

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КАНАТА ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Таштанбаева В.О., Борукеев Т.С., Козубай И.

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан

Ключевые слова: стальной канат, натяжение, энергия, деформация, перемещение, деформированное состояние, температура.

Аннотация. В данной статье приводятся результаты моделирования распределения температуры в элементарном участке с максимальным натяжением стальной проволоки каната 12 Г-В-Н-Р-1770 ГОСТ 3077-80 российского производства АО «Белорецкий металлургический комбинат Мечел». Численные эксперименты показали, что зная напряжение и деформацию можно определить теплоту деформации при одноосном растяжении. Рассматривается элементарный участок проволоки стального каната цилиндрической формы с максимальным значением силы натяжения. Находятся перемещения, деформация и напряжения экстремальной точки для определения тепловой энергии деформации. Приводятся математические модели процесса растяжения конструкций, алгоритмы и примеры расчёта в MATLAB.

NUMERICAL CALCULATIONS OF ROPE TEMPERATURE CHANGES UNDER UNIAXIAL TENSION

Tashtanbayeva V.O., Borukeev T.S., Kozubai I.

Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan

Keywords: steel rope, tension, energy, deformation, displacement, deformed state, temperature.

Abstract. This article presents the results of modeling the temperature distribution in the elementary section with the maximum tension of the steel wire rope 12 G-V-N-R-1770 GOST 3077-80 of the Russian production of JSC Beloretsk Metallurgical Combine Mechel. Numerical experiments have shown that knowing the stress and strain, it is possible to determine the heat of deformation under uniaxial tension. An elementary section of a cylindrical steel rope wire with a maximum value of the tension force is considered. Displacements, deformations and stresses of the extreme point are found to determine the thermal energy of deformation. Mathematical models of the process of stretching structures, algorithms and calculation examples in MATLAB are given.

Рассмотрим натяжение проволоки стального каната 12 Г-В-Н-Р-1770 ГОСТ 3077-80 российского производства АО «Белорецкий металлургический комбинат Мечел» [1] диаметром $d=1$ мм под действием силы натяжения подъемной установки при подъеме. Рассматриваемое напряженно-деформированное состояние элементарного участка проволоки dl показана на рисунке 1.

Положение любой точки в цилиндрической системе координат задается в виде рисунка 2 [2]. Координаты начального состояния задаём в виде:

$$x=r\cos\varphi, y=r\sin\varphi, z=h \quad (r \geq 0, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, 0 < h < l). \quad (1)$$

При растяжении сплошного цилиндрического тела (проволоки) переменной силой $F(t)$, все точки начинают перемещаться относительно систем координат (рис. 3) [3-6].

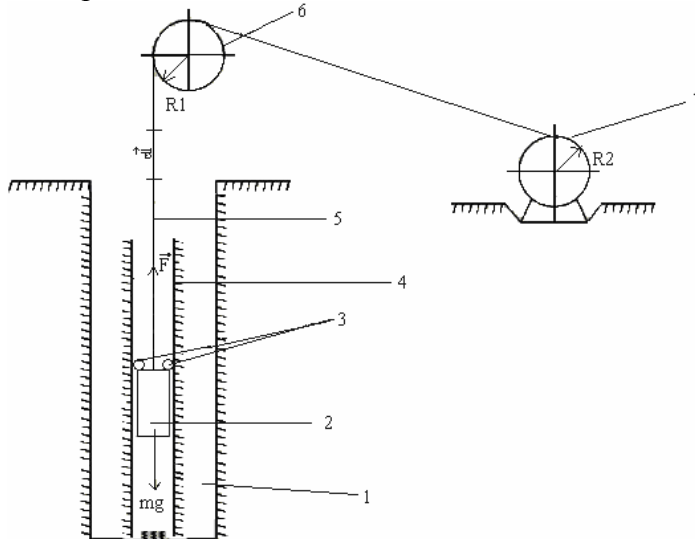


Рис. 1. Схема лифта в стволе шахты: 1 – ствол шахты; 2 – лифт; 3 – препятствие; 4 – направляющие 5 – стальной канат; 6 – шкив; 7 – барабан

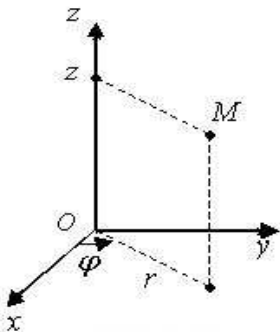


Рис. 2. Положение точки в цилиндрической системе координат

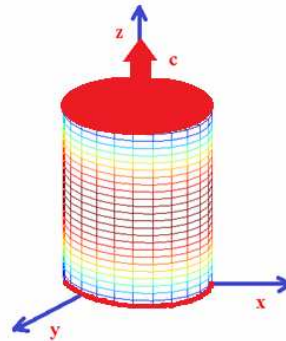


Рис. 3. Растяжение каната переменной силой

Согласно классической теории упругости, тензор перемещения в цилиндрической системе координат запишем в виде формулы (2). Боковые грани проволоки стального каната при растяжении изменяется по квадратичной зависимости. Для этого вводим коэффициенты a_1 , a_2 и a_0 .

$$\begin{cases} u_1 = u_0(1) + c(t) \cdot R \cdot \cos(\theta) \cdot (a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0), \\ u_2 = u_0(2) + c(t) \cdot R \cdot \sin(\theta) \cdot (a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0), \\ u_3 = u_0(3) + c(t) \cdot z, \end{cases} \quad (2)$$

где $c(t)$ – коэффициент пропорциональности, равный

$$F_{pac} = -c(t) \cdot F_i. \quad (3)$$

Элементарная работа при одноосном растяжении по вертикальной оси z определяется как интеграл

$$A_{pac} = \int_0^h F_{pac} \cdot dz. \quad (4)$$

В теории деформаций компоненты u_i и e_i считаются малыми и компоненты тензора e_{ij} и вектора u_{ij} связаны формулами Коши, которые имеют вид:

$$\varepsilon_{i,j} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial u_2}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial u_3}{\partial z} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Совместно решая уравнения (2) и (5), получим следующее уравнение:

$$\varepsilon_{i,j} = c(t) \begin{pmatrix} \cos(0) \cdot (a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0) & 0 & 0 \\ 0 & 2 \cos(0) \cdot (a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Рассмотрим деформированное состояние цилиндрического тела, тогда работа силы растяжения можно записать в виде:

$$A_{pac} = \int \frac{E}{\pi R^2} \cdot c(t) \cdot dz. \quad (7)$$

Теплота деформации Q и напряжение при одноосном растяжении σ_i связаны следующим образом:

$$Q = \int T \cdot z \cdot a \cdot d\sigma. \quad (8)$$

По закону сохранения энергии получим уравнение относительно температуры:

$$T = \frac{1}{\pi \cdot R^2 \cdot \alpha} \cdot \frac{\ln(z)}{\ln(E \cdot c(t))}, \quad (9)$$

где α – температурный коэффициент расширения материала, R – радиус проволоки, E – модуль упругости материала, z – длина проволоки.

Рассмотрим проволоку стального каната с модулем упругости $E = 210 \cdot 10^3$ МПа [4] и температурным коэффициентом расширения $\alpha = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [5].

Для согласования с экспериментальными данными вводим коэффициент коррективы $G = 10^{11}$.

Теперь можно получить изменение температуры в зависимости изменения нагрузки через ввод данных в программу MATLAB. Полученные результаты показаны в таблице 1 и на рисунке 4.

Табл. 1. Показатели температуры при изменении нагрузки

c	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$T, ^\circ\text{C}$	18.0000	19.0684	19.0382	19.0212	19.0095	19.0007	18.9935	18.9876	18.9825	18.9780	18.9741

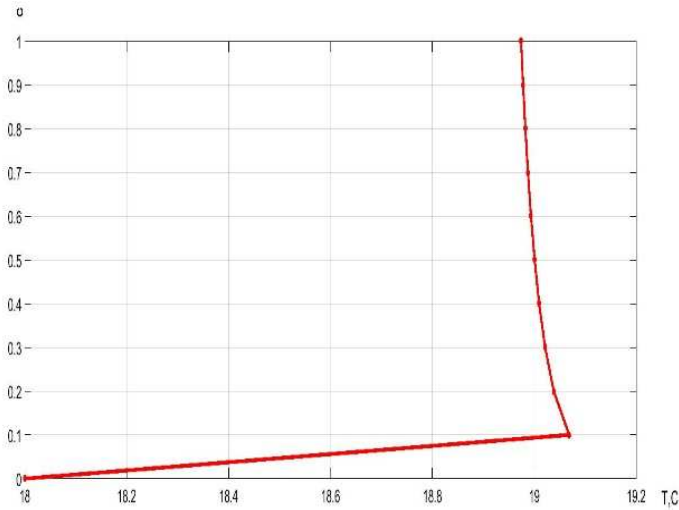


Рис. 4. Изменение температуры

На рисунках 5-8 показаны распределение температуры по объему при различных значениях внешней силы натяжения [7].

Аналогичным образом можно получить значения распределения температуры при различных значениях растягивающей силы [4].

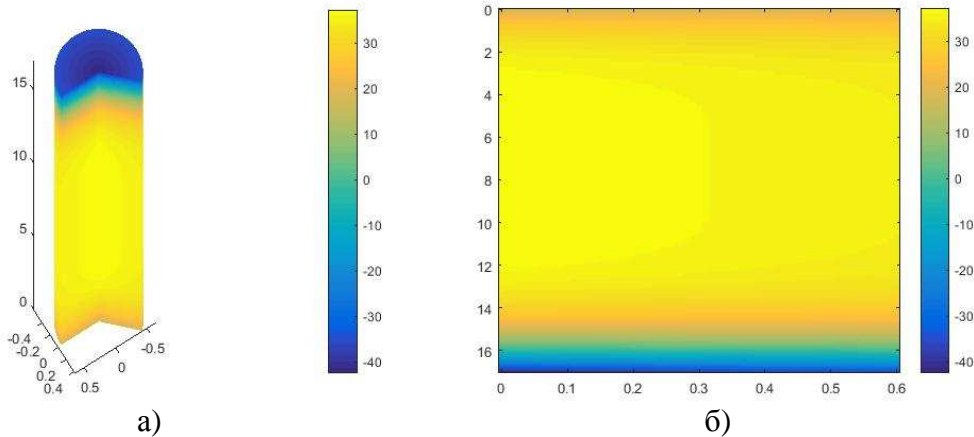


Рис. 5. а) Растяжение проволоки при $c=0$, справа распределение температуры; б) Вид сверху

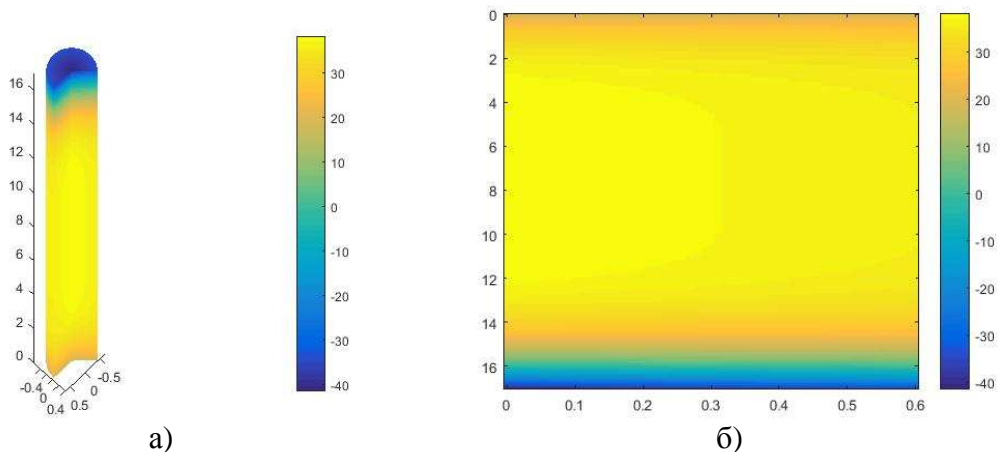


Рис. 6. а) Растяжение проволоки при $c=0,4$, справа распределение температуры; б) Вид сверху

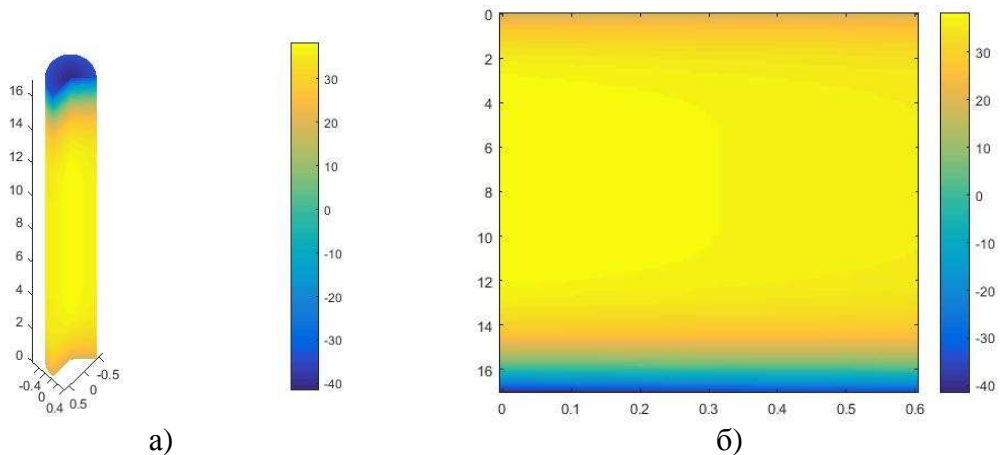


Рис. 7. а) Растяжение проволоки при $c=0,8$, справа распределение температуры; б) Вид сверху

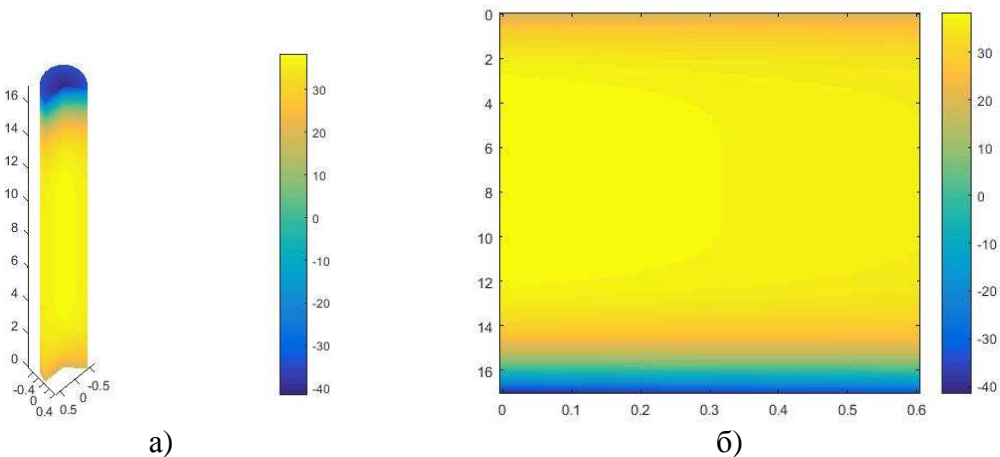


Рис. 8. а) Растяжение проволоки при $c=1$, справа распределение температуры; б) Вид сверху

Выводы

1. Разработан алгоритм вычисления распределения температуры по всему объему цилиндрической формы проволоки стального каната.

2. Разработан код программы в среде MATLAB участка проволоки dl с максимальным значением напряжения, что значительно упрощает инженерные расчеты при моделировании трехмерных упругих цилиндрических конструкций.

Список литературы

1. Таштанбаева В.О., Омуров Ж.М. Исследование натяжения проволок стального каната для подъемной установки // Машиноведение. 2021. №1(13). С. 33-42.
2. Ощепков А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB: Учебное пособие. – СПб.: Лань, 2013. – 208с.
3. Сопротивление материалов: учебное пособие / В.А. Хохлов, К.Н. Цукублина, Н.А. Куприянов, Н.А. Логвинова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 228 с.
4. Масленков С.Б., Масленкова Е.А. Стали и сплавы для высоких температур. Справочное издание. В 2-х книгах. Кн. 1. – М.: Metallurgy, 1991. – 383 с.
5. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., исправл. и доп. / Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
6. Машиностроение. Энциклопедия. Т. II–3. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / Под общ. ред. И.Н. Фридляндера. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.
7. Поршневу С.В. Компьютерное моделирование физических систем с использованием пакета MathCAD: Учебное пособие. – М.: Горячая линия - Телеком, 2015. – 320 с.

References

1. Tashtanbaeva V.O., Omurov Zh.M. Investigation of tension of steel rope cables for lifting equipment // Mechanical Engineering. 2021. No. 1(13). P. 33-42.
2. Oshchepkov A.Yu. Automatic control systems: theory, application, modeling in MATLAB: Textbook. – SPb.: Lan, 2013. – 208 p.
3. Resistance of materials: a textbook / V.A. Khokhlov, K.N. Tsukublina, N.A. Kupriyanov, N.A. Logvinova. – Tomsk: Publ. house of Tomsk Polytechnic University, 2011. – 228 p.
4. Maslenkov S.B., Maslenkova E.A. Steels and alloys for high temperatures. Reference edition. In 2 books. Book 1. – Moscow: Metallurgy, 1991. – 383 p.
5. Production of steels and alloys. 2nd ed., corrected and supplemented / Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirsky Yu.V. et al. Edited by A.S. Zubchenko. – M.: Mechanical Engineering, 2003. – 784 p.
6. Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. II-3. Non-ferrous metals and alloys. Composite metal materials / Gen. ed. by I.N. Friedlander. – M.: Mechanical Engineering, 2001. – 880 p.
7. Porshnev S.V. Computer modeling of physical systems using the Mathcad package: Textbook. – M.: Hotline - Telecom, 2015. – 320 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Таштанбаева Венера Орозбековна – старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность»	Tashtanbaeva Venera Orozbekovna – senior lecturer of the department «Technosphere safety»
Борукеев Туйгун Сабатарович – к.т.н., доцент	Borukeev Tuygunbek Sabatarovich – candidate of technical sciences, associate professor
Козубай Искендер – к.ф.-м.н., доцент	Kozubai Iskander – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor
tashtanbaeva.venera@mail.ru	

Получена 01.03.2022