

УДК 621.8

РАСЧЕТ НЕСУЩЕГО КАНАТА КАБЕЛЬНОГО КРАНА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГИБКИХ НИТЕЙ, НЕСУЩИХ СИЛОВУЮ НАГРУЗКУ**Б.Н. Акрамов, И.А. Исмаев, К.З. Тиллов**

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

Кабельные краны имеют значительное значение при проведении строительных и ремонтных работ в горных местностях и равнинных местностях с неровным рельефом. Также кабельные краны выгодно использовать для различных ремонтных работ, где нет условий для использования стационарных или стреловых кранов. (простота и дешевизна использования). Подвесные дороги служат для обеспечения грузо - пассажирского потока в горных местностях и равнинных местностях с неровным рельефом. Важной частью для кабельных кранов и подвесных канатных дорог (фуникулеров) является правильный подбор и расчет несущих канатов, которые и определяют структуру и параметры всех остальных механизмов этих устройств. В статье предложена методика выбора и расчета несущего каната на основе теории механики гибких нитей, несущих сосредоточенную нагрузку. В качестве модели каната примем тяжелую (массовую) однородную нить с малой стрелой провисания. Составив для нее дифференциальные уравнения равновесия для расчетных участков нити получим расчетные зависимости для выявления формы и натяжения нити при определенном положении вертикальной нагрузки, а также величины реакций в местах крепления нити (каната). Как практическое применение расчетные зависимости для канатов строительных машин и фуникулеров должны проверяться далее на статическую и динамическую нагрузки.

Ключевые слова: кабельный кран, подвесная канатная дорога (фуникулер), грузоподъемное оборудование, несущий канат, сосредоточенная сила, распределенная нагрузка, теория и расчет, гибкая нить.

ҲИСОБ КАРДАНИ РЕСМОНИ БОРБАРДОРИ КРАНИ КАБЕЛӢ ДАР АСОСИ НАЗАРИЯИ РИШТАӢОИ ЧАНДИРИ БОРБАРДОРИ ҚУВВАИ БАРҚ**Б.Н. Акрамов, И.А. Исмаев, Қ.З. Тиллов**

Кранҳои кабелӣ ҳангоми корҳои сохтмонӣ ва таъмирӣ дар минтақаҳои кӯҳӣ ва минтақаҳои ҳамвор бо релефи ноҳамвор аҳамияти калон доранд. Инчунин, кранҳои кабелӣ барои корҳои гуногуни таъмирӣ, ки барои истифодаи кранҳои статсионарӣ ё тирӣ шароит надоранд, муфид мебошанд (осонии истифода ва арзон). Роҳҳои овеzon барои таъмини чараёни боркаш ва мусофиркашонӣ дар минтақаҳои кӯҳӣ ва минтақаҳои ҳамвор бо релефи ноҳамвор хизмат мекунад. Қисми муҳим барои кранҳои кабелӣ ва роҳҳои кабелӣ овеzon (фуникулерҳо) интиҳоби дуруст ва ҳисоб кардани ресмонҳои борбардор мебошад, ки сохтор ва параметрҳои ҳамаи механизмҳои дигари ин дастгоҳро муайян мекунад. Дар мақола усули интиҳоб ва ҳисоб кардани ресмони борбардор дар асоси назарияи механикаи риштаҳои чандир, ки бори мутамарказро мебардоранд, пешниҳод карда шудааст. Ҳамчун модели таноб, мо риштаи яхелаи вазнинро бо тири хурди овеzon қабул мекуем. Бо тартиб додани муодилаҳои дифференсиалии мувозинат барои қисмҳои ҳисобшудаи ришта, мо вобастагии ҳисобшударо барои ошкор кардани шакл ва кашидани ришта ҳангоми мавқеи муайяни бори амудӣ, инчунин андозаи реаксияҳо дар ҷойҳои васл кардани ришта (канат) ба даст меорем. Ҳамчун истифодаи амалӣ вобастагиҳои ҳисобшуда барои ресмонҳои мошинҳои сохтмонӣ ва фуникулерҳо бояд минбаъд барои бори статикӣ ва динамикӣ санҷида шаванд.

Калидвожаҳо: қувваи канорӣ, хок, олати кори конусшакл, тадқиқоти таҷрибавӣ, қувваи меҳварӣ, динамометр.

CALCULATION OF THE LOAD-BEARING ROPE OF A CABLE CRANE BASED ON THE THEORY OF FLEXIBLE THREADS CARRYING A POWER LOAD**B.N. Akramov, I.A. Ismatov, K.Z. Tillov**

Cable cranes are of significant importance when carrying out construction and repair work in mountainous and flat areas with uneven terrain. It is also advantageous to use cable cranes for various repair work where there are no conditions for the use of stationary or jib cranes. (simplicity and cheapness of use). Suspension roads are used to provide cargo and passenger traffic in mountainous areas and flat areas with uneven terrain. An important part for cable cranes and suspended cable cars (funiculars) is the correct selection and calculation of load-bearing ropes, which determine the structure and parameters of all other mechanisms of these devices. The article proposes a method for selecting and calculating a load-bearing rope based on the theory of mechanics of flexible threads carrying a concentrated load. As a rope model, we will take a heavy (massive) homogeneous thread with a small sagging boom. Having compiled differential equilibrium equations for the calculated sections of the thread for it, we obtain calculated dependencies to identify the shape and tension of the thread at a certain position of the vertical load, as well as the magnitude of reactions at the attachment points of the thread (rope). As a practical application, the calculated dependencies for ropes of construction machinery and funiculars should be checked further for static and dynamic loads.

Keywords: cable crane, suspended cable car (funicular), lifting equipment, supporting rope, concentrated force, distributed load, theory and calculation, flexible thread.

Введение

Кабельный кран - это грузоподъемное оборудование с двумя башнями (в общем случае), между которыми закреплен канат, выполняющий несущую роль. [1, 2]. По нему движется тележка с захватным механизмом. – крюком или грейфером [ИСО 4306/1-85]. Кабельные краны имеют очень широкий диапазон используемых технических параметров: грузоподъемность 3-25 т (специальные модели могут поднимать груз до 150 т), пролет 6 - 100 м (но есть и до 1 км), высота подъема груза 50- 300 м, высота расположения кабины управления 25-40 м, скорость перемещения высотных башен (для башенных конструкций) 0,08 – 0,4 м/с (есть 2,5 м/с и больше), скорость передвижения грузовой тележки 3,0 – 6,0 м/с.

По своей конструкции кабельные краны достаточно просты и поэтому надежны, они нашли широкое применение на объектах крупного строительства: при возведении шлюзов, дамб и мостов. Также они востребованы на масштабных рабочих площадках: на складах угля, песка, леса и т.п. Кабельные краны имеют применение при обслуживании складов лесных и сыпучих грузов, на строительстве гидротехнических сооружений, мостов, бетонных заводов и др. работ, которые проводятся в необычных

условиях без возможности строгого упорядочения. Применяются эти краны также на малом по фронту участке работ большого объема и в труднодоступных условиях. Также кабельные краны имеют применение при сложных ремонтных работах (типа смена перекрытий над рабочими цехами, при отсутствии путей подачи различных конструкций и т. п.). Весь часто эти краны могут применяться и в карьерных работах.

На рис. 1 представлен параллельно - передвижной кабельный кран, имеющий достаточно широкое применение на практике. В качестве опор крана используют башни 1 – машинная или опорная (справа) и контрбашня. Внешняя форма башни соответствует трехгранной пирамиде, ребра которой образуются вертикальной стойкой и двумя подкосами, а треугольное основание системой горизонтальных балок. Каждая башня опирается на три ходовые тележки, из которых две располагаются со стороны подкосов и одна – под стойкой. Ходовые тележки перемещаются по спаренным рельсам, установленным на бетонном или шпальном основании. К головкам башен крепится несущий канат 2. По которому бесконечным тягловым канатом 3 передвигается грузовая тележка 4. Вертикальное перемещение крюка производится грузовым (подъемным) канатом 5. Тягловый и грузовой канаты проходят через обводные 6 и направляющие 7 блоки на головках башен. В нижней части машинной башни установлены тяговая 8 и грузовая (подъемная) 9 лебедки. Один конец грузового каната крепится к барабану лебедки 9, а другой – к головке контрбашни. На несущем канате устанавливаются поддержки, на нижние ролики которых опираются тягловый и грузовой канаты, что исключает провисание последних. Конструкция поддержек обеспечивает свободный проход грузовой тележки по всей длине несущего каната. Для получения необходимой устойчивости башен в их основаниях размещают противовесы. Кроме того в структуру крана входят и другие его элементы – кабина управления, площадки обслуживания, лестницы, система электрооборудования, комплекс устройств безопасности и т.д.

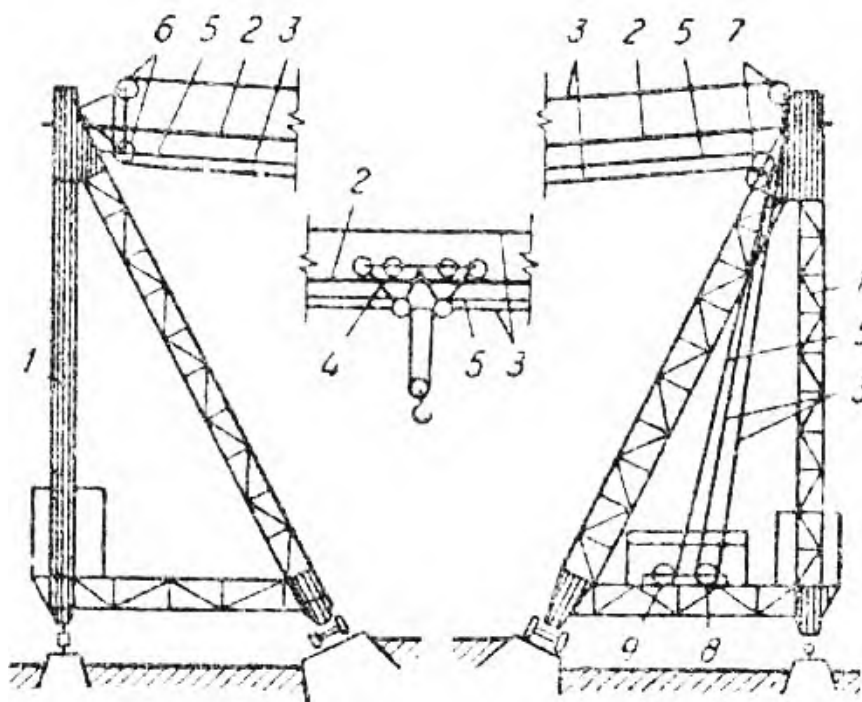


Рисунок 1 - Схема кабельного крана

Вследствие неравномерности натяжения всех канатов, особенно грузоподъемного (нагруженное и ненагруженное состояния), возможно их большое провисание. Поэтому у кабельных кранов с большим пролетом приходится применять специальные поддержки рабочих канатов, удерживающих их на заданном расстоянии от несущего каната. Величина провеса не должна выходить за пределы 3 - 8% от пролета. Надо отметить, что при малых провесах резко возрастают горизонтальные усилия на опоры каната, а при больших провесах требуется существенное увеличение высот опор. Если, например, у крана с пролетом 500 м увеличить, при прочих равных условиях, провес с 0,03 м до 0,08 м то снизится примерно вдвое нагрузка на опоры, но потребуются увеличение высоты опор на 25 м. Наиболее простейшей конструкцией являются подвижные цепные поддержки, принудительно расставляемые на несущем канате на расстоянии 12-15 м друг от друга при движении грузовой тележки, с которыми они связаны легкой цепью.

Если температура окружающей среды понижается, то длина каната (весьма большой длины!) уменьшается, что увеличивает перегрузку и натяжение каната. При повышении же температуры воздуха окружающей среды длина каната увеличивается, то натяжение каната становится слабее, что ведет к возникновению сопротивления движению грузовой тележки и появлению изгибающих напряжений

точке для левой части и направлена под углом α_1 к горизонтали справа налево). Обе реактивные силы являются касательными линиями к соответствующим участкам нити. Согласно условию равновесного положения (рис.3):

$$\overline{T_1} + \overline{T_2} + \overline{F} = 0.$$

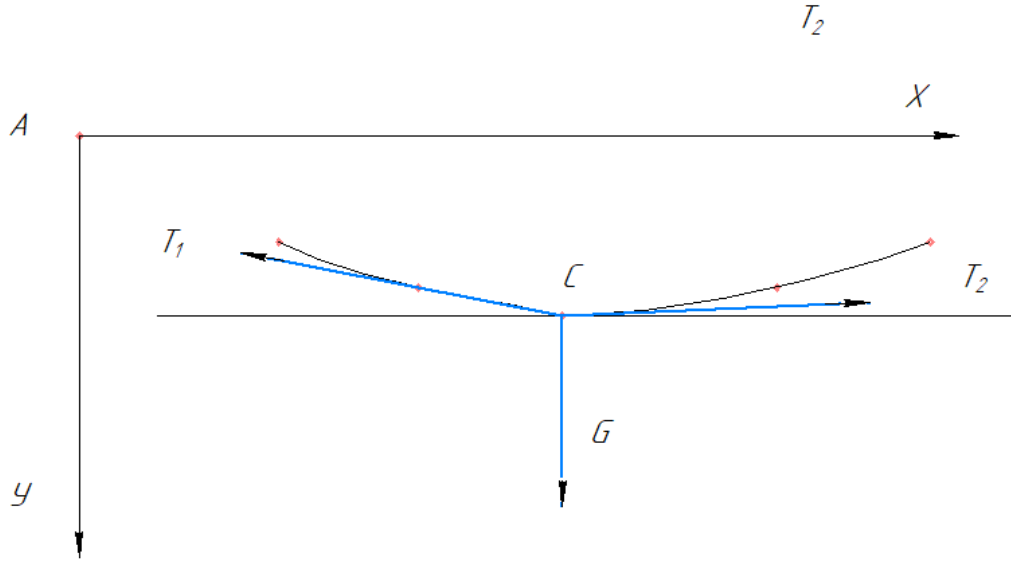


Рисунок 3 - К определению уравнения равновесного положения нити

Это уравнение представим в проекциях на оси координат xAy:

$$\begin{aligned} -T_1 * \cos \alpha_1 + T_2 * \cos \alpha_2 &= 0 \\ T_1 * \sin \alpha_1 + T_2 * \sin \alpha_2 - F &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Так как натяжение нити в точке С равно Н (и одинаково для обеих частей нити), то имеем:

$$T_1 * \cos \alpha_1 = T_2 * \cos \alpha_2 = H.$$

И это равенство имеет место для всех точек нити. Отсюда выразим величины реактивных сил T_1 и T_2 и подставив эти значения в нижнее уравнение (4) получим его в следующем виде:

$$H * \operatorname{tg} \alpha_1 + H * \operatorname{tg} \alpha_2 - F = 0. \quad (c)$$

С учетом того что $\operatorname{tg} \alpha_1 = [y_C^{(1)}]'$ и $\operatorname{tg} \alpha_2 = [y_C^{(2)}]'$ уравнение (c) запишем в виде:

$$H = \frac{F}{[y_C^{(1)}]' - [y_C^{(2)}]'}. \quad (5)$$

Значения $[y_C^{(1)}]'$ и $[y_C^{(2)}]'$ найдем дифференцируя уравнения (1) и (2) и тогда для F можем написать:

$$F = (\delta_1 - \delta_2) * q \quad (6)$$

Откуда выражение для C_2 с учетом значения F примет следующий вид:

$$C_2 = \frac{1}{H} * q * \left(\delta_1 * x_c - \frac{x_c^2}{2} - \delta_2 * x_c + \frac{x_c^2}{2} \right) = \frac{q}{H} * (\delta_1 - \delta_2) * x_c = \frac{F}{H} * l. \quad (7)$$

Выражение для δ_2 из (3) с учетом полученного значения C_2 примет вид:

$$\delta_2 = \frac{l}{2} + \frac{H}{q * l} * (h - C_2) = \frac{l}{2} + \frac{h * H}{q * l} - \frac{F}{q}. \quad (8)$$

Теперь значение δ_1 можно выразить из (6) в следующем виде:

$$\delta_1 = \frac{F}{q} + \delta_2 = \frac{l}{2} + \frac{h * H}{q * l}. \quad (9)$$

Для вычисления неизвестного значения Н (горизонтальная составляющая натяжения нити) определим полную длину нити L как сумму длин участков AC и BC.

Элементарную длину нити представим в следующем виде [3 -11]:

$$ds = \left(1 + \frac{1}{2} * (y^1)^2 \right) * dx. \quad (10)$$

Для вычисления длины 1-го участка AC подставим в уравнение (10) выражение $[y_C^{(1)}]'$ и проинтегрируем это уравнение в интервале $0 \leq x \leq x_c$:

$$l_1 = x_c + \frac{q^2}{6 \cdot H^2} \cdot (x_c - \delta_1)^3.$$

Для вычисления длины 2-го участка ВС подставим в уравнение (10) выражение $[y_c^{(2)}]'$ и проинтегрируем это уравнение в интервале $x_c \leq x \leq l$:

$$l_2 = l - x_c + \frac{q^2}{6 \cdot H^2} \cdot [(l - \delta_2)^3 - (x_c - \delta_2)^3].$$

Полная длина нити составит:

$$L = l_1 + l_2 = l + \frac{q^2}{6 \cdot H^2} \cdot [(x_c - \delta_1)^3 + (l - \delta_2)^3 - (x_c - \delta_2)^3]. \quad (11)$$

Теперь если мы в это выражение (11) подставим значения δ_1 из (9) и δ_2 из (8) то получим длину L в виде функции от одного параметра H . После ряда преобразований получим расчетное уравнение для определения H по известной длине каната L :

$$H^3 \cdot a + H^2 \cdot b + H \cdot c + d = 0, \quad (12)$$

$$a = \left(\frac{h}{q \cdot l}\right)^3, \quad b = \frac{3}{2} \cdot \frac{h^2}{q^2 \cdot l} - \frac{6 \cdot (l-l)}{Q^2}, \quad c = \frac{6 \cdot F \cdot h \cdot x_c}{q^2 \cdot l} - \frac{3 \cdot l \cdot h}{4 \cdot q} - \frac{6 \cdot F \cdot h}{q^2}$$

$$d = 3 \cdot x_c \cdot \frac{F \cdot l}{q} - 3 \cdot x_c^2 \cdot \frac{F}{q} + \frac{l^3}{4} + \frac{3 \cdot F^2 \cdot l}{q^2}.$$

Зная значения H по формулам (8) и (9) вычислим δ_2 и δ_1 , по формуле (7) найдем C_2 .

Подставив полученные выражения в уравнения (1) и (2) получим уравнения парабол определяющие вид участков АС и АВ. Для них находим координаты вершин парабол (стрелу провисания) при граничных условиях: при $x_k = \delta_k$ $y^{(k)} = f_k$

Подставляя эти граничные условия получим:

$$f_1 = \frac{q}{H} \cdot \frac{\delta_1^2}{2} \quad (13)$$

$$f_2 = \frac{q}{H} \cdot \frac{\delta_2^2}{2} + C_2. \quad (14)$$

Натяжение нити определяем по следующей формуле, в которой надо взять параметры, соответствующие рассматриваемому участку нити, АС или ВС:

$$T^{(1)} = q \cdot \left(\frac{H}{q} + f_1 - y^{(1)}\right), \quad (15)$$

$$T^{(2)} = q \cdot \left(\frac{H}{q} + f_2 - y^{(2)}\right). \quad (16)$$

Результаты

Результаты расчетов удобно отразить в виде графика изменения натяжения нити $T=T(x)$. По максимальному значению натяжения T можно проверить на прочность выбранный канат и в случае необходимости поменять его параметры в нужную сторону (путем увеличения или уменьшения диаметра каната). Натяжение каната в точках А и В необходимы для расчета на прочность крепления каната к башням.

Пример расчета: Примем вес тележки равным 4000 Н, вес транспортируемого груза 1000 Н ($F = 5000$ Н), пролет крана $l = 100$ м, высоту левой точки крепления над правой точкой $h = 20$ м, несущий канат типа 45,0 – В – Н – 1180 ГОСТ 7675-73 с длиной $L = 105$ м и удельным весом на единицу длины каната $q = 116$ Н/м. Необходимо определить горизонтальное натяжение каната H (определяет разрывное усилие на канат) при расположении груза в точке С - $x_c = 70$ м. По мере перемещения груза это разрывное усилие естественно меняется, но это изменение составляет в пределах $\pm 15\%$, поэтому может быть учтено при проверке каната на прочность (оставить необходимый запас). Расчет по приведенной методике дает разрывное усилие $H = 14850$ Н. Для решение кубического уравнения используем [11]. Условие статической прочности $G = \frac{H}{S} \leq [G]$ выполняется с огромным запасом, что позволяет учитывать, как указанное выше отклонение в $\pm 15\%$, так и динамический фактор работы каната (ветер, вибрация, неравномерность движения тележки и подъема груза и т.п.). Усилия для закрепления каната на опорах составят $T^{(1)} = T_A = 13364$ Н, $T^{(2)} = T_B = 15684$ Н.

Выводы

На основании теории механики гибких нитей предложена методика подбора несущего каната кабельных кранов. В качестве исходных данных для решения задачи использованы основные параметры кабельных кранов (вес грузовой тележки вместе с весом поднимаемого груза F ; пролет крана l ; условия местности в которой размещаются опоры (опорные башни) крана x_A, y_A, x_B, y_B ; необходимые для расчета

тяговых механизмов усилия натяжения каната на креплениях). Предложенная методика расчета несущего каната может быть кроме кабельных кранов использована и в подвесных дорогах (фуникулерах).

Рецензент: Давлатшоев Р.А. — к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» ТПТУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Александров М.П., Колобов Л.Н., Лобов Н.А. и др. Подъемно-транспортные машины и оборудование – М.: Машиностроение, 1986 – 400 с.
2. Ушаков П.Н., Бродский М.Г. Краны и лифты промышленных предприятий - М.: Металлургия, 1974 – 352 с.
3. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики Т. 1. Статика и кинематика. Т. 2. Динамика / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – 11-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2009. – 736 с.
4. Курс теоретической механики: учебник для вузов/под. ред. Колесников К.С. – М.: Изд-во МГТУ имени Баумана Н.Э., 2002 – 302 с.
5. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити - М.: Наука, 1980 – 182 с.
6. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей - М.: Машстр., 1978 – 232 с.
7. Щедров В.С. Основы механики гибкой нити - М.: Машгиз, 1961 – 186 с.
8. РТМ 24.090.34-85 Краны кабельные. Нормы расчета и проектирования
9. ГОСТ 7675-73 Канаты стальные. Канат закрытый несущий.
10. Дукельский А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны - М.: Машстр., 1966 – 482 с.
11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике – М.: Гос. Изд-во технико-теорет. лит-ры, 1953 – 608 с.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Акрамов Баҳром Ниёзович н.и.т., дотсент	Акрамов Баҳром Ниязович к.т.н., доцент	Akramov Bahrom Niyazovich Candidate of Technical Sciences, u.a.docent
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik technical university named after academician M.S. Osimi
E-mail: akramov57@bk.ru		
TJ	RU	EN
Исматов Исмоилҷон Аҳмадович н.и.т. и.в. дотсент	Исматов Исмоилджон Ахмадович к.т.н., и.о. доцента	Ismatov Ismoiljon Akhmadovich Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik technical university named after academician M.S. Osimi
E-mail: kudratullo.tiloev@bk.ru		
TJ	RU	EN
Тиллоев Қудратулло Зувайдуллоевич н.и.т., муал. калон	Тиллоев Қудратулло Зувайдуллоевич к.т.н., ст. преподаватель	Tilloev Kudratullo Zuvaidulloevich Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik technical university named after academician M.S. Osimi
E-mail: ismatov.ismoiljon@mail.ru		