

УДК 624.071.22:531.62

DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0007

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГИБКОЙ НИТИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОПЕРЕЧНОГО УДАРА

© 2021

Тарасов Денис Александрович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматизированные системы безопасности»

Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: tarasov.denis.penza@gmail.com)

Коновалов Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология машиностроения»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru)

Данилов Александр Леонидович, инженер-электрик

ООО «Радиорубеж»

(440052, Россия, Пенза, ул. Гоголя, д. 60, e-mail: danilov_al@radiatorubezh.ru)

Бобылев Анатолий Иванович, доцент кафедры «Физика и математика»

Пензенский государственный аграрный университет

(440014, Россия, Пенза, ул. Ботаническая, д. 30, e-mail: bobylev.anatoly@mail.ru)

Аннотация. В настоящее время известные методы расчета, например метод конечных элементов, нацелены на проверку уже существующих конструкций и малопригодны при создании вновь проектируемых систем. Иначе говоря, существующие методы решают прямую задачу и не позволяют решить обратную или задачу выбора. Целью данной работы является разработка метода ориентированного на решение задачи подбора в частности целенаправленного выбора из бесчисленного множества возможных пар массы и скорости ударяющего тела, удовлетворяющих условию прочности гибкой нити. Этот подход позволит разработчику противотаранных устройств легко скорректировать требования по массе и скорости, предъявляемые к изделию при остановке транспортного средства, пытающегося прорваться на охраняемую территорию. Объектом исследования выступают основные силовые элементы механических систем, обеспечивающие общую прочность конструкции, для которых расчетной моделью служит гибкая нить. Предметом исследования является метод по определению области несущей способности гибкой нити при действии поперечной кратковременной динамической нагрузки. Приведен пример построения области несущей способности для гибкой нити с заданными физическими и геометрическими характеристиками.

Ключевые слова: область несущей способности, гибкая нить, удар, напряжения, деформации, геометрическая нелинейность.

DETERMINATION OF THE REGION OF CARRYING CAPACITY OF A FLEXIBLE THREAD DURING ACTION CROSS IMPACT

© 2021

Tarasov Denis Aleksandrovich, candidate of Technical Sciences,
associate professor of the Department "Automated security systems"

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya st., 40, e-mail: tarasov.denis.penza@gmail.com)

Kononov Vladimir Viktorovich, doctor of Technical Sciences, professor,
professor of the Department of Mechanical Engineering

Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, Baydukov proezd / Gagarina st., 1a / 11, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru)

Danilov Alexander Leonidovich, electrical engineer

LLC "Radioorubezh"

(440052, Russia, Penza, Gogol st., 60, e-mail: danilov_al@radiatorubezh.ru)

Bobylev Anatoly Ivanovich, associate professor of the Department of Physics and Mathematics
Penza State Agrarian University

(440014, Russia, Penza, Botanicheskaya st., 30, e-mail: bobylev.anatoly@mail.ru)

Abstract. At present, well-known calculation methods, for example, the finite element method, are aimed at checking existing structures and are of little use for creating newly designed systems. In other words, the existing methods solve the direct problem and do not allow solving the inverse or the choice problem. The purpose of this work is to develop a method for solving the problem of selection, in particular, a targeted choice from an infinite set of possible pairs of mass and velocity of the striking body that satisfy the condition of the strength of a flexible thread. This approach will allow the developer of anti-ram devices to easily adjust the weight and speed requirements for the product when a vehicle stops trying to break into a protected area. The object of the research is the main load-bearing elements of mechanical systems

that provide the overall strength of the structure, for which a flexible thread serves as a design model. The subject of the research is a method for determining the area of the bearing capacity of a flexible thread under the action of a transverse short-time dynamic load. An example of constructing a bearing capacity region for a flexible thread with given physical and geometric characteristics is given.

Keywords: area of bearing capacity, flexible thread, impact, stresses, deformations, geometric nonlinearity.

Введение. Известные методы расчета направлены на проверку конструкции, а именно оценку уже существующего конструктивного решения и не позволяют ставить задачи по поиску одного из возможных вариантов. Так, при расчете в коммерческих программных комплексах, в основу которых положен метод конечных элементов, предварительно необходимо знать граничные условия, а также в полной мере геометрические и физико-механические характеристики рассчитываемой конструкции, а кроме того нагрузку, вызывающую внутренние усилия и деформации в ее элементах [1]. В рассматриваемом случае нагрузка задается в виде импульса, а объектом исследования являются основные силовые элементы механических систем, для которых в качестве расчетной схемы служит гибкая нить, воспринимающая указанную нагрузку [2].

Целью данной работы является разработка метода определения области несущей способности гибкой нити при действии поперечного удара, ориентированного на решение задачи подбора в частности целенаправленного выбора из бесчисленного множества возможных пар массы и скорости ударяющего тела, удовлетворяющих условию прочности рассматриваемого элемента [3]. В качестве примера, такой подход в случае необходимости позволит разработчику противотаранных устройств легко скорректировать требования по массе и скорости, предъявляемые к изделию при остановке транспортного средства, пытающегося прорваться на охраняемую территорию объекта [4, 5, 6].

Материалы и результаты исследования. Рассмотрим гибкую нить, работающую по восприятию инерционной нагрузки, возникающей вследствие удара горизонтально движущимся телом. Расчетная модель представлена на рисунке 1 [7, 8, 9].

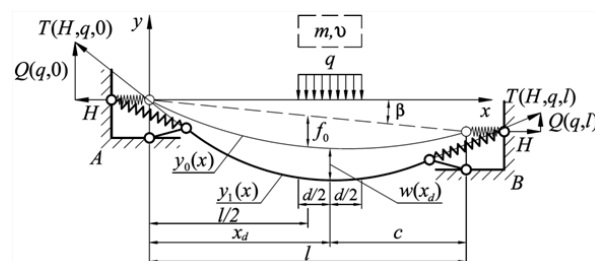


Рисунок 1 - Расчетная модель гибкой нити:

— начальное состояние линии равновесия;
— конечное состояние линии равновесия.

Несущая способность гибкой нити является характеристикой, которая выражается величиной нагрузки, соответствующей значению, вызывающему предельное состояние по прочности рассматриваемого эле-

мента.

Условие прочности, предъявляемое к гибкой нити, записывается в виде неравенства, функционально зависящего от величин инерционной нагрузки и распора, возникающего в рассчитываемой системе вследствие ее действия:

$$T(H, q, x_1) \leq [\sigma] \cdot A, \quad (1)$$

где $T(H, q, x_1)$ – значение функции продольного усилия в сечении с заданной абсциссой x_1 , Н; H – распор, горизонтальная проекция опорной реакции в точках крепления, Н; q – поперечная равномерно-распределенная нагрузка, являющаяся эквивалентом силы инерции, Н/м; $[\sigma]$ – предельно допустимое напряжение материала, Па; A – площадь поперечного сечения, м².

Распор и инерционная нагрузка являются параметрами функции, поскольку к моменту нахождения продольного усилия их значения не определены.

Изменение величины продольного усилия по длине гибкой нити находится по формуле [10]:

$$T(H, q, x) = \sqrt{H^2 + (Q(q, x) + H \cdot \operatorname{tg} \beta)^2}, \quad (2)$$

где x – текущая абсцисса ($0 \leq x \leq l$), м; $Q(q, x)$ – функция поперечной силы от действия инерционной нагрузки в балке пролетом l , имеющей по концам цилиндрические неподвижные опоры, Н; β – угол наклона хорды АВ, соединяющей точки крепления, град.

Функции внутренних усилий, возникающих при действии внешних силовых факторов в балке пролетом l , имеющей по концам цилиндрические неподвижные опоры, можно записать в виде:

$$Q(q, x) = \frac{q \cdot d \cdot c}{l} \cdot (x \geq 0) -$$

$$- q \cdot \left[x - \left(x_d - \frac{d}{2} \right) \right] \cdot \left(x > x_d - \frac{d}{2} \right) +$$

$$+ q \cdot \left[x - \left(x_d + \frac{d}{2} \right) \right] \cdot \left(x > x_d + \frac{d}{2} \right); \quad (3)$$

$$M(q, x) = \frac{q \cdot d \cdot c}{l} \cdot x \cdot (x \geq 0) -$$

$$- q \cdot \frac{\left[x - \left(x_d - \frac{d}{2} \right) \right]^2}{2} \cdot \left(x > x_d - \frac{d}{2} \right) +$$

$$+ q \cdot \frac{\left[x - \left(x_d + \frac{d}{2} \right) \right]^2}{2} \cdot \left(x > x_d + \frac{d}{2} \right), \quad (4)$$

где d – ширина зоны контакта, м; c – расстояние от центра зоны контакта до опоры В, м; x_d – абсцисса центра зоны контакта, м; $M(q, x)$ – функция изгибающего момента, Н×м.

Для нахождения распора и инерционной нагрузки воспользуемся вторым разрешающим уравнением.

Данным уравнением является условие неразрывности деформаций в гибкой нити [11]:

$$L_0 + \Delta L(H, q) = L_1(H, q), \quad (5)$$

где L_0 – начальная длина, м; $\Delta L(H, q)$ – упругая деформация, м; $L_1(H, q)$ – конечная длина, м.

Далее запишем выражения по определению всех членов, составляющих уравнение неразрывности деформаций.

Первоначальная длина гибкой нити равна [12]:

$$L_0 = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} y_0(x) \right)^2} dx, \quad (6)$$

где $y_0(x)$ – кривая начального очертания, м; l – пролет, м.

Кривая начального очертания с достаточной степенью точности может быть описана уравнением параболы [13]:

$$y_0(x) = \frac{4 \cdot f_0}{l^2} \cdot x^2 - \frac{4 \cdot f_0}{l} \cdot x + x \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (7)$$

где f_0 – стрела провеса от действия собственного веса в середине пролета, м.

Величина упругих деформаций определяется по выражению, полученному в ранее опубликованных работах [13]:

$$\Delta L(H, q) = \frac{H}{E \cdot A} \cdot \int_0^l \left[1 + \left(\frac{Q(q, x)}{H} + \operatorname{tg} \beta \right)^2 \right] dx, \quad (8)$$

где E – модуль упругости, Па.

Длина гибкой нити в деформированном состоянии определяется по формуле [13]:

$$L_1(H, q) = \int_0^{l-u} \sqrt{1 + \left(\frac{Q(q, x)}{H} + \operatorname{tg} \beta \right)^2} dx, \quad (9)$$

где u – горизонтальное смещение опор, м.

После того как все члены уравнения неразрывности деформаций записаны в явном виде, с помощью численного метода сопряженных градиентов можно решить систему, состоящую из выражений (1) и (5), тем самым найдя значения распора и инерционной нагрузки.

С целью определения несущей способности, как функциональной зависимости от параметров массы и скорости ударяющего тела, воспользуемся законом сохранения энергии. Предположим, что кинетическая энергия движущегося тела в результате взаимодействия с гибкой нитью полностью переходит в работу по ее деформации с учетом кинематических перемещений [4]:

$$\Delta \left(\frac{m \cdot v^2}{2} \right) = \frac{1}{2} \cdot q(m, v) \cdot \int_{x_d - \frac{d}{2}}^{x_d + \frac{d}{2}} w(x) dx, \quad (10)$$

где m – масса ударяющего тела, кг; v – скорость ударяющего тела, м/с; $w(x)$ – функция прогиба, м.

После преобразования получим:

$$q(m, v) = \frac{\Delta \left(\frac{m \cdot v^2}{2} \right)}{\int_{x_d - \frac{d}{2}}^{x_d + \frac{d}{2}} w(x) dx}. \quad (11)$$

В свою очередь прогиб нити является функцией от абсциссы и численно равен [15]:

$$w(x) = y_1(x) - y_0(x), \quad (12)$$

$y_1(x)$ – кривая деформированного состояния, м.

Кривая деформированного состояния нити описывается выражением [15]:

$$y_1(x) = \frac{M(q, x)}{H} + x \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (13)$$

В качестве примера рассмотрим первоначально прямолинейную гибкую нить с опорами расположенными на одном уровне, пролетом $l=8$ м, сечением $A=0,00151024$ м², выполненную из материала с модулем упругости $E=147050$ МПа и пределом прочности $[\sigma]=1570$ МПа. Опоры представляют собой односторонние связи с учетом выбора зазора $u=0,2$ м. Контакт с ударяющим телом происходит посередине пролета $x_d=4$ м при ширине зоны взаимодействия $d=1$ м.

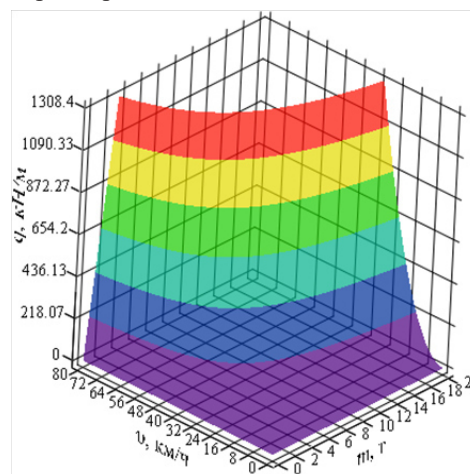


Рисунок 2 – Область несущей способности гибкой нити q , кН/м, от массы ударяющего тела m , кг, и его скорости v , км/ч

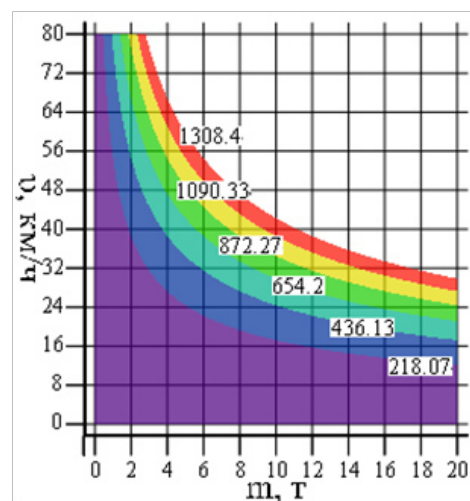


Рисунок 3 – Линии уровня области несущей способности гибкой нити q , кН/м

С помощью предложенного метода построим поверхность несущей способности в координатах «масса – скорость» ударяющего тела. Знание границ данной поверхности позволит легко определить значение динамической нагрузки, приводящей к наступлению

предельного состояния и как следствие обрыву нити. Предельное состояние наступает в том случае, когда точка с парой значений координат массы и скорости ударяющего тела попадает за границу области несущей способности [16].

Заключение. В работе предложен метод по определению области несущей способности гибкой нити при действии поперечной кратковременной динамической нагрузки. В качестве примера, для нити с заданными физическими и геометрическими характеристиками построена поверхность несущей способности. Границами данной поверхности явились: по оси аппликат – условие прочности максимально нагруженного сечения при действии продольного усилия в гибкой нити, по оси абсцисс – предельно допустимое значение массы ударяющего тела, а по оси ординат, соответственно, его скорости. Кривые, образующие границы, позволили получить графическое изображение области несущей способности в параметрах «масса – скорость» ударяющего тела. Внутри полученной области, расположены точки с допустимыми парами указанных параметров. Пара параметров считается допустимой в том случае, когда коэффициент использования прочности сечения меньше или равен единице. При этом значение коэффициента показывает, каков запас прочности максимально нагруженного сечения гибкой нити, расположенного на опоре [17, 18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. - 4-е изд., перераб. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
2. Тарасов, Д.А. Конструкция защитного сооружения от удара для железнодорожных поездов / Д.А. Тарасов, В.В. Коновалов, В.Ю. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1 (18). – С. 111-117.
3. Свидетельство № 2021611428 РФ. Программа определения области несущей способности гибкой нити в параметрах масса-скорость ударяющего тела / Тарасов Д.А., Косяков П.А., Данилов А.Л., Шаповал О.Л. – № 2021610379; заявл. 15.01.2021; опублик. 27.01.2021, Бюл. № 2. – 1 с.
4. Патент № 2694376 РФ. Противотаранные откатные ворота / Кодоров А.А., Тарасов Д.А., Большаков Г.С., Васильев И.В., Шаповал О.Л. – № 2019102145; заявл. 24.12.2018; опублик. 12.07.2019, Бюл. № 20. – 12 с.
5. Патент № 2621774 РФ. Противотаранный барьер / Тарасов Д.А., Косяков П.А., Шалашилин Н.А., Шаповал О.Л. – № 2015145382; заявл. 20.10.2015; опублик. 25.06.2017, Бюл. № 16. – 11 с.
6. Патент № 2668118 РФ. Габион / Васильев И.В., Сигаев В.А., Тарасов Д.А., Шаповал О.Л. – № 2017140743; заявл. 22.11.2017; опублик. 26.09.2018, Бюл. № 27. – 11 с.
7. Тарасов, Д.А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния гибких нитей с учетом физической нелинейности / Д.А. Тарасов, Д.Ю. Семенов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 3 (23). – С. 175-185.
8. Говорок, Д.В. Анализ закономерностей перемещений висячих систем на примере свободно висящей нити на двух опорах / Д.В. Говорок, К.А. Фролов // Инновации и инвестиции. -202. - №6. – С. 251-253.
9. Коновалов, В.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния гибкой нити при действии поперечного удара / В.В. Коновалов, Д.А. Тарасов, В.Ю. Зайцев, Ю.В. Родионов // В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. В 2-х томах. Под редакцией С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. – 2019. – С. 313-317.
10. Кужахметова, Э.Р. Методы расчета вант и вантовых конструкций / Э.Р. Кужахметова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – №2. – С. 39-48.
11. Кужахметова, Э. Р. Расчет вант с учетом геометрической и физической нелинейности / Э. Р. Кужахметова // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2019. – № 55. – С. 252–266.
12. 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 экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 98–110.
13. V. Kononov, D. Tarasov, V. Zaitsev and Y. Rodionov, "Mathematical Modeling of the Stress-Strain State of a Flexible Thread under the Action of Transverse Impact," 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia, 2019, pp. 470-474.
14. Осипенко, М.А. Задача об одностороннем контакте гибкой нерастяжимой нити и твердого тела / М.А. Осипенко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2015. – №1(33). – С. 82-87.
15. Перетрухин, Д.С. Исследование зависимости провеса каната от усилия его натяжения / Д.С. Перетрухин, А.А. Феденев, Ю.И. Калинин // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2019. – №1. – С. 170-175.
16. Электронный СПравочник Инженера [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Лира сервис. URL: <https://www.liraland.ru/espril/> (дата обращения 24.03.2021).
17. Справочная информация [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании SCAD soft. URL: https://scadsoft.com/help/Kristall/ru/index.htm#t=Kristall11049_rtf%2FIntroduction.htm (дата обращения 24.03.2021).
18. Load-Bearing Capacity Area as an Interactive Analysis Tool in SCAD Office Igor Gavrilenko, Sergij Girenko, Anatoly Perelmutter Michail Perelmutter, Vitalina Yurchenko SCAD Soft, Kyiv, Ukraine [Электронный ресурс] // URL: <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2018/09/Load-Bearing-Capacity-Area-as-Interactive-Analysis-Tool-in-SCAD-Office.pdf> (дата обращения 24.03.2021).

Статья поступила в редакцию 26.03.2021

Статья принята к публикации 16.06.2021