

УДК*630*377.2:621.86.078.6

А. О. Шошин¹, А. В. Дорожко¹, В. Штоллманн², С. В. Ярмолик¹¹Белорусский государственный технологический университет²Технический университет в Зволене (Словакия)**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ СЕЧЕНИЯ МАЧТЫ МОБИЛЬНОЙ КАНАТНОЙ
ТРЕЛЕВОЧНОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ТРАКТОРА**

Разработанная методика позволяет определять параметры сечения мачт искусственных опор мобильных канатных трелевочных установок в зависимости от выбранного профиля ее конструкции. Исходными данными для расчета являются высота опоры и максимальные усилия в тяговом и несущем канатах. Результатом расчета по методике являются внешний диаметр при выборе кольцевого сечения, сторона квадрата при выборе квадратного сечения. Основой методики определения параметров является нагруженное состояние мачты при выполнении основной технологической операции цикла – рабочего хода. Разработанная методика подходит для расчета установок с жестким креплением мачты к корпусу лебедки для наиболее распространенной конструкции мобильных канатных трелевочных установок с неподвижным несущим канатом и цельнометаллической мачтой. Основной расчет параметров сечения производится при статическом нагружении мачты во время выполнения рабочего хода. Сущность методики заключается в определении параметров сечения по условию прочности при совместном действии изгиба и сжатия от усилий в тяговом и несущем канатах. Теоретическая основа методики может быть использована при программном расчете в таких пакетах, как MathCad.

Ключевые слова: тяговое усилие, сечение мачты, изгиб, сжатие.

Для цитирования: Шошин А. О., Дорожко А. В., Штоллманн В., Ярмолик С. В. Методика определения параметров сечения мачты мобильной канатной трелевочной установки на базе трактора // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 155–164.

A. O. Shoshyn¹, A. V. Dorozhko¹, V. Štollmann³, S. V. Yarmolik¹¹Belarusian State Technological University²Technical University in Zvolen (Slovakia)**METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS
OF THE TOWER SECTION OF A CABLE YARDING
BASED ON A TRACTOR**

The proposed technique makes it possible to determine the parameters of the cross-section of the towers of artificial supports of cable yarders, depending on the selected profile of its structure. The initial data for the calculation are the height of the support and the maximum forces in the skyline and main line. The result of the calculation by the method is the outer diameter when choosing an annular section, the side of a square when choosing a square section. The basis of the method for determining the parameters is the loaded state of the tower during the execution of the main technological operation of the cycle – carriage in. The developed methodology is suitable for calculating installations with a rigid attachment of the tower to the winch body for the most common design of mobile cable yarding systems with a fixed carrying rope and an all-metal tower. The calculation of the section parameters is carried out with a static loading of the tower when performing a working stroke. The essence of the first technique is to determine the parameters of the section by the strength condition under the combined action of bending and compression from the forces in the traction and load-bearing ropes. The theoretical basis of the technique can be used in software calculations in such packages as MathCad.

Key words: pulling force, cross section of the tower, incurvature, pressure.

For citation: A. O. Shoshyn, A. V. Dorozhko, V. Štollmann, S. V. Yarmolik. Method for determining the parameters of the tower section of a cable yarding based on a tractor. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2022, № 1 (252), pp. 155–164 (In Russian).

Введение. Искусственные опоры являются одним из важнейших узлов современных мобильных канатных трелевочных установок (далее – МКТУ). В подавляющем большинстве случаев установки оснащены собственной искусственной металлической мачтой, однако в отдельных случаях используют растущие деревья (установки фирмы Wyssen) [1]. Известно, что наиболее экономичным сечением при работе на изгиб является двутавровое [2], однако анализ большого количества существующих установок [3–10] и установок более ранних периодов показал, что мачты с таким сечением не используются с учетом того, что при одинаковом моменте сопротивления сечения они более экономичны по сравнению со всеми остальными. Это вызвано рядом факторов:

а) обеспечить действия усилий от натяжения несущего и тягового каната строго по оси симметрии достаточно сложно реализовать на практике, вследствие чего будет наблюдаться сложное напряженное состояние, что снижает прочность сечения. Данная ситуация усугубляется действием дополнительной боковой силы от натяжения возвратного каната. В таком случае преимущества использования сечений двутавра и швеллера резко уменьшаются;

б) необходимость установки дополнительных элементов – блоков, лестниц. Установка данных элементов на мачту двутаврового или швеллерного сечения повлечет за собой дополнительные сварные работы и увеличение массы мачты.

Современные канатные трелевочные установки для первичного транспорта древесины в подавляющем большинстве случаев представлены

мобильными версиями на автомобильной и тракторной базе [3–10]. В такой компоновке в качестве опоры используется металлическая мачта, закрепленная на трехточечной навеске трактора или платформе автомобиля. Установки на базе автомобилей подходят только для работы на магистральных лесохозяйственных дорогах, так как в условиях лесозаготовок Республики Беларусь транспортная сеть внутри кварталов и даже между ними не позволяет перемещаться таким крупногабаритным установкам.

В связи с этим наиболее актуальной является разработка методики определения параметров опор установок на базе тракторов, которые в первую очередь будут применяться в заболоченных условиях Республики Беларусь (рис. 1).

Опоры таких установок являются двухсекционными, примером их может служить отечественная установка МТК-431 (рис. 2):

– нижняя секция представлена щитом с расположенными внутри трансмиссией и барабанами;

– верхняя секция включает мачту, состоящую из нижней (неповоротной) и верхней (поворотной) частей, дополнительное оборудование (блоки, лестницы для монтажа и т. д.).

Верхняя и нижняя части мачты связаны с помощью шарнирного соединения в виде оси для обеспечения перевода мачты из рабочего в транспортное положение (рис. 2). Мачта может быть постоянного профильного сечения либо уменьшаться от места крепления к лебедке до высшей точки.

Верхняя секция соединяется с нижней посредством болтового и сварного соединения.



а



б



в

Рис. 1. Канатные установки на базе тракторов:
а – Larix 3T; б – TST Junior; в – Koller K301T



а



б

Рис. 2. Мобильная канатная трелевочная установка МТК-431:

а – вид с мачтой в рабочем положении; б – шарнирное соединение двух секций мачты (вид сбоку)

Размеры нижней секции можно получить только на последнем этапе проектирования установки, когда известны точное расположение и размер узлов трансмиссии, количество и размер барабанов. Как правило, ширина и высота нижней секции принимаются равными ширине колеи базового трактора. Секция представляет собой металлический каркас для защиты привода от удара лесоматериалами. Щит также является точкой опоры при переводе искусственной опоры из транспортного в рабочее положение.

Существующие на данный момент методики расчета посвящены определению параметров именно верхней секции – мачты.

Н. Г. Адамовский и др. [11] предложили методику определения усилий в тяговых органах при рассмотрении естественной опоры (дерева) в качестве мачты. Данная методика рассматривает мачты в качестве стержня на шарнирно-неподвижной опоре, и мачта испытывает напряжения сжатия и может быть проверена после подбора сечения на устойчивость. Данная методика более применима для стационарных канатных установок, которые в настоящее время используются редко, либо для расчета мачт современных канатных установок североамериканского производства, таких как Madill 172, Madill 124, ThunderBird TSY-255 и др. (рис. 3).

В работе [12] описана методика подбора высоты мачты в зависимости от величины пролета, собственного веса несущего каната, веса пачки, коэффициента трения пачки о почву и коэффициента распределения веса пачки на почву и на несущий канат. Данный подход может быть использован как предварительный расчет для дальнейшего определения параметров по нижеописанной нами методике.



а



б

Рис. 3. Канатные установки североамериканского производства:
а – МКТУ Madill 172; б – Madill 046

Методика, предложенная С. И. Рахмановым [13], распространяется на одномачтовые установки, в которых в качестве головной мачты выступает растущее дерево, и не может быть полностью применена при рассмотрении конструкций современных установок.

Методика [14, 15] позволяет на основе анализа колебаний искусственных (металлических) промежуточных опор определять их параметры, однако нуждается в доработке для непосредственного применения ее в качестве рабочей для мачт канатных установок, располагающихся на базовой машине.

В. А. Тулатовым и В. Г. Дроздовским [16] предлагается статический расчет промежуточных опор, состоящих из двух деревьев и поперечного каната. В задаче рассматривается статически определяемая

система с опорным бревном и двумя канатами растяжек, что не позволяет применить данную методику для расчета головной мачты.

Мачты канатных установок проектируют таким образом, чтобы они обеспечивали наибольшую величину пролета за счет регулирования высоты мачты – минимального расстояния от нижней части пачки до поверхности грунта 1,0–1,5 м. В то же время мачта не должна препятствовать безопасному перемещению установки на базовой машине при выполнении переезда от одной лесосеки к другой. Для применения предлагаемой ниже методики определения параметров сечения мачты необходимо задавать высоту мачты заранее. Также увеличение высоты мачты положительно сказывается на уменьшении количества промежуточных опор.

Это упрощает задачу, так как выбор высоты мачты является географическим фактором, поскольку в сильно холмистых и горных условиях применяются установки с большой высотой мачты – 20–25 м (Thunderbird, Madill, рис. 2) [3, 7], в то время как на заболоченных лесосеках такая высота не критична. В то же время в заболоченных лесосеках увеличение высоты мачты (более 10 м) приводит к невозможности перемещения установок и маневрирования, поскольку в большинстве из них мачта в транспортном режиме складывается в наклон на кабину (при использовании трактора в виде базовой машины). Установки же на базе автомобилей применимы в заболоченных условиях только при работе с магистральных лесохозяйственных дорог, которые составляют очень незначительный процент во всех лесосеках.

Перед выполнением рабочих операций от мачты разводят в стороны под углом в плане и к горизонту канатные растяжки для исключения поломки и потери устойчивости установки.

Основная часть. Мачту рассматриваем как конструкцию, состоящую из верхней и нижней секции (рис. 2). Мачты канатных установок оснащаются растяжками, в большинстве случаев четырьмя и более, для обеспечения жесткости при выполнении рабочих операций. Однако включение в расчетную схему дополнительных связей в виде растяжек влечет за собой значительное усложнение задачи за счет появления статической неопределимости системы. Делаем допущение, что в предлагаемой методике мачта до нагружения уже находится в устойчивом равновесии под действием растяжек.

Мачта представляется как балка, жестко защемленная в месте соединения верхней и нижней секций искусственной опоры.

На рис. 4 представлена мачта установки МТК-431, на которой обозначены якоря (пни), растяжки, несущий канат, тяговый канат, блоки канатов (возвратный канат и его блок не показаны).

Мачта переводится из транспортного положения в рабочее путем упора щита в основание в виде деревянной доски. При опускании мачты до полного хода штока гидроцилиндра площадка контакта мачты и основания, лежащего на почве, представляет собой шарнирно-неподвижную опору, относительно которой может осуществляется поворот мачты. Затем выполняется натяжение растяжек с помощью ручных лебедок, расположенных в нижней части мачты. После устройства растяжек мачта находится в упругом равновесии. В такой ситуации натяжение несущего и тягового канатов создает систему нагружения, которую можно представить в виде жестко защемленной балки. Расчетная схема (рис. 5) представлена без растяжек, так как фактически предварительно натянутые две передние и две задние растяжки удерживают мачту в равновесии.

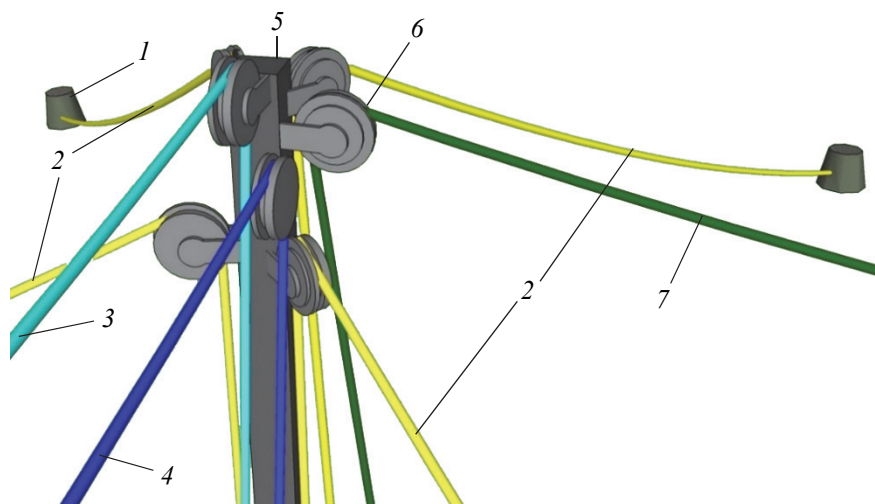


Рис. 4. Мачта канатной установки МТК-431 с рабочими канатами:
1 – якорь; 2 – растяжка; 3 – несущий канат; 4 – тяговый канат;
5 – мачта; 6 – блок; 7 – возвратный канат

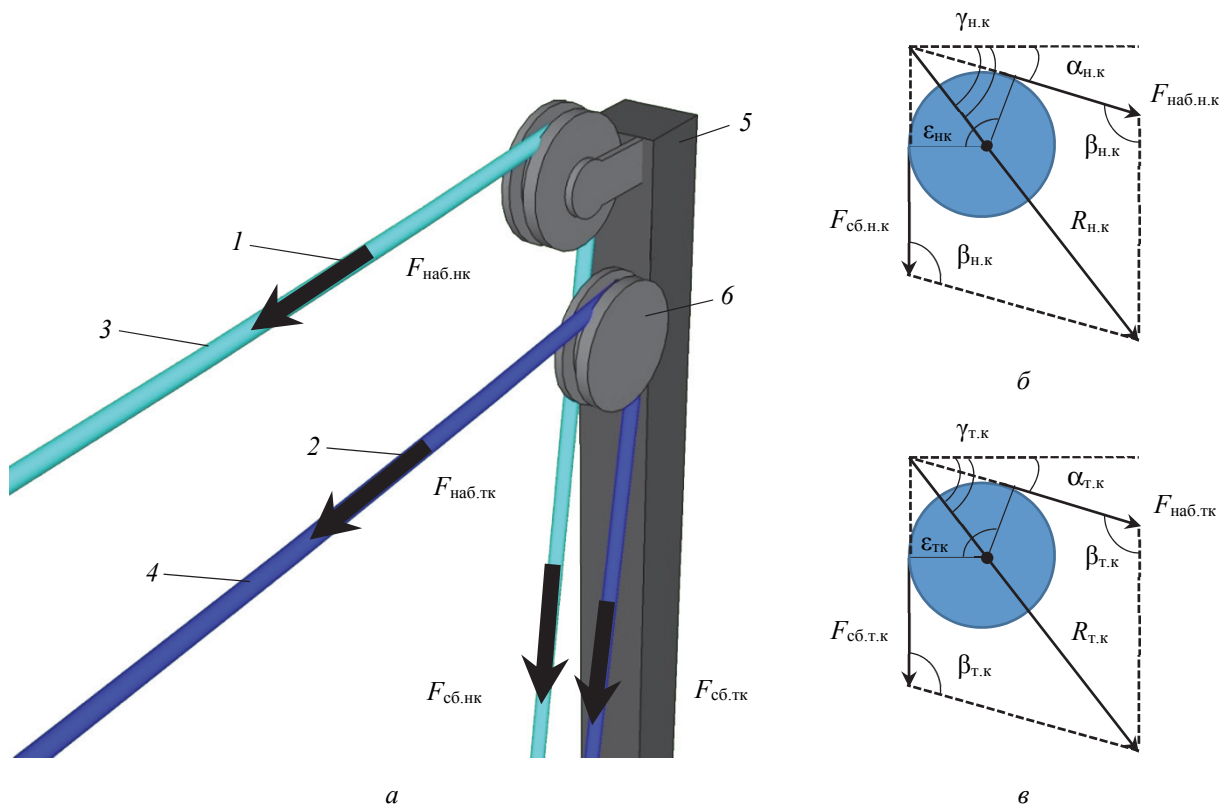


Рис. 5. Определение усилий в рабочих канатах:

а – нагружение мачты при выполнении рабочего хода:

1 – вектор усилия в несущем канате; 2 – вектор усилия в тяговом канате;

3 – несущий канат; 4 – тяговый канат; 5 – мачта; 6 – блок;

б – расчетная схема для равнодействующей от действия усилий в несущем канате;

в – расчетная схема для равнодействующей от действия усилий в тяговом канате.

Остальные блоки и канаты не показаны

Важно отметить, что расчетная нагрузка на мачту равна не усилию в канате, а равнодействующей от двух составляющих – усилия в набегающей и сбегающей ветвях.

Фактически усилие от действия натяжения в рабочих канатах (тяговый и несущий) на мачту передается не по линии действия векторов, показанных на рис. 5, а, а по линии действия равнодействующей от направления действия усилий в набегающей и сбегающей ветвях каната (рис. 5, б).

В соответствии с формулой Эйлера усилие в сбегающей ветви связано с усилием в набегающей ветви и может быть определено по формуле (1) [17]:

$$F_{сб} = F_{наб} \cdot e^{f \cdot \epsilon}, \quad (1)$$

где $F_{сб}$ – усилие в сбегающей ветви, Н; $F_{наб}$ – усилие в набегающей ветви, Н; f – коэффициент трения нити о блок; ϵ – угол обхвата канатом блока на мачте, рад.

В соответствии с рис. 5 нить условно вертикальная принимается за «сбегающую», так как она наматывается на барабан и сматывается с

блока, а нить условно горизонтальная принимается за «набегающую», поскольку она наматывается на блок.

Усилие в сбегающей ветви (рис. 5) упрощенно показано строго вертикально вниз, так как на практике угол между вертикалью и нитью, наматываемой на барабан, либо равен нулю, либо имеет минимальное значение.

Принимаем значение угла ϵ для тягового и несущего каната одинаковым и равным 120° или $2\pi/3$.

Коэффициент f следует принимать из промежутка 0,10–0,16.

Усилие в сбегающей нити всегда больше, чем в набегающей, поэтому принимаем его равным максимальному усилию в несущем и тяговом канатах. Тогда

$$F_{сб}^{тк} \approx F_{макс}^{тк}, \quad (2)$$

$$F_{сб}^{нк} \approx F_{макс}^{нк}. \quad (3)$$

По теореме косинусов равнодействующая в общем виде может быть определена по формуле (4).

$$\begin{aligned}
 R &= \sqrt{F_{\text{наб}}^2 + F_{\text{сб}}^2 - 2 \cdot F_{\text{наб}} \cdot F_{\text{сб}} \cdot \cos \beta} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{F_{\text{сб}}}{e^{f \cdot \varepsilon}}\right)^2 + F_{\text{сб}}^2 - 2 \cdot \frac{F_{\text{сб}}}{e^{f \cdot \varepsilon}} \cdot F_{\text{сб}} \cdot \cos \beta} = \\
 &= F_{\text{сб}} \sqrt{\frac{1}{e^{2 \cdot f \cdot \varepsilon}} + 1 - \frac{2 \cdot \cos \beta}{e^{f \cdot \varepsilon}}}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Тогда равнодействующая для несущего каната имеет следующий вид:

$$R_{\text{нк}} = F_{\text{макс}} \sqrt{\frac{1}{e^{2 \cdot f \cdot \varepsilon}} + 1 - \frac{2 \cdot \cos \beta}{e^{f \cdot \varepsilon}}}. \quad (5)$$

Равнодействующая для тягового каната имеет аналогичный вид. Поэтому

$$R_{\text{тк}} = F_{\text{макс}} \sqrt{\frac{1}{e^{2 \cdot f \cdot \varepsilon}} + 1 - \frac{2 \cdot \cos \beta}{e^{f \cdot \varepsilon}}}. \quad (6)$$

В соответствии со схемой рис. 5, б, в угол β может быть определен как

$$\beta = \frac{360 - 2 \cdot (90^\circ - \alpha)}{2} = 90^\circ + \alpha. \quad (7)$$

Тогда, используя теорему синусов, получим зависимость между усилиями следующего вида:

$$\frac{R}{\sin \beta} = \frac{F_{\text{сб}}}{\sin(\gamma - \alpha)}. \quad (8)$$

С учетом формулы (8) угол между горизонталью и направлением равнодействующей

$$\gamma = \arcsin \frac{F_{\text{сб}} \cdot \sin \beta}{R} - \alpha. \quad (9)$$

Для определения угла α между горизонталью и набегающей нитью каната не было выявлено

специальных методик определения. Известна формула А. И. Дукельского [18] по определению угла подъема каретки по несущему канату, однако она не может быть применена к определению угла α для несущего каната в соответствии со схемой (рис. 5, б, в). Угол обхвата канатом блока ε и угол α напрямую связаны. С увеличением угла α увеличивается и угол ε . Однако ранее уже было сделано допущение о равенности углов ε для тягового и несущего каната. Принимаем и угол α равным для обоих видов канатов. Угол α предлагается определять как гипотенузу прямоугольного треугольника (рис. 6), так как прогиб тягового каната под собственным весом незначителен:

$$\alpha = \arctg \frac{f_x + x \cdot \tg \psi}{x}, \quad (10)$$

где f_x – прогиб несущего каната, м; ψ – угол наклона хорды пролета, град.

Прогиб несущего каната от действия собственного веса и веса пачки f_x [18] можно рассчитать по формуле (11), и именно он и определяет точку контакта каретки и тягового каната.

$$f_x = \frac{x \cdot (l - x)}{2 \cdot H} \cdot \left(\frac{g}{\psi} + 2 \cdot \frac{Q}{l} \right), \quad (11)$$

где x – расстояние от левой опоры до места определения прогиба несущего каната, м; l – величина пролета установки, м; H – горизонтальная составляющая натяжения, Н; g – ускорение свободного падения, м/с²; Q – вес пачки, Н.

В соответствии с зависимостями (1)–(9) определяются равнодействующие для несущего и тягового канатов. Тогда расчетная схема мачты канатной установки и эпюры внутренних силовых факторов имеет следующий вид (рис. 7).

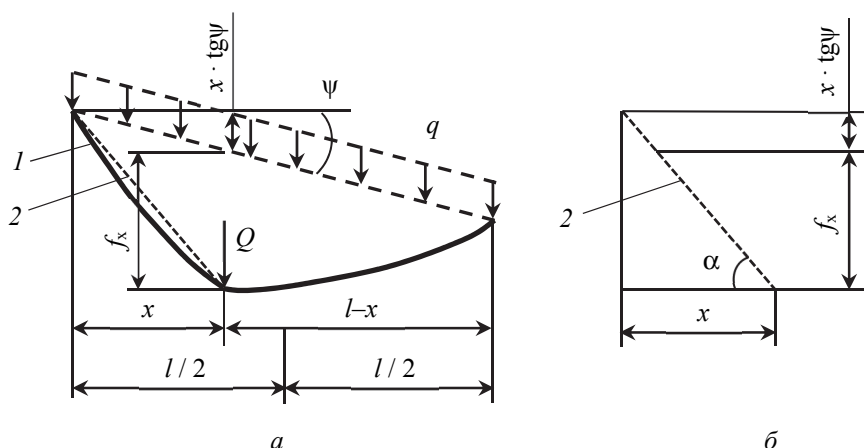


Рис. 6. Схема к определению параметров для расчета угла α :

a – пролет канатной установки;

1 – нить несущего каната; 2 – нить тягового каната;

b – прямая тягового каната

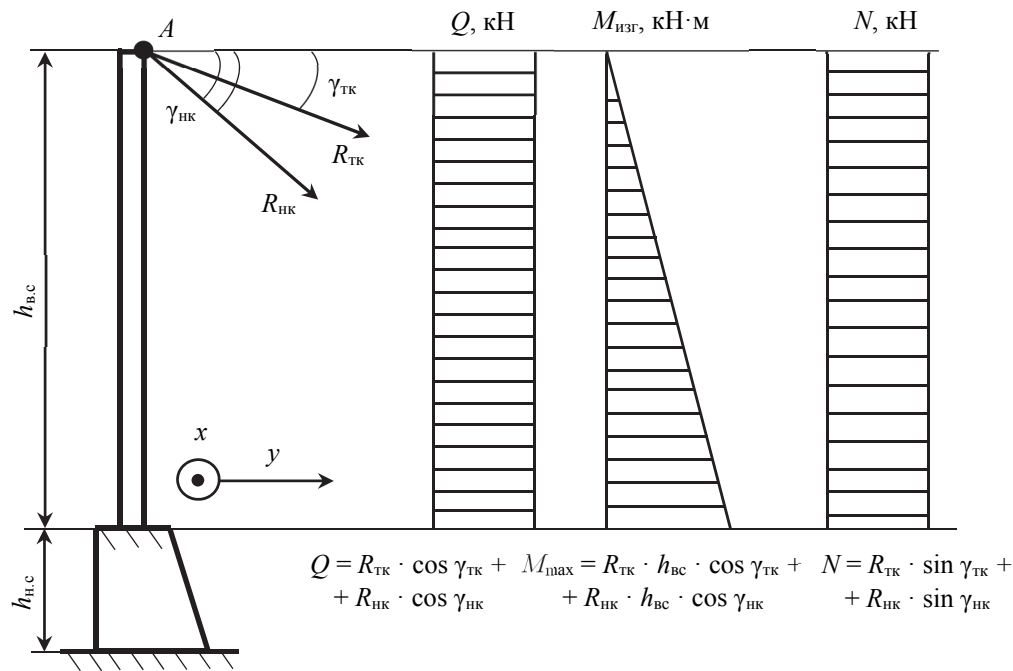


Рис. 7. Расчетная схема для определения поперечной силы Q , изгибающего момента M_{\max} , нормальной силы N

Для данной расчетной схемы точка приложения усилия от натяжения несущего и тягового канатов (т. А) совпадают и плечо силы в обоих случаях составляет $h_{вс}$. Однако возможны случаи, когда блоки данных канатов находятся на разной высоте, и тогда для каждого из усилий плечо силы будет равно соответствующему расстоянию до жесткой заделки.

При расчете сжимающей составляющей не учитывают влияние натяжения растяжек, так как в изученной литературе нет сведений о рекомендуемой величине монтажного натяжения

растяжек [11–16, 18–23]. В окончательном виде для разработанной методики внешними силами являются усилия от несущего $T_{нк}$, тягового $T_{тк}$. Усилие от возвратного каната $T_{вк}$ не будет учитываться, так как оно возникает в тот момент, когда тяговый канат не натянут.

Как видно из расчетной схемы (рис. 7), мачта испытывает напряжения сжатия и изгиба, поэтому расчет ее сечения будем вести на основании полученных реакций N и M_x по формуле для определения нормальных напряжений от совместного действия изгиба и сжатия [2]:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{сж} + \sigma_{из} = \frac{N_{\max}}{A} + \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{R_{ТК} \cdot \sin \gamma_{ТК} + R_{НК} \cdot \sin \gamma_{НК}}{A} + \frac{R_{ТК} \cdot h_{вс} \cdot \cos \gamma_{ТК} + R_{НК} \cdot h_{вс} \cdot \cos \gamma_{НК}}{W_x}, \quad (12)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение, МПа; $\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия, МПа; $\sigma_{из}$ – напряжение изгиба, МПа; N – продольная сила, Н; A – площадь поперечного сечения, мм²; M_{\max} – максимальный изгибающий момент, Н·мм; W_x – момент сопротивления сечения относительно оси x , мм³; $R_{ТК}$ – равнодействующая от действия усилия в тяговом канате, Н; $R_{НК}$ – равнодействующая от действия усилия в несущем канате, Н; $\gamma_{ТК}$ – угол наклона вектора равнодействующей в тяговом канате к горизонтальной плоскости, град; $\gamma_{НК}$ – угол наклона вектора равнодействующей в несущем канате к горизонтальной плоскости.

Определение параметров осуществляется из условия прочности по нормальным напряжениям:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma], \quad (13)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение, МПа.

Так, определившись с материалом, мы заранее можем знать допускаемое напряжение $[\sigma]$. Тогда

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{M_{\max}}{W_x} \leq [\sigma]. \quad (14)$$

Принимаем квадратное сечение мачты, тогда

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{b^2} + \frac{M_{\max}}{\frac{b^3}{6}} \leq [\sigma]. \quad (15)$$

Зависимости для определения параметров сечения

Тип сечения	Зависимость для определения параметра сечения
Квадратное полое ($B = 2 \cdot b$)	$[\sigma] \cdot b^3 - 1,33 \cdot N \cdot b - 6,41 \cdot M_x = 0$
Кольцевое $c = d / D$	$[\sigma] \cdot D^3 - \frac{1,25 \cdot N \cdot D}{(1 - c^2)} - \frac{10 \cdot M_x}{(1 - c^4)} = 0$

Умножая все члены уравнения на b^3 , приводим выражение к кубическому уравнению (16):

$$[\sigma] \cdot b^3 - N \cdot b - 6 \cdot M_x = 0. \quad (16)$$

С помощью данного уравнения по уже полученным значениям N и M_x и любого математического пакета, например Mathcad, можно решить кубическое уравнение, и единственный действительный корень будет соответствовать минимальному значению параметра сечения (сторона, диаметр).

Аналогичные операции были выполнены для кольцевого сечения и занесены в таблицу.

Выводы. В данной статье предлагается методика подбора параметров сечения для наиболее

распространенной конструкции МКТУ – установок с неподвижным несущим канатом и цельнометаллической мачтой. Данная методика может быть легко запрограммирована в любой математической среде (например, MathCad). Задав изначально определенные заранее основные параметры h_m , $T_{нк}$, $T_{тк}$, можно быстро определить минимальные параметры сечения в зависимости от выбранного типа сечения.

По разработанной методике могут проектироваться мачты таких установок, как МТК-431, Ritter KSK-1, Ritter KSK-3, TST Junior, Larix 3T, Larix Lamako, Konrad Combi-Yarder, TST-400 и другие установки с базовой машиной в виде трактора и двухсекционной мачтой.

Список литературы

1. Канатные установки Wyssen. URL: <https://www.wyssenseilbahnen.com/en/wyssen-cable-crane/> (дата обращения: 29.03.2021).
2. Степин П. А. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1979. 312 с.
3. Mike Lulay. Yarding and loading: handbook. Osha, 2010. 164 с.
4. Канатные установки Larix. URL: <https://www.forest-machinery.cz/tag/forest-cableways/> (дата обращения: 29.03.2021).
5. Канатные установки TST. URL: <http://tst-forestry.com/seilkraeneindex> (дата обращения: 29.03.2021).
6. Канатные установки Koller. URL: <https://kollergmbh.com/en/yarder> (дата обращения: 29.03.2021).
7. Канатные установки Madill. URL: <https://www.madillequipment.com/172-tower-yarder.php> (дата обращения: 16.02.2021).
8. Канатные установки Grizzly. URL: <http://www.forst-service.com/Grizzly%20400-Yarder.htm>. (дата доступа: 16.02.2021).
9. Канатные установки Konrad. URL: <https://www.forsttechnik.at/products/tower-yarders/kms/km40-2> (дата обращения: 16.02.2021).
10. Канатные установки SLP Krtiny. URL: <http://www.slpkrtiny.cz/ru/eieel-lner-al-nleuiinnu/elni-l-errci/elni-l-errci/larix-3t/> (дата обращения: 16.02.2021).
11. Адамовський М. Г., Мартинців М. П., Бадера Й. С. Підвісні канатні лісотransпортні системи. Київ: ІЗМН, 1997. 156 с.
12. Ильяшенко Б. Р. Расчет высот мачт при полуподвесной трелевке по горизонтальному волоку. Труды ЦНИИМЭ. Сер.: Вопросы шпалопиления и горных лесозаготовок. Химки, 1974. С. 33–38.
13. Рахманов С. И. К вопросу о расчете трелевочных мачт // Лесной журнал. 1959. Вып. № 5. С. 62–69.
14. Мартинців М. П., Бичинюк І. В. Дослідження коливальних штучних щогл канатних лісотransпортних установок // Науковий вісник. 2007. Вип. 17.1. С. 86–91.
15. Бичинюк І. В. Динамічна стійкість штучних проміжних опор канатних лісотransпортних систем // Науковий вісник. 2007. Вип. 17.2. С. 101–106.
16. Тулатов В. А., Дроздовский В. Г. Расчет искусственных промежуточных опор воздушно-трелевочных установок // Труды ЦНИИМЭ. Сер.: Погрузочно-разгрузочные машины и канатные установки. Химки. 1966. С. 101–112.
17. Кузьмин А. В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. Минск. Выш. шк., 1983. 350 с.
18. Дукельский А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. М.; Л.: Машиностроение, 1966. 484 с.

19. Исследование процесса трелевки хлыстов на заболоченных лесосеках канатными установками в зимний период. А. О. Шошин [и др.] // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы 1-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 2017. С. 72–76.

20. Коробкин В. А., Ледвик М. В. Машина трелевочная канатная на базе трактора «БЕЛАРУС» // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы 1-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БГТУ, 2017. С. 108–111.

21. Horek P. Lesní lanovky. 2007. Praha – Czech Republic. 104 s. (In Czech).

22. Štollmann V., Ilčík Š., Nikitin J.R. Rekuperačné lanové zariadenia. Vysokoškolská učebnica, Technická univerzita vo Zvolene. 2017. 171 s. (In Slovak).

23. Некрасов Р. М. Монтаж оборудования на лесосеке. М.: Лесная пром-сть, 1964. 214 с.

References

1. Wyssen cable crane. Available at: <https://www.wyssenseilbahnen.com/en/wyssen-cable-crane/> (accessed 29.03.2021) (In Russian).

2. Stepin P. A. *Soprotivleniye materialov* [Mechanics of materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 312 p. (In Russian).

3. Mike Lulay. Yarding and loading: handbook. Osha, 2010. 164 c.

4. Cable yarders Larix. Available at: <https://www.forest-machinery.cz/tag/forest-cableways/> (accessed 29.03.2021) (In Russian).

5. Cable yarders TST. Available at: <http://tst-forestry.com/seilkraeneindex> (accessed 29.03.2021) (In Russian).

6. Cable yarders Koller. Available at: <https://kollergmbh.com/en/yarder> (accessed 29.03.2021) (In Russian).

7. Cable yarders Madill. Available at: <https://www.madillequipment.com/172-tower-yarder.php> (accessed 16.02.2021) (In Russian).

8. Cable yarders Grizzly. Available at: <http://www.forst-service.com/Grizzly%20400-Yarder.htm> (accessed 16.02.2021) (In Russian).

9. Cable yarders Konrad. Available at: <https://www.forsttechnik.at/products/tower-yarders/kms/km40-2> (accessed 16.02.2021) (In Russian).

10. Cable yarders SLP Krtiny. Available at: <http://www.slpkrtiny.cz/ru/eieel-lner-al-nleuiinnu/elni-l-errci/elni-l-erric/larix-3t/> (accessed 08.11.2018) (In Russian).

11. Adamovskiy M. G., Martyntsyv M. P., Badera I. S. *Pidvisni canatni lisotransporni sistemy* [Cable yarding systems]. Kiev, IZMN Publ., 1997. 156 p. (In Ukrainian).

12. Il'yashenko B. R. Calculation of the heights of towers with semi-suspended skidding along a horizontal trail. *Trudy TSNIIME* [Proceedings of CRIME], series: Sleep sawing and mountain logging. Himki, 1974, pp. 33–38 (In Russian).

13. Rahmanov S. I. On the issue of calculating yarding towers. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal], issue no. 5. 1959, pp. 62–69 (In Russian).

14. Martyntsyv M. P., Bichinyuk I. V. Investigations of vibrations of single towers of cable yarding systems. *Naukoviy visnik* [Science bulletin], 2007, issue no 17.1, pp. 86–91 (In Ukrainian).

15. Bichinyuk I. V. Dinamic strength of intermediate supports of cable yarding systems. *Naukoviy visnik* [Science bulletin], 2007, issue no 17.2, pp. 101–106 (In Ukrainian).

16. Tulatov V. A., Drozdovskiy V. G. Calculation of artificial intermediate supports for cable yarding systems. *Trudy TSNIIME* [Proceedings of CRIME], series: Material handling machines and ropeways. Himki, 1966, pp. 101–112 (In Russian).

17. Kuz'min A. V. *Spravochnik po raschetam mekhanizmov pod'emno-transportnykh mashin* [Handbook on the calculations of the mechanisms of hoisting-and-transport machines]. Minsk, Vysheyshe shkola Publ., 1983. 350 p. (In Russian).

18. Dukelsky A. I. *Podvesnyye kanatnyye dorogi i kabel'nyye krany* [Suspended ropeways and cable cranes]. Moscow, Leningrad Mashinostroyeniye Publ., 1966. 484 p. (In Russian).

19. Shoshyn A. O., Protas P. A., Mokhov S. P., Grechko V. V. Investigation of the process of skidding tree-lengths on boggy woodlands by rope installations in winter. *Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging industry: problems and solutions: materials of International scientific-technical conference]. Minsk, 2017, pp. 108–111 (In Russian).

20. Korobkin V. A., Ledvik M. V. Skidding machine on the basis of the tractor “BELARUS”. *Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging industry: problems and solutions: materials of International scientific-technical conference]. Minsk, 2017, pp. 108–111 (In Russian).

21. Horek P. *Lesní lanovky* [Cable yarding systems]. Praha, Czech Republic Publ., 2007. 104 p. (In Czech).
22. Štollmann V., Ilčík Š., Nikitin J. R. *Rekuperatívne lanové zariadenia* [Recuperative cable yarding systems]. University textbook, Technical University in Zvolen Publ., 2017. 171 p. (In Slovak).
23. Nekrasov R. M. *Montazh oborudovaniya na leseke* [Installation of equipment at the cutting area]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 214 p. (In Russian).

Информация об авторах

Шошин Артем Олегович – ассистент кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: raul777gol@mail.ru, shoshyn@belstu.by

Дорожко Александр Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dorozhko@belstu.by, 123dor@mail.ru.

Штолманн Владимир – кандидат технических наук, доцент кафедры лесозаготовок, логистики и мелиорации. Технический университет в Зволене (96001, г. Зволен, Масарика, 24, Словацкая Республика). E-mail: stollmannv@tuzvo.sk

Ярмолик Сергей Васильевич – старший преподаватель кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: yarmolik@belstu.by, sv.ya@tut.by

Information about the authors

Shoshyn Artsiom Olegovich – assistant lecturer, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: raul777gol@mail.ru, shoshyn@belstu.by

Dorozhko Aleksandr Valentinovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dorozhko@belstu.by, 123dor@mail.ru

Stollmann Vladimir – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Forest Harvesting, Logistics and Soil/Land Ameliorations. Technical University in Zvolen (24, Masaryka str., 96001, c. Zvolen, Slovakia). E-mail: stollmannv@tuzvo.sk

Yarmolik Sergey Vasil'evich – Senior Lecturer, the Department of Material and Construction Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yarmolik@belstu.by

Поступила 06.09.2021