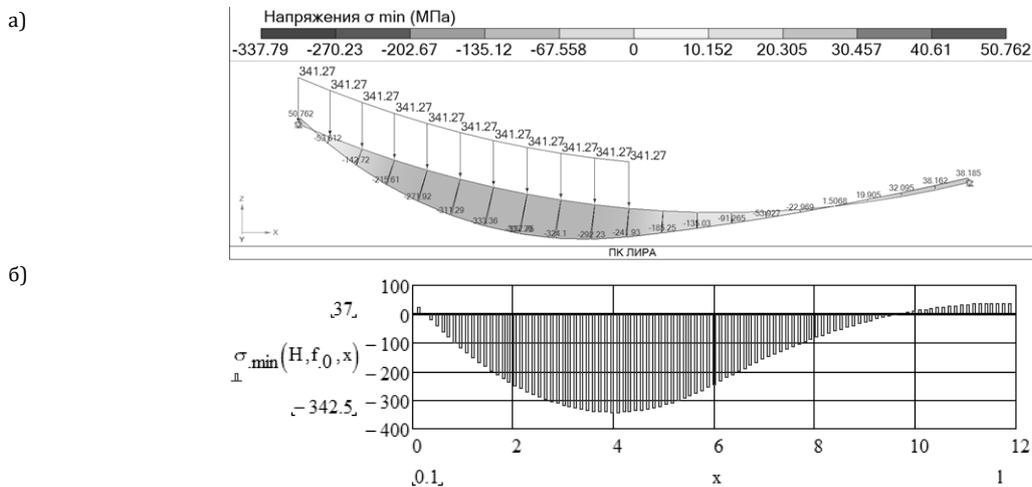


Рис. 3. Эпюра нормальных напряжений σ_{min} : а – метод конечных элементов; б – предложенная методика

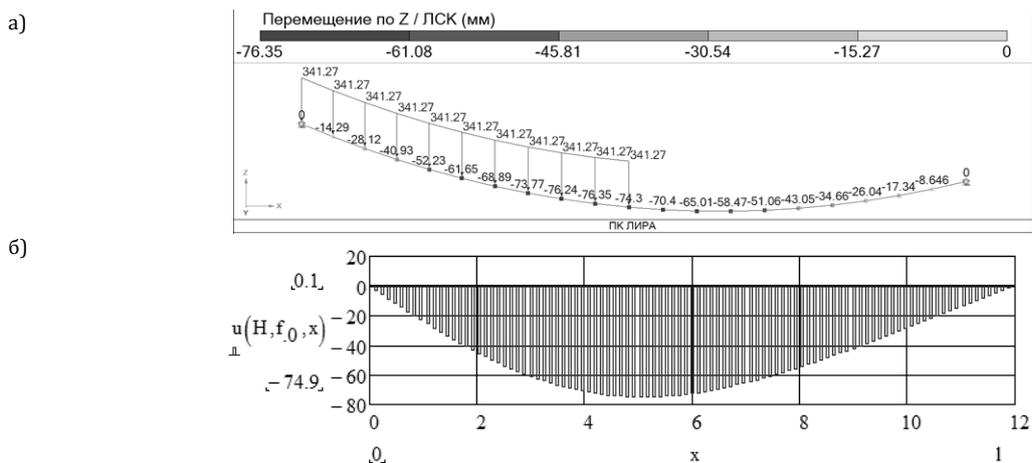


Рис. 4. Эпюра вертикальных перемещений: а – метод конечных элементов; б – предложенная методика

Следует отметить, что ограничение по максимальным нормальным напряжениям выступило определяющим в поставленной задаче параметрической оптимизации с заданными исходными данными. Это видно из сопоставления эпюр, представленных на рисунках 2–4.

Заключение

Предложена методика по решению задач условной оптимизации параметров изгибно-жестких нитей при действии поперечных статических равномерно распределенных нагрузок. Она позволяет оптимизировать решение по минимальной первоначальной длине нити, а соответственно, массе и стоимости материала. При этом

учитываются ограничения по прочности и жесткости в заданных сечениях. Физическими и геометрическими параметрами, по которым производится минимизация, являются распор, возникающий вследствие внешнего силового воздействия на нить, и первоначальная стрела провеса.

Проведена оценка адекватности результатов, получаемых с помощью предложенной методики. Расхождение значений с данными, выявленными методом конечных элементов, составило чуть больше 5 %, что является хорошим показателем для инженерных расчетов.

Список литературы

1. Кужахметова, Э. Р. Архитектурная выразительность и физиологическая целесообразность зданий с криволинейными поверхностями стен и перекрытий / Э. Р. Кужахметова, А. И. Сапожников // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2012. – № 11 (166). – С. 42–45.
2. Тарасов, Д. А. Комплекс программ моделирования напряженно-деформированного состояния стальных канатов / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 12 (16). – С. 114–120.

3. Сравнение большепролетных конструкций по технико-экономическим показателям / А. В. Исаев, К. Е. Голубятников, В. Д. Комлев, Э. Р. Насыбуллина // Приволжский научный журнал. – 2019. – № 2 (50). – С. 68–75.
4. Тарасов, Д. А. Комплекс программ моделирования работы стальных канатов при действии поперечной динамической нагрузки / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 2 (24). – С. 48–55.
5. Василькин, А. А. Интеграция инструментов структурной и параметрической оптимизации на этапе поискового проектирования стальных конструкций / А. А. Василькин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2018. – № 1 (49). – С. 22–28.
6. Тарасов, Д. А. Параметрическая оптимизация стальных канатов при действии поперечного удара / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 2 (24). – С. 56–62.
7. Кужахметова, Э. Р. Сравнительный анализ работы вант с разной геометрической характеристикой при вертикальном нагружении / Э. Р. Кужахметова // Известия КГТУ. – 2017. – № 45. – С. 235–244.
8. Тарасов, Д. А. Исследование влияния пластических деформаций при моделировании напряженно-деформированного состояния гибкой нити / Д. А. Тарасов, А. В. Липов, А. М. Ирышков // Модели, системы, сети в эконо-мике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 98–110. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-8.
9. Математическое моделирование напряженно- деформированного состояния гибкой нити при действии поперечного удара / В. В. Коновалов, Д. А. Тарасов, В. Ю. Зайцев, Ю. В. Родионов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : труды XXI Международной конференции : в 2 т. (г. Самара, 3–6 сентября 2019 г.) / под редакцией С. А. Никитова, Д. Е. Быкова, С. Ю. Боровика, Ю. Э. Плешивцевой. – Самара, 2019. – С. 313–317.
10. Тарасов, Д. А. Математическое моделирование работы нитей конечной жесткости при ударном воздействии / Д. А. Тарасов, В. В. Волков, Е. А. Аксенова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10, № 4 (56). – С. 113–116. – DOI 10.46548/21vek-2021-1056-0023.
11. Кужахметова, Э. Р. Напряженно-деформированное состояние цилиндрично-вантового покрытия здания (сооружения) с различными формами наружного опорного контура / Э. Р. Кужахметова // Строительная механика инже-нерных конструкций и сооружений. – 2020. – Т. 16, № 2. – С. 95–110. – DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110.
12. Анализ динамического поведения мобильного ограждения на основе модели механической цепи / Д. А. Тарасов, Г. С. Большаков, В. В. Волков, Е. А. Аксенова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10, № 3 (55). – С. 77–80. – DOI 10.46548/21vek-2021-1055-0014.
13. Mathematical modeling of deformations of flexible threads under their dynamic loading in the zone of material plasticity / D. Tarasov, V. Konovalov, V. Zaitsev, Y. Rodionov // Journal of Physics: Conference Series, Tambov, 14–16 ноября 2018 г. – Tambov: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012014. – DOI 10.1088/1742-6596/1278/1/012014.
14. Mathematical modeling of the stress-strain state of flexible threads with regard to plastic deformations / D. Tarasov, V. Konovalov, V. Zaitsev, Y. Rodionov // Journal of Physics: Conference Series : 4, Tambov, 15–17 ноября 2017 г. – Tambov, 2018. – P. 012008. – DOI 10.1088/1742-6596/1084/1/012008.
15. Штейнбрехер, О. А. Решение задачи параметрической оптимизации сетчатой цилиндрической конструкции / О. А. Штейнбрехер, Т. В. Бурнышева // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 10 (70). – С. 2. – DOI 10.18698/2308-6033-2017-10-1688.
16. Бояршинова, И. Н. Оптимальное проектирование деталей рамных конструкций / И. Н. Бояршинова, М. Р. Бекмансуров // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 11. – С. 102–105.
17. Тарасов, Д. А. Определение частоты вращения гибкой нити с учетом физической нелинейности при заданных допустимых напряжениях и деформациях / Д. А. Тарасов, В. В. Коновалов, А. Л. Данилов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2020. – Т. 9, № 4 (52). – С. 10–14. – DOI 10.46548/21vek-2020-0951-0001.
18. Определение области несущей способности гибкой нити при действии поперечного удара / Д. А. Тарасов, В. В. Коновалов, А. Л. Данилов, А. И. Бобылев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10, № 2 (54). – С. 40–43. – DOI 10.46548/21vek-2021-1054-0007.
19. Кужахметова, Э. Р. Расчет вант с учетом геометрической и физической нелинейности / Э. Р. Кужахметова // Известия КГТУ. – 2019. – № 55. – С. 252–266.
20. Болдырев, А. М. Применение методов параметрической оптимизации при исследовании висячих конструкций с переменной расчетной схемой / А. М. Болдырев, А. А. Свентиков // Металлические конструкции. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 263–268.
21. Оценка влияния конструктивной нелинейности при моделировании работы гибкой нити / Д. А. Тарасов, Г. С. Большаков, В. В. Коновалов, А. М. Ирышков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2020. – Т. 9, № 2 (50). – С. 117–123. – DOI 10.46548/21vek-2020-0950-0022.
22. Бояршинова, И. Н. Оптимальное проектирование конструкций с целью снижения веса / И. Н. Бояршинова, В. С. Хусаинов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – № 5. – С. 64–66.
23. Лазарева, Н. В. Использование информационных моделей при проведении строительно-технических экспертиз / Н. В. Лазарева, А. Ю. Зиновьев // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 1 (39). – С. 105–111. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-105-110. – EDN CZARQA.
24. Кудасова, А. С. Арочные опорные контуры большепролетных спортивных объектов с висячими покрытиями: конструктивные и архитектурные особенности / А. С. Кудасова, М. А. Колотненко, А. Д. Тютина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 4 (34). – С. 43–47. – EDN UOENOD.

© Д. А. Тарасов

Ссылка для цитирования:

Тарасов Д. А. Параметрическая оптимизация изгибно-жестких нитей при заданных допустимых напряжениях и деформациях // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 2 (40). С. 5–9.

УДК 699.828.2:725.826.053.3
DOI 10.52684/2312-3702-2022-40-2-9-14

**РАЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЛИВНЕВОЙ КАНАЛИЗАЦИИ
В УСЛОВИЯХ ТОЧЕЧНОЙ ВЫСОТНОЙ ЗАСТРОЙКИ Г. АСТРАХАНИ**

А. Р. Курмангалиева

Курмангалиева Аида Робертовна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Астраханский государственный архитектурно-