

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-3-216-230

EDN: SXAGEC

Научная статья / Research article

Оптимизация параметров профиля нити конечной жесткости при поперечном ударе

Д.А. Тарасов 

Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Российская Федерация

✉ tda82@list.ru

Поступила в редакцию: 28 февраля 2025 г.

Доработана: 8 мая 2025 г.

Принята к публикации: 15 мая 2025 г.

Аннотация. Нить конечной жесткости является расчетной моделью для широкого круга несущих конструкций, например большепролетных висячих покрытий общественных и промышленных зданий. Вместе с тем сравнительно недавно появился новый класс инженерных сооружений, предназначенных для создания непреодолимого физического препятствия несанкционированному продвижению автотранспортных средств. Основными элементами, обеспечивающими общую прочность и жесткость конструкций подобных сооружений, являются стальные профили с сечением в виде кольца, работающие по восприятию поперечного удара. В связи с этим возникает потребность в решении задач оптимального проектирования указанных элементов. Цель исследования — создание метода, позволяющего ставить и решать обозначенные задачи. В основу разработанного метода положена однокритериальная многопараметрическая условная оптимизация, метод Бубнова — Галеркина, а также интегральное и дифференциальное исчисление функций нескольких переменных. Проведена верификация предложенной технологии моделирования. Расхождения в значениях принятых критериев оценки истинности получаемых результатов укладываются в допустимые погрешности решения инженерных задач. С помощью созданного метода проведены исследования и выявлено влияние соотношения внутреннего к внешнему диаметру кольцевого профиля на массогабаритные характеристики, а также поведение изгибно-жесткой нити под действием кратковременной динамической нагрузки.

Ключевые слова: расчет по деформированной схеме, геометрическая нелинейность, обратная задача, условная оптимизация, нелинейное программирование, динамическая нагрузка

Заявление о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Тарасов Д.А. Оптимизация параметров профиля нити конечной жесткости при поперечном ударе // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 3. С. 216–230. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-3-216-230>

Тарасов Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и управления, Пензенский государственный технологический университет, Российская Федерация, 440039, г. Пенза, пр-д. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а/11; eLIBRARY SPIN-код: 7690-5877, ORCID: 0000-0001-7685-0325; e-mail: tda82@list.ru

© Тарасов Д.А., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Optimization of Section Parameters of Finite Stiffness Cable Under Transverse Impact

Denis A. Tarasov 

Penza State Technological University, Penza, Russian Federation
tda82@list.ru

Received: February 28, 2025.

Revised: May 8, 2025.

Accepted: May 15, 2025.

Abstract. A cable of finite stiffness is a model for a wide range of load-bearing structures, such as large-span suspended roofs of public and industrial buildings. At the same time, a new class of engineering structures has appeared relatively recently, designed to create an insurmountable physical obstacle to unauthorized movement of vehicles. The main elements that ensure the overall strength and rigidity of such structures are ring-shaped steel sections, which resist lateral impact. In this regard, there is a need to solve problems of optimal design of these elements. The objective of this study is to create a method that allows setting and solving the designated problems. The developed method is based on single-criterion multiparameter conditional optimization, the Bubnov-Galerkin method, as well as integral and differential calculus of multivariate functions. Verification of the proposed modeling technology is carried out. Discrepancies in the values of the adopted criteria for assessing the accuracy of the obtained results stay within the permissible errors in solving engineering problems. Using the developed method, the studies were conducted and the influence of the ratio of the internal to external diameter of the ring section on the weight and size characteristics, as well as the behavior of the bending-rigid cable under the action of a short-term dynamic load was revealed.

Keywords: calculation according to deformed shape, geometric nonlinearity, inverse problem, conditional optimization, nonlinear programming, dynamic load

Conflicts of interest. The author declares that there is no conflict of interest.

For citation: Tarasov D.A. Optimization of section parameters of finite stiffness cable under transverse impact. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(3):216–230. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-3-216-230>

1. Введение

Выявление оптимальных параметров профиля элемента с расчетной моделью в виде нити конечной жесткости, работающей при совместном действии растяжения и изгиба, вызванных поперечным ударом, — задача в достаточной мере сложная наряду с отдельными задачами о поиске оптимальных характеристик сечений изгибаемых элементов и элементов, подверженных осевому растяжению. Решение данной задачи обусловлено многими факторами, такими как величина, характер и место приложения нагрузки [1–3]. Например, изгибающий момент, возникающий в нити конечной жесткости, при помощи которого определяется составляющая нормальных напряжений от изгиба, сам по себе зависит не только от величины, характера и места приложения нагрузки, но также и от горизонтальной составляющей продольного усилия, прогиба и первоначальной равновесной формы рассматриваемого элемента [4–5]. Все это вызвано геометрической нелинейностью и связано с тем, что расчет изгибно-жестких нитей ведется по деформированной схеме [6].

В качестве параметров профиля нити конечной жесткости, влияющих на решение задачи оптимального проектирования, выступают по меньшей мере три величины: площадь, момент сопротивления и момент инерции сечения, поскольку все три входят в условия прочности и совместности деформаций [7].

Проектирование и подбор поперечных профилей разного типа конструкций в машиностроении и строительстве с учетом конструктивных, технологических требований и условий унификации, является задачей, широко отраженной в научной литературе [8–16]. Однако при компоновке сечений

Denis A. Tarasov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Control, Penza State Technological University, 1a/11, Baydukova proezd/Gagarina St, Penza, 440039, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7690-5877, ORCID: 0000-0001-7685-0325; e-mail: tda82@list.ru

применительно к частному виду стержневых элементов с расчетной моделью, представляющей собой нить конечной жесткости и испытывающей поперечную кратковременную динамическую нагрузку, подобная постановка задачи отсутствует.

В таком случае сформулируем цель исследования следующим образом: разработать метод отыскания оптимальных параметров кольцевого профиля изгибно-жесткой нити, работающей по восприятию динамической нагрузки, в свою очередь характеризующейся массой и скоростью тела в первоначальный момент поперечного удара.

В рамках достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач.

1. Рассмотреть некоторые общие зависимости, позволяющие разработать метод, являющийся целью данного исследования.
2. Провести верификацию разработанного метода.
3. Выявить влияние отдельного параметра кольцевого профиля на массогабаритные характеристики, а также поведение изгибно-жесткой нити под действием кратковременной динамической нагрузки.

Объект исследования – несущие элементы большепролетных висячих покрытий общественных зданий и инженерных сооружений, а также основные силовые элементы, обеспечивающие общую прочность специальных защитных сооружений, для которых расчетной моделью является нить, способная воспринимать часть возникающего при поперечном ударе изгибающего момента [17; 18].

В качестве предмета исследования выступает метод, дающий возможность достичь поставленной цели.

2. Метод

Для решения поставленных задач рассмотрен в общем виде плоский упругий стержневой элемент, представлявший собой нить конечной жесткости пролетом l , закрепленную на опорах A и B с упругой податливостью u , расположенных под углом β к горизонтальной поверхности. Первоначальная стрела провеса f_0 в середине пролета вызвана действием собственного веса [19]. Изгибно-жесткая нить на расстоянии x_b от опоры A испытывала поперечный удар телом шириной b , массой m и имевшим скорость движения v в первоначальный момент соударения [20]. Расчетная модель представлена на рис. 1.

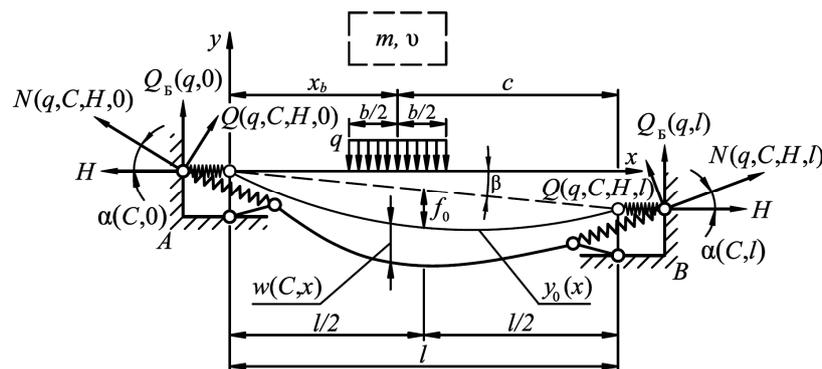


Рис. 1. Расчетная модель нити конечной жесткости

Источник: выполнено Д.А. Тарасовым

Figure 1. Calculation model of a finite stiffness cable

Source: made by D.A. Tarasov

Для рассматриваемого элемента в виде кольцевого профиля каждый из вышеперечисленных параметров, влияющих на решение задачи оптимального проектирования, записывался в виде функции только от внутреннего диаметра:

$$A(d) = \frac{\pi \left[\left(\frac{d}{k} \right)^2 - d^2 \right]}{4}; \quad (1)$$

$$W(d) = \frac{\pi \left(\frac{d}{k} \right)^3}{32} (1 - k^4); \quad (2)$$

$$J(d) = \frac{\pi \left(\frac{d}{k} \right)^4}{64} (1 - k^4), \quad (3)$$

где d — внутренний диаметр, м; k — безразмерный коэффициент, равный

$$k = \frac{d}{D}, \quad (4)$$

где D — внешний диаметр, м.

Линия первоначального равновесного состояния, вызванная действием собственного веса, описывалась квадратичной функцией [21]:

$$y_0(x) = \frac{4f_0}{l^2} x^2 - \frac{4f_0}{l} x - x \operatorname{tg} \beta, \quad (5)$$

где x — текущая абсцисса ($0 \leq x \leq l$), м.

В результате поперечного удара в нити конечной жесткости возникали прогибы, которые с достаточной точностью описывались однопараметрической базисной функцией вида [22]:

$$w(C, x) = C \sin \left(\frac{\pi x}{l} \right), \quad (6)$$

где C — весовой коэффициент.

Наряду с прогибом в каждом поперечном сечении по длине рассматриваемого элемента возникала комбинация из продольной и поперечной силы, а также изгибающего момента [22]

$$N(q, C, H, x) = Q_B(q, x) \sin \alpha(C, x) + H \cos \alpha(C, x); \quad (7)$$

$$Q(q, C, H, x) = -Q_B(q, x) \cos \alpha(C, x) + H \sin \alpha(C, x); \quad (8)$$

$$M(q, C, H, x) = M_B(q, x) - H (y_0(x) + x \operatorname{tg} \beta + w(C, x)), \quad (9)$$

где q — нагрузка, эквивалентная силе инерции ударяющего тела, Н/м; H — горизонтальная составляющая растягивающего продольного усилия, Н; $Q_B(q, x)$ — функция балочной поперечной силы, Н; $M_B(q, x)$ — функция балочного изгибающего момента, Н·м.

Заметим, что в параметры функций силовых факторов входили нагрузка, являвшаяся эквивалентом силы инерции ударяющего тела, и распор — горизонтальная составляющая растягивающего продольного усилия, поскольку данные величины принадлежали к числу неизвестных на момент решения задачи.

Для создания возможности построить эпюры внутренних усилий определялись тригонометрические функции угла между касательной к линии, описывающей деформированное состояние изгибно-жесткой нити и осью абсцисс [22]:

$$\cos \alpha(C, x) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} (y_0(x) + w(C, x)) \right)^2}}; \quad (10)$$

$$\sin \alpha(C, x) = \frac{\frac{d}{dx} (y_0(x) + w(C, x))}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} (y_0(x) + w(C, x)) \right)^2}}. \quad (11)$$

Вместе с тем вычислялись функции балочной поперечной силы и балочного изгибающего момента [23; 24]:

$$Q_B(q, x) = \frac{qbc}{l} (x \geq 0) - q \left[x - \left(x_b - \frac{b}{2} \right) \right] \left(x > x_b - \frac{b}{2} \right) + q \left[x - \left(x_b + \frac{b}{2} \right) \right] \left(x > x_b + \frac{b}{2} \right); \quad (12)$$

$$M_B(q, x) = \frac{qbc}{l} x (x \geq 0) - q \frac{\left[x - \left(x_b - \frac{b}{2} \right) \right]^2}{2} \left(x > x_b - \frac{b}{2} \right) + q \frac{\left[x - \left(x_b + \frac{b}{2} \right) \right]^2}{2} \left(x > x_b + \frac{b}{2} \right), \quad (13)$$

где b — ширина зоны соударения, м; c — расстояние от центра зоны соударения до опоры B , м; x_b — абсцисса центра зоны соударения, м.

Нормальные напряжения, возникающие в наиболее удаленных от нейтральной оси волоках сечений нити конечной жесткости, связывались с внутренними усилиями зависимостями:

$$\sigma_{\max}(q, C, H, d, x) = \frac{N(q, C, H, x)}{A(d)} + \left| \frac{M(q, C, H, x)}{W(d)} \right|; \quad (14)$$

$$\sigma_{\min}(q, C, H, d, x) = \frac{N(q, C, H, x)}{A(d)} - \left| \frac{M(q, C, H, x)}{W(d)} \right|. \quad (15)$$

В качестве целевой функции выступала потенциальная энергия деформации в рассматриваемом элементе [20; 25]:

$$U(q, C, H, d) = \int_0^l \frac{M(q, C, H, x)^2}{2EJ(d)} dx + \int_0^l \frac{N(q, C, H, x)^2}{2EA(d)} dx + \int_0^l \frac{iQ(q, C, H, x)^2}{2GA(d)} dx \rightarrow \min, \quad (16)$$

где E — модуль упругости материала, Па; i — безразмерный коэффициент, характеризующий форму поперечного сечения; G — модуль сдвига, Па.

При этом накладывалось четыре ограничения.

1. Условие прочности [26]:

$$\sigma(q, C, H, d, x_1) \leq R_y, \quad (17)$$

где $\sigma(q, C, H, d, x_1)$ — значение функции нормальных напряжений в заданном сечении с абсциссой x_1 , Па; R_y — расчетное сопротивление материала, Па.

2. Условие неразрывности деформаций [27]:

$$L_0 + \Delta L(q, C, H, d) = L(H, C), \quad (18)$$

где L_0 — длина до действия поперечного удара, м; $\Delta L(q, C, H, d)$ — упругая деформация, м; $L(H, C)$ — длина в деформированном состоянии, м.

3. Условие сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{b^2} = \frac{1}{2} q \int_{x_b - \frac{b}{2}}^{x_b + \frac{b}{2}} w(C, x) dx. \quad (19)$$

Предполагалось, что кинетическая энергия ударяющего тела полностью переходит в работу по изменению положения изгибно-жесткой нити [28].

4. Условие ортогональности невязки к базисной функции [22]:

$$\int_0^l \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \left(EJ(d) \frac{d^2}{dx^2} w(C, x) - M_B(q, x) + H(y_0(x) + x \cdot \operatorname{tg}\beta + w(C, x)) \right) dx = 0. \quad (20)$$

Для раскрытия условия неразрывности деформаций (18) применялись уравнения для определения длины нити конечной жесткости до и после взаимодействия с ударяющим телом, а также выражение для определения величины упругой деформации:

$$L_0 = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} y_0(x) \right)^2} dx; \quad (21)$$

$$L(H, C) = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} (y_0(x) + w(C, x)) \right)^2} dx; \quad (22)$$

$$\Delta L(q, C, H, d) = \frac{H}{EA(d)} \int_0^l \left(1 + \left(\frac{Q_B(q, x) - Q(q, C, H, x)}{H} + \operatorname{tg}\beta \right)^2 \right) dx. \quad (23)$$

После того как постановка задачи оптимизации сформулирована, она решалась общеизвестным численным методом, а именно методом множителей Лагранжа. Затем по нижепредставленным выражениям определялись коэффициент динамичности и время соударения:

$$k_d = \frac{qb}{gm}; \quad (24)$$

$$t = \frac{mv}{qb}, \quad (25)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с².

3. Результаты и обсуждение

Для верификации разработанного метода сопоставлялись данные, полученные в ходе вычислительного эксперимента, проведенного в программном комплексе ЛИРА версии 10.10 релиз 2.4, и результаты, рассчитанные с помощью предложенной процедуры численного моделирования.

Программный комплекс ЛИРА — это многофункциональная система компьютерного моделирования, расчета, исследования и проектирования на все возможные виды статических нагрузок, температурных, деформационных и динамических воздействий объектов строительства, машиностроения, мостостроения, атомной энергетики, нефтедобывающей промышленности и многих других сфер, где актуальны методы строительной механики. Предоставляет возможность производить расчеты объектов с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности. Позволяет исследовать общую устойчивость рассчитываемой модели, проверить прочность сечений элементов по различным теориям разрушений.

В качестве объекта исследования выступала прямолинейная $f_0 = 0$ м нить конечной жесткости, выполненная из стального профиля в виде кольца с отношением внутреннего к внешнему диаметру $k = 0,6$. Расчетное сопротивление материала $R_y = 650$ МПа. Конструкция закреплялась на шарнирно-неподвижных опорах $u = 0$ м/Н, расположенных в одной плоскости $\beta = 0$ град на расстоянии $l = 6$ м друг от друга. Поперечный удар осуществлялся посередине пролета $x_b = 3$ м телом массой $m = 3,5$ т, движущимся со скоростью 5 км/ч. Ширина взаимодействия составляла $b = 1$ м.

При заданных исходных данных в результате проведенного расчета методом, представленным в данной работе, определены внутренний $d = 49,83$ мм и внешний $D = 83,06$ мм диаметры кольцевого профиля. При этом моделирование велось исходя из того, что абсцисса максимально нагруженного сечения, где нормальные напряжения в крайних волокнах ограничивались расчетным сопротивлением материала, совпадала с серединой пролета объекта исследования. Наряду с этим определены значения времени соударения $t = 0,077$ с, а также равномерно-распределенной нагрузки $q = 63,09$ кН/м, являвшейся эквивалентом силы инерции, возникшей при поперечном ударе телом с заданной массой и скоростью движения. Вместе с тем построены эпюры максимальных, минимальных нормальных напряжений и прогибов, представленные соответственно на рис. 2, а, 3, а, и 4, а.

В настоящее время решение обратных задач в динамической постановке с учетом геометрической нелинейности не реализовано в программных комплексах, в основу которых положен метод конечных элементов с прямым интегрированием уравнений движения по времени, и система автоматизированного проектирования и расчета ЛИРА тому не исключение. В связи с этим в указанном программном комплексе при моделировании ударного воздействия и геометрических характеристик сечения использовались значения, найденные на предыдущем этапе. Изгибно-жесткая нить задавалась 20 геометрически нелинейными конечными элементами стержня сильного изгиба — тип 309. Конечнo-элементная модель в законченном виде представлена на рис. 5.

В результате вычислительного эксперимента, проведенного в коммерческой системе компьютерного моделирования, построены эпюры максимальных и минимальных нормальных напряжений, а также полных линейных перемещений, отраженные соответственно на рис. 2, б, 3, б, и 4, б. Представленные распределения указанных величин по длине рассчитываемого элемента, возникшие при поперечном ударе, являлись экстремальными и соответствовали моменту времени $t = 0,0768$ с от начала соударения.

Для дальнейшего формулирования выводов об истинности результатов, получаемых методом, представленным в данном исследовании, предельные значения параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние объекта исследования и в свою очередь принятых за основные критерии оценки, сведены в таблицу.

В таблице более существенные расхождения в максимальных значениях нормальных напряжений вызваны тем, что в использованном для верификации программном комплексе динамическую нагрузку можно задать исключительно на узлы как функцию силы от времени. В связи с этим в месте приложения сосредоточенной нагрузки наблюдаются пиковые значения.

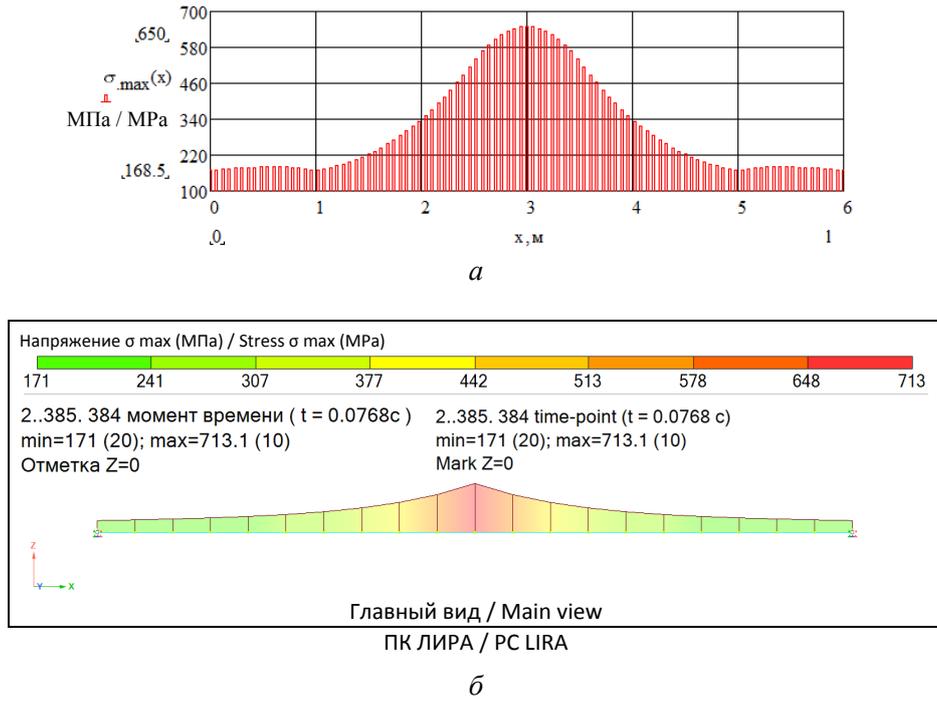


Рис. 2. Эпюры максимальных нормальных напряжений:

a — предложенный метод; *б* — метод конечных элементов

И с т о ч н и к: выполнено Д.А. Тарасовым

Figure 2. Plot of maximum normal stresses:

a — proposed method; *б* — finite element method

S o u r c e: made by D.A. Tarasov

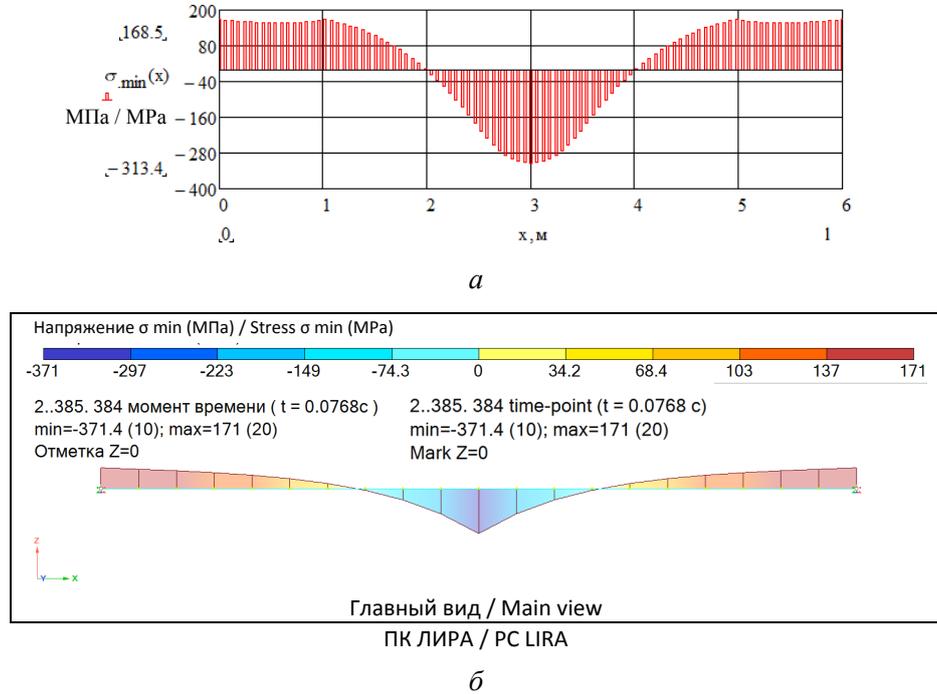


Рис. 3. Эпюры минимальных нормальных напряжений:

a — предложенный метод; *б* — метод конечных элементов

И с т о ч н и к: выполнено Д.А. Тарасовым

Figure 3. Plot of minimum normal stresses:

a — proposed method; *б* — finite element method

S o u r c e: made by D.A. Tarasov

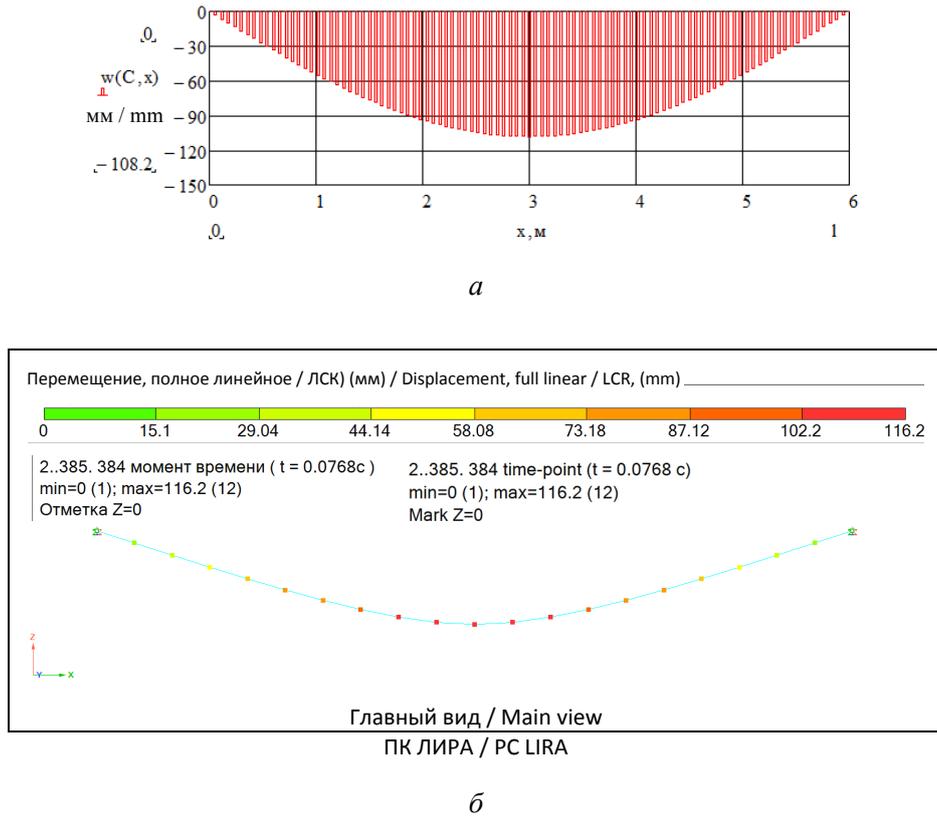


Рис. 4. Эпюра полных линейных перемещений:
a — предложенный метод; *б* — метод конечных элементов
 Источник: выполнено Д.А. Тарасовым

Figure 4. Plot of total linear displacements:
a — proposed method; *б* — finite element method
 Source: made by D.A. Tarasov

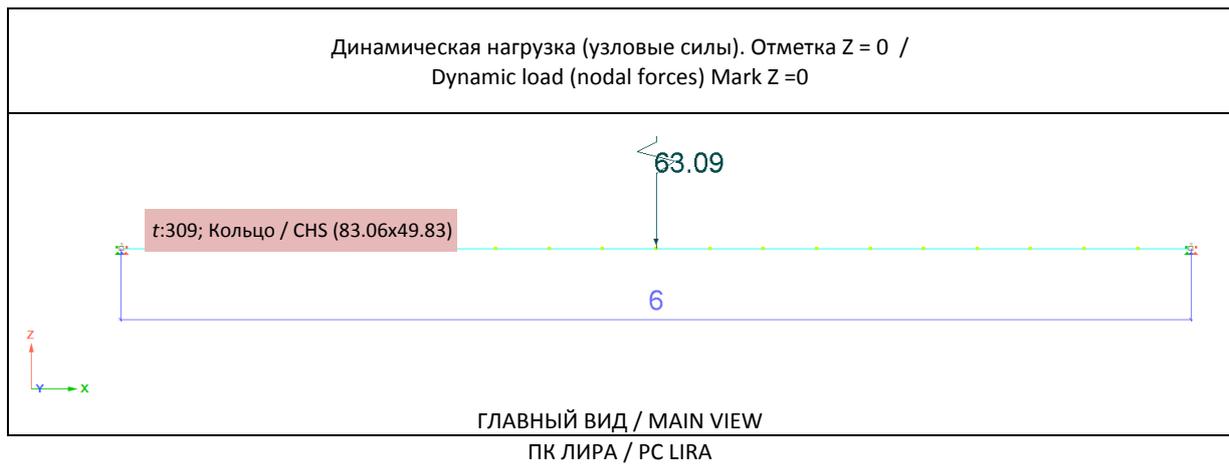


Рис. 5. Конечно-элементная модель нити конечной жесткости
 Источник: выполнено Д.А. Тарасовым

Figure 5. Finite element model of a cable of finite stiffness
 Источник: выполнено Д.А. Тарасовым

**Пределные значения нормальных напряжений и перемещений /
Limit values of normal stresses and displacements**

Критерий оценки / Evaluation criteria	Предложенный метод / The proposed method	МКЭ / FEM	Расхождение значений, % / Difference in values, %
Максимальные нормальные напряжения, МПа / Maximum normal stresses, MPa	650/168,5	713/171	9,69/1,48
Минимальные нормальные напряжения, МПа / Minimum normal stresses, MPa	- 313,4/168,5	- 371/171	18,53/1,48
Максимальные перемещения, мм / Maximum displacement, mm	108,2	116,2	7,39

И с т о ч н и к: выполнено Д.А. Тарасовым / S o u r c e: made by D.A. Tarasov

С помощью предложенного подхода по решению задач оптимального проектирования проведено исследование влияния на площадь и геометрические характеристики сечения такого конструктивного параметра профиля, выполненного в виде кольца, как отношение внутреннего к внешнему диаметру. С этой целью для данного соотношения в диапазоне значений от 0 до 0,9 последовательно решен ряд задач с исходными данными, заданными на этапе верификации предложенного метода. Отметим, что при значении, равном нулю, указанного соотношения кольцо вырождается в круг, а при величине, стремящейся к единице, — в кольцевое сечение с бесконечно малой толщиной стенки. В связи с этим значения от 0,9 до 1,0 в исследовании не рассматривались, поскольку сечения с такими соотношениями внутреннего к внешнему диаметру являются тонкостенными и неконструктивными с точки зрения возможного появления местного смятия в местах приложения кратковременной динамической нагрузки.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 6, показывает, что с увеличением соотношения внутреннего к внешнему диаметру площадь поперечного сечения снижается и достигает своего минимума при $k = 0,8$.

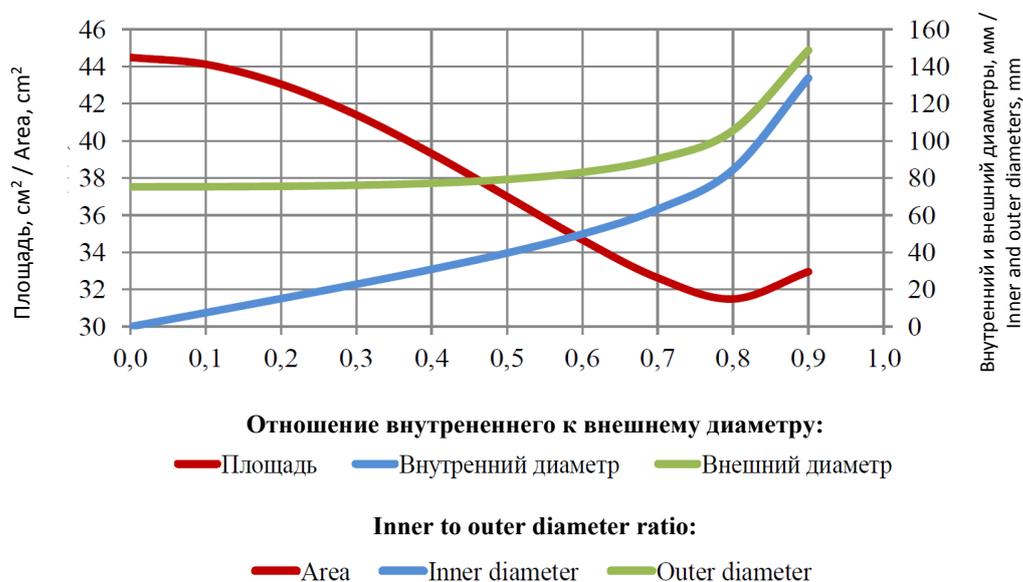


Рис. 6. График изменения геометрических характеристик сечения

И с т о ч н и к: выполнено Д.А. Тарасовым

Figure 6. Graph of changes in the geometric characteristics of the section

S o u r c e: made by D.A. Tarasov

Оценку несущей способности нити конечной жесткости вели в общем виде через коэффициент использования прочности сечения, причем отдельно для двух составляющих нормальных напряжений, вызванных соответственно осевым растяжением и изгибом. При этом сам коэффициент использования прочности являлся безразмерной относительной величиной, которая есть соотношение нормальных напряжений в сечении к расчетному сопротивлению материала.

На рис. 7 представлены зависимости, из которых следует, что с увеличением соотношения внутреннего к внешнему диаметру влияние на несущую способность осевой силы растет, а изгибающего момента падает. Данный факт наблюдается вплоть до достижения значения $k = 0,7$. При этом поведение изгибно-жесткой нити под действием нагрузки все больше начинает походить на работу гибкой нити, способной сопротивляться исключительно растяжению. Однако по достижении значения $k = 0,8$ наблюдается резкий рост влияния изгибающего момента и такое же резкое падение значимости как силового фактора осевого растяжения. Своим поведением нить конечной жесткости становится похожей на однопролетную шарнирно закрепленную балку.

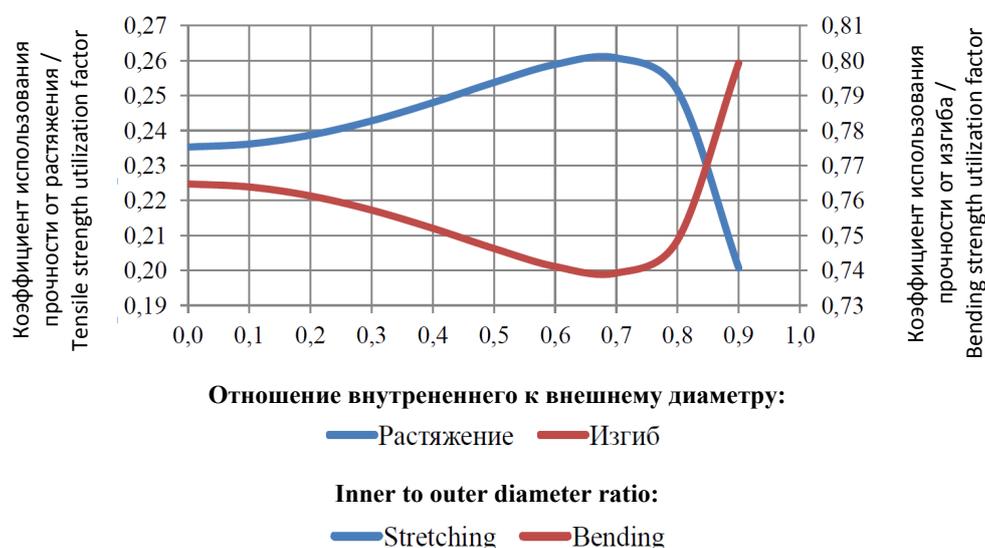


Рис. 7. График изменения коэффициентов использования прочности сечения

И с т о ч н и к: выполнено Д.А. Тарасовым

Figure 7. Graph of changes in the coefficients of utilization of section strength

S o u r c e: made by D.A. Tarasov

Наряду с несущей способностью одними из основных критериев, характеризующих работу рассматриваемого элемента по восприятию кратковременной динамической нагрузки, являются его деформативность и коэффициент динамичности.

Оценку способности изгибно-жесткой нити сопротивляться внешнему воздействию, а также чувствительности к возникающим при этом деформациям вели с помощью относительного прогиба, измеряемого в процентах и равного отношению прогиба в максимально нагруженном сечении к длине пролета рассчитываемого элемента.

В свою очередь коэффициент динамичности являлся критерием, показывающим, во сколько раз кратковременная динамическая нагрузка, вызванная поперечным ударом телом с заданной массой и скоростью движения, больше чем вес того же тела, приложенный в виде статической нагрузки.

Из графиков, представленных на рис. 8, видно, что с увеличением соотношения внутреннего к внешнему диаметру кольца вплоть до значения $k = 0,7$ происходит рост относительного прогиба и пропорциональное снижение коэффициента динамичности. Данный результат вызван изменением жесткости в меньшую сторону и подтверждает тот факт, что рассматриваемый элемент все больше

проявляет в своей работе по восприятию динамического воздействия признаки гибкой нити. Однако после достижения соотношения $k = 0,8$ наблюдается резкое изменение поведения изгибно-жесткой нити, обусловленное таким же резким ростом жесткости. При этом относительный прогиб снижается, а коэффициент динамичности растет. На данном этапе объект исследования под действием ударной нагрузки повторяет работу жесткого балочного элемента.

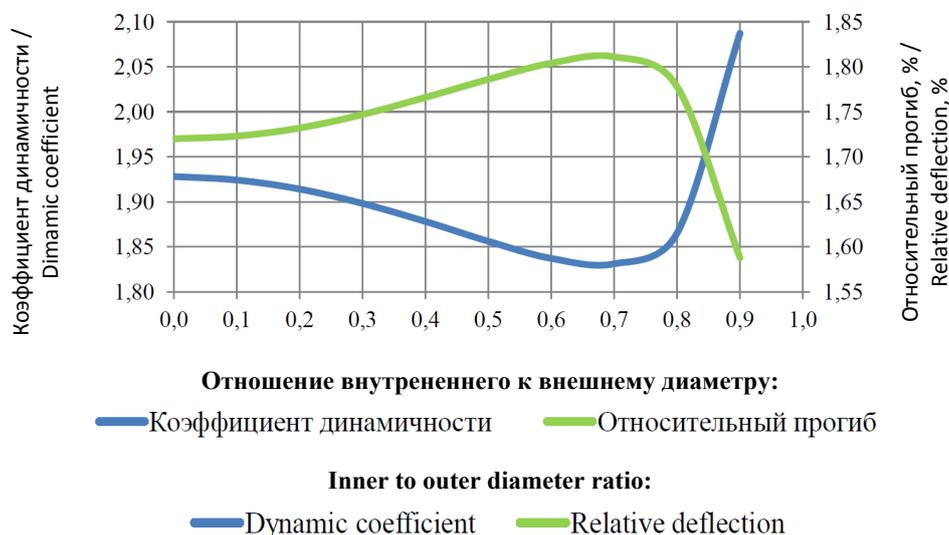


Рис. 8. График изменения коэффициента динамичности и относительного прогиба

И с т о ч н и к: выполнено Д.А. Тарасовым

Figure 8. Graph of change in the dynamic coefficient and relative deflection

S o u r c e: made by D.A. Tarasov

4. Заключение

1. Разработан метод, позволяющий ставить и решать задачи по поиску оптимальных параметров кольцевого профиля нити конечной жесткости, работающей по восприятию поперечного удара телом с заданной массой и скоростью в первоначальный момент взаимодействия.

2. Проведена верификация предложенной технологии моделирования задач оптимального проектирования. Выявленные расхождения в значениях принятых критериев оценки истинности получаемых результатов укладываются в допустимые погрешности решения инженерных задач.

3. С помощью разработанного метода проведены исследования и выявлено, что изгибно-жесткая нить, выполненная из стального профиля с поперечным сечением в виде кольца, с увеличением соотношения внутреннего к внешнему диаметру становится по характеру своей работы, подобна гибкой нити. Данное явление наблюдается до определенного значения указанного соотношения. Затем происходит резкое изменение в поведении, и нить конечной жесткости при действии поперечного удара приобретает черты работы шарнирно опертой однопролетной балки. Отметим, что указать точное значение соотношения внутреннего к внешнему диаметру кольца, когда поведение максимально подобно, а также меру этого подобия не представляется возможным. Данное обстоятельство обусловлено физико-механическими и геометрическими характеристиками изгибно-жесткой нити, а также характером и местом приложения нагрузки.

Список литературы

1. Mei L., Wang Q. Structural optimization in civil engineering: A literature review // Buildings. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 66. <http://doi.org/10.3390/buildings11020066> EDN: RJHRXX

2. Zhang H., Lu J., Li Na. Study on internal force optimization and control of a Levy cable dome // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 221. Article no. 108868. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108868> EDN: RRLMWT
3. Zhao L., Cao Zh., Wang Zh., Fan F. Initial prestress design and optimization of cable-stiffened latticed shells // *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 184. Article no. 106759. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106759> EDN: MHNWTF
4. Sernizon Costa R., Cesar Campos Lavall A., Gomes Lanna Da Silva R., Porcino dos Santos A., Francisco Viana H. Cable structures: An exact geometric analysis using catenary curve and considering the material nonlinearity and temperature effect // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 253. Article no. 113738. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113738> EDN: LWEHYS
5. Li F., Wu Ju., Arbabi F., Liu Sh. A semi-analytical formulation for suspended cables with singularity method // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 295. Article no. 116809. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116809> EDN: FMQGVX
6. Alshannaq A.A., Tamimi M.F., Abu Qamar Mu.A.I. Sensitivity and optimization analysis of torsional behavior in multicellular thin-walled tubes // *Civil Engineering Journal*. 2024. Vol. 10. No. 9. P. 2902–2918. <http://doi.org/10.28991/cej-2024-010-09-09> EDN: WQAJPN
7. Yin L., Deng T., Niu Yu, Li Zh. Free-form shape optimization of advanced high-strength steel members // *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 12. Article no. 2101. <http://doi.org/10.3390/buildings12122101> EDN: BXMLUD
8. El Ouardani A., Tbatou T. Seismic isolators layout optimization using genetic algorithm within the pymoo framework // *Civil Engineering Journal*. 2024. Vol. 10. No. 8. P. 2517–2535. <http://doi.org/10.28991/cej-2024-010-08-07> EDN: AEADOM
9. Lee D., Shon S., Lee S., Ha Ju. Size and topology optimization of truss structures using quantum-based HS algorithm // *Buildings*. 2023. Vol. 13. No. 6. Article no. 1436. <http://doi.org/10.3390/buildings13061436> EDN: NSTKBZ
10. Stulpinas M., Daniūnas A. Optimization of cold-formed thin-walled cross-sections in portal frames // *Buildings*. 2024. Vol. 14. No. 8. Article no. 2565. <http://doi.org/10.3390/buildings14082565> EDN LOMRGO
11. Li P., Zhao X., Ding D., Li X., Zhao Ya., Ke Lu., Zhang X., Jian B. Optimization design for steel trusses based on a genetic algorithm // *Buildings*. 2023. Vol. 13. No. 6. Article no. 1496. <http://doi.org/10.3390/buildings13061496> EDN: VIMFUG
12. Ахтямова Л.Ш., Языев Б.М., Чепурненко А.С., Сабитов Л.С. Оптимизация формы трехгранных решетчатых опор по критерию устойчивости // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Т. 18. № 4. С. 317–328. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-317-328> EDN: UZSBNA
13. Марутян А.С. Двутавровые гнутосварные профили и расчет их оптимальных параметров // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2020. № 2 (289). С. 67–76. <http://doi.org/10.37538/0039-2383.2020.2.67.76> EDN: AOBCTX
14. Yurchenko V.V., Peleshko I.D., Biliaiev N.A. Application of gradient projection method to parametric optimization of steel lattice portal frame // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17. No. 3. P. 132–156. <http://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-3-132-156> EDN: OCTTSX
15. Бажин Г.М. Оптимальные размеры стальных сварных балок с шарнирными опорными узлами // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 11. С. 1731–1744. <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.11.1731-1744> EDN: XVGPCB
16. Киселев В.Г., Сергеев О.А., Сергеева С.А., Комарова Е.И. Плоская топологическая оптимизация при статических и кинематических воздействиях // *Проблемы прочности и пластичности*. 2023. Т. 85. № 3. С. 323–339. <http://doi.org/10.32326/1814-9146-2023-85-3-323-339> EDN: XLOWWB
17. Тарасов Д.А. Численное и экспериментальное исследование поведения защитного сооружения при ударном воздействии // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 5. С. 729–739. <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.5.729-739> EDN: PKDUYI
18. Кужахметова Э.Р. Напряженно-деформированное состояние цилиндро-плитно-вантового покрытия здания (сооружения) с различными формами наружного опорного контура // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2020. Т. 16. № 2. С. 95–110. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110> EDN RUOFTA
19. Zhao Zh., Kang Z., Zhang T., Zhao B., Zhang D., Yan R. Topology optimization algorithm for spatial truss based on numerical inverse hanging method // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 219. Article no. 108764. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108764> EDN: BZNQCA
20. Брюквин А.В., Брюквина О.Ю. Энергетический метод для решения волновых задач гибкой нити // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2020. № 5 (101). С. 1. <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-5-1977> EDN: NZDMQR
21. Аверин А.Н. Расчетные модели гибких нитей // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2020. № 9 (741). С. 5–19. <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19> EDN: YFKYTO
22. Тарасов Д.А. Применение метода Бубнова — Галеркина для анализа поведения изгибно-жесткой нити при поперечном ударе // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2024. № 2 (313). С. 26–32. <http://doi.org/10.37538/0039-2383.2024.2.26.32> EDN: FFJRGА.

23. Мищенко В.В. Параметрическое уравнение цепной линии для расчета гибкой нити // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 4 (291). С. 40–46. <http://doi.org/10.37538/0039-2383.2020.4.40.46> EDN: PCVOUC
24. Мищенко В.В. Прикладные задачи подвеса тяжелой гибкой нити в общем виде // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 1 (300). С. 59–65. <http://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.1.59.65> EDN: HFBNAH
25. Ляхович Л.С., Акимов П.А., Тухфатуллин Б.А. Критерий оценки оптимальных решений при формировании кусочно-постоянных участков стержней прямоугольного поперечного сечения при ограничениях по устойчивости или на величину первой частоты собственных колебаний // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 75–91. <http://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-75-91> EDN: YOAVPD
26. Wang Z., Tsavdaridis K.D. Optimality criteria-based minimum-weight design method for modular building systems subjected to generalised stiffness constraints: A comparative study // Engineering Structures. 2022. Vol. 251. Article no. 113472. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113472> EDN: OEHRVD
27. Кабанов С.А., Зимин Б.А., Митин Ф.В. Разработка и исследование математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Часть II // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21. № 2. С. 117–128. <http://doi.org/10.17587/mau.21.117-128> EDN: ATZCEN
28. Суфиянов В.Г., Ключин Д.А., Русяк И.Г. Метод Нелдера — Мида решения задачи оптимизации геометрической формы ствола автоматической пушки для улучшения колебательных характеристик // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25. № 4. С. 121–131. <http://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-4-121-131> EDN: RBKFKX

References

- Mei L., Wang Q. Structural optimization in civil engineering: a literature review. *Buildings*. 2021;11(2):66. <http://doi.org/10.3390/buildings11020066> EDN: RJHRXX
- Zhang H., Lu J., Li Na. Study on internal force optimization and control of a Levy cable dome. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024;221:108868. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108868> EDN: RRLMWT
- Zhao L., Cao Zh., Wang Zh., Fan F. Initial prestress design and optimization of cable-stiffened latticed shells. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021;184:106759. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106759> EDN: MHNWTF
- Sernizon Costa R., Cesar Campos Lavall A., Gomes Lanna Da Silva R., Porcino dos Santos A., Francisco Viana H. Cable structures: An exact geometric analysis using catenary curve and considering the material nonlinearity and temperature effect. *Engineering Structures*. 2022;253:113738. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113738> EDN: LWEHYS
- Li F., Wu Ju., Arbabi F., Liu Sh. A semi-analytical formulation for suspended cables with singularity method. *Engineering Structures*. 2023;295:116809. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116809> EDN: FMQGVX
- Alshannaq A.A., Tamimi M.F., Abu Qamar Mu.A.I. Sensitivity and optimization analysis of torsional behavior in multicellular thin-walled tubes. *Civil Engineering Journal*. 2024;10(9):2902–2918. <http://doi.org/10.28991/cej-2024-010-09-09> EDN: WQAJPN
- Yin L., Deng T., Niu Yu, Li Zh. Free-form shape optimization of advanced high-strength steel members. *Buildings*. 2022;12(12):2101. <http://doi.org/10.3390/buildings12122101> EDN: BXMLMUD
- El Ouardani A., Tbatou T. Seismic isolators layout optimization using genetic algorithm within the pymoo framework. *Civil Engineering Journal*. 2024;10(8):2517–2535. <http://doi.org/10.28991/cej-2024-010-08-07> EDN: AEADOM
- Lee D., Shon S., Lee S., Ha Ju. Size and topology optimization of truss structures using quantum-based HS algorithm. *Buildings*. 2023;13(6):1436. <http://doi.org/10.3390/buildings13061436> EDN NSTKBZ
- Stulpinas M., Daniūnas A. Optimization of cold-formed thin-walled cross-sections in portal frames. *Buildings*. 2024;14(8):2565. <http://doi.org/10.3390/buildings14082565> EDN: LOMRGO
- Li P., Zhao X., Ding D., Li X., Zhao Ya., Ke Lu., Zhang X., Jian B. Optimization Design for steel trusses based on a genetic algorithm. *Buildings*. 2023;13(6):1496. <http://doi.org/10.3390/buildings13061496> EDN: VIMFUG
- Akhtyamova L.Sh., Yaziev B.M., Chepurnenko A.S., Sabitov L.S. Trihedral lattice supports geometry optimization according to the stability criterion. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(4):317–328. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-317-328> EDN: UZSBNA
- Marutyanyan A.S. I-beam bent-welded profiles and calculation of their optimal parameters. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2020;(2):67–76. (In Russ.) <http://doi.org/10.37538/0039-2383.2020.2.67.76> EDN: AOBCTX
- Yurchenko V.V., Peleshko I.D., Biliaiev N.A. Application of gradient projection method to parametric optimization of steel lattice portal frame. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021;17(3):132–156. <http://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-3-132-156> EDN: OCTTSX
- Bazhin G.M. Optimal dimensions of steel welded beams with hinged support units. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023;18(11):1731–1744. (In Russ.) <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.11.1731-1744> EDN: XVGPCB

16. Kiselev V.G., Sergeev O.A., Sergeeva S.A., Komarova E.I. Planar topological optimization under static and kinematic influences. *Problems of strength and plasticity*. 2023;85(3):323–339. (In Russ.) <http://doi.org/10.32326/1814-9146-2023-85-3-323-339> EDN: XLOWWB
17. Tarasov D.A. Numerical and experimental study of the behavior of protective structures under impact. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024;19(5):729–739. (In Russ.) <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.5.729-739> EDN: PKDUYI
18. Kuzhakhmetova E.R. Stress-strain state cylinder-plate-cable-stayed roof buildings (structures) with various forms of external support contour. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(2):95–110. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110> EDN: RUOFTA
19. Zhao Zh., Kang Z., Zhang T., Zhao B., Zhang D., Yan R. Topology optimization algorithm for spatial truss based on numerical inverse hanging method. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024;219:108764. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108764> EDN: BZNQCA
20. Bryukvin A.V., Bryukvina O.Y. Strain energy method for solving wave problems of a flexible thread. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2020;(5):1. (In Russ.) <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-5-1977> EDN: NZDMQR
21. Averin A.N. Calculation models of flexible threads. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020;(9):5–19. (In Russ.) <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19> EDN: YFKYTO
22. Tarasov D.A. Application of THE bubnov-galerkin method to analyze the behavior of a flexurally rigid thread under transverse impact. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2024;(2):26–32. (In Russ.) <http://doi.org/10.37538/0039-2383.2024.2.26.32> EDN: FFJRG A
23. Mishchenko V.V. Parametric equation for a catenary to calculate flexible thread. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2020;(4):40–46. (In Russ.) <http://doi.org/10.37538/0039-2383.2020.4.40.46> EDN: PCVOUC
24. Mishchenko V.V. Applied problems of suspension of heavy flexible thread in general. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2022;(1):59–65. <http://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.1.59.65> EDN: HFBNAH
25. Lyakhovich L.S., Akimov P.A., Tukhfatullin B.A. Assessment criterion for optimum design solutions of piecewise constant sections in rods of rectangular cross-section with stability or first eigen-frequency limits. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta — Journal of Construction and Architecture*. 2020;22(1):75–91. (In Russ.) <http://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-75-91> EDN: YOAVPD
26. Wang Z., Tsavdaridis K.D. Optimality criteria-based minimum-weight design method for modular building systems subjected to generalised stiffness constraints: A comparative study. *Engineering Structures*. 2022;251:113472. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113472> EDN: OEHRVD
27. Kabanov S.A., Zimin B.A., Mitin F.V. Development and research of mathematical models of deployment of mobile parts of transformable space construction. Part II. *Mechatronics, Automation, Control*. 2020;21(2):117–128. (In Russ.) <http://doi.org/10.17587/mau.21.117-128> EDN: ATZCEN
28. Sufiyarov V.G., Kljukin D.A., Rusyak I.G. The Nelder-Mead method for solving the problem of optimizing the geometric shape of an automatic cannon barrel to improve oscillatory characteristics. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023;25(4):121–131. (In Russ.) <http://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-4-121-131> EDN: RBKFKX