

В. Д. Мартынихин

РАСЧЕТ ТЯГОВО-НЕСУЩИХ КАНАТОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ СОВМЕСТНО НАГРУЖЕННЫМИ ВЕТВЯМИ, ОБРАЗУЮЩИМИ ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР

В настоящее время к наиболее рациональным канатным системам трелевочных установок относятся системы из тягово-несущих канатов с двумя параллельными ветвями, которые в зависимости от вида трелевки нагружены совместно одной или несколькими поперечными силами. Особенность этих систем в том, что функции несущего, тягового и холостого канатов выполняет один замкнутый контур, состоящий из тягово-несущего и возвратно-несущего канатов, соединенных между собой на грузонесущем органе. В замкнутом контуре оба каната, объединенные кареткой, выполняют функции несущего каната. При этом при помощи первого каната передается тяговое усилие, необходимое для движения системы с грузом, а при помощи второго система возвращается в обратном направлении.

Устройство и работа трелевочных установок с тягово-несущими канатами, предложенных автором, приводится в ранее опубликованных в периодических журналах по лесному делу работах [1—3]. Установкам присвоены определенные марки, не связанные с марками серийных канатных установок, применяющихся в лесной промышленности. Целесообразно более точно отражать величину грузоподъемности в наименовании канатных полуподвесных установок, при работе которых часть веса транспортируемой пачки передается на канаты в виде поперечной нагрузки, а через собирательную ветвь каната передается усилие для волочения пачки по земле. Соотношение этих сил характеризует параметры установки. В связи с этим предлагается для полуподвесных установок грузоподъемность характеризовать дробью, где в числителе указывается величина поперечной нагрузки, а в знаменателе — тяговое усилие в собирательной ветви (например, ТУ-1,5/3).

Указанные канатные системы работают по так называемой «схеме ослабленного каната», т. е. натяжение канатов создается при действии на него поперечной нагрузки при каждой прицепке груза. Это существенно облегчает выполнение расчета весомой гибкой нити, которую можно назвать канатной нитью, подразумевая под этим натянутый между опорами канат, воспринимающий поперечную нагрузку от собственного веса и груза. Дело в том, что в этом случае длина канатной нити и ее геометрическая форма устанавливаются под действием усилия, развиваемого лебедкой, и можно говорить об определенной зависимости между натяжением и провесом каната, которая для ряда характерных видов нагрузки выражается несложной формулой. В этом случае удобно пользоваться формулами, отражающими указанную зависимость при расположении сосредоточенной нагрузки в середине пролета, когда натяжение каната наибольшее.

Прежде всего рассмотрим спаренную работу ветвей каната в замкнутом контуре, которая достигается за счет запасовки канатов в

каретке. При этом возможны варианты, показанные схематически на рис. 1 и 2 (на рисунках не показаны провесы канатов от собственного веса, ходовая часть каретки изображена в виде одного катка и др.).

Вариант 1. Усилие для трелевки леса S приложено через свободный конец тягово-несущего каната (см. рис. 1). На рис. 1, а показан начальный момент формирования воя, когда каретка над землей поднимается за счет натяжения верхней ветви. В этом случае под действием

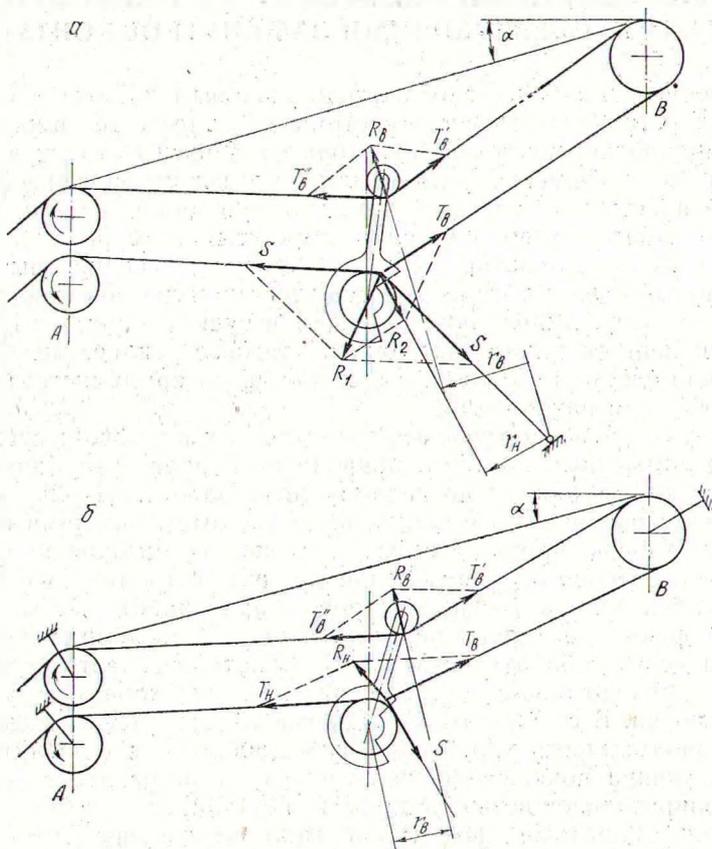


Рис. 1. Схема сил, действующих на каретку, когда усилие трелевки приложено к свободному концу тягово-несущего каната:

а — в момент формирования воя; б — при трелевке леса.

равнодействующей силы R_2 каретка будет передвигаться вправо и максимально приблизится к месту присоединения тягово-несущего каната к грузу.

В заключительной стадии формирования воя и в транспортном положении (см. рис. 1, б) соединительное звено упрется в корпус каретки. При этом натяжение в тягово-несущем канате T_H превысит усилие S , и «подъемная сила» системы будет создаваться также и за счет натяжения нижней ветви.

Таким образом, при данной запасовке канатов каретка находится в наиболее низком положении над землей у места присоединения кана-

та к прuzu. Ее положение характеризуется задним углом наклона. При этом опрокидывающий момент, возникающий от сил, действующих на нижнюю ветвь, уравнивается моментом силы R_b , действующей на верхнюю ветвь. При такой схеме запасовки в конструкции каретки возможна и целесообразна при работе установки на спуск постановка подпружиненного зажима, действующего от натяжения верхней ветви. Эта мера позволит удерживать каретку в воздухе при отгоске сборного отрезка каната и чокеров к поваленному лесу.

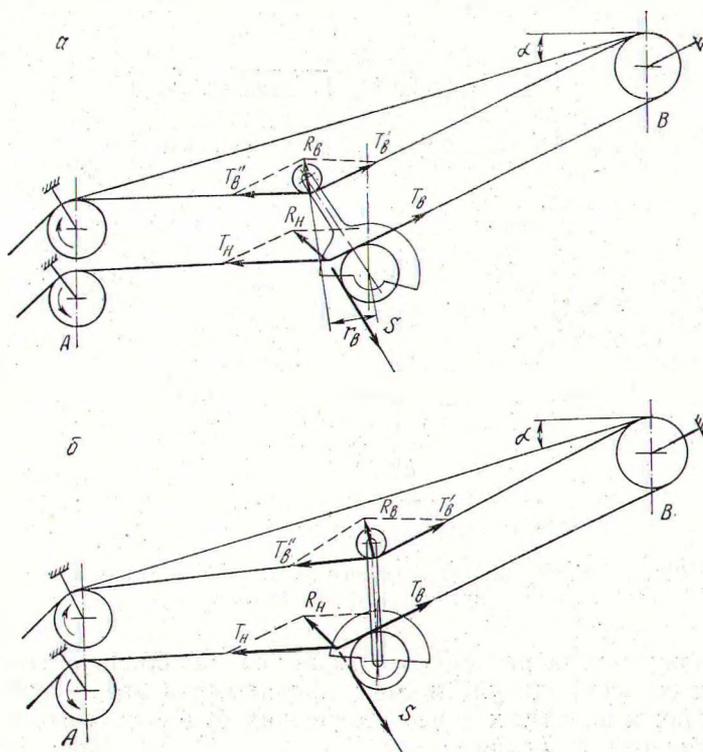


Рис. 2. Схема сил, действующих на каретку, когда усилие трелевки приложено к свободному концу возвратно-несущего каната:

a — с ходовыми катками, установленными на каркасе каретки; *b* — с шарнирным присоединением ходовых катков к каркасу каретки.

К достоинствам такой запасовки канатов относится также то, что, не нагружая систему большой поперечной нагрузкой, можно реализовать большую величину усилия S . Это облегчает трелевку леса в труднопроходимых местах.

Вариант 2. Усилие для трелевки леса S приложено к свободному концу возвратно-несущего каната (см. рис. 2, *a*). В этом случае при $S \leq T_b$ усилие, необходимое для трелевки, равно натяжению системы. Периодически меняя натяжение, можно осуществлять транспортировку вoза с переменной длиной сборного участка возвратно-несущего каната, т. е. производить поднятие каретки над землей на определенную высоту, не изменяя высоты поднятия над землей вoза при полуподвешенной трелевке.

Применение этого варианта целесообразно для работы многопролетных установок, так как известно, что динамика перехода через промежуточную опору зависит от угла перегиба на ней каната.

Вариант 3. Ходовая часть каретки обоих вариантов может быть соединена с остальной частью шарнирно (см. рис. 2, б). Такая конструкция позволяет передавать на верхнюю ветвь вертикальную нагрузку, разгрузив ее от действия опрокидывающего момента. При этом можно добиться большей параллельности ветвей при работе канатной системы, чем в рассмотренных первых случаях.

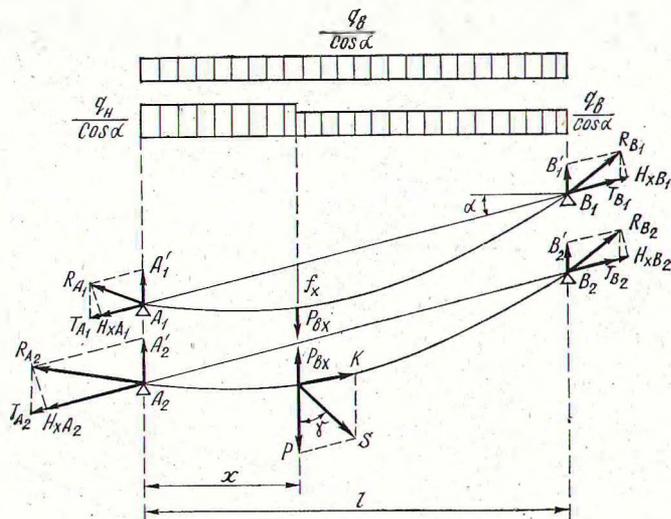


Рис. 3. Схема для определения натяжений в ветвях замкнутого контура канатов.

В основу метода расчета положена теория гибких нитей с малыми стрелками со всеми допущениями, принятыми в этой теории. О всех отступлениях и вносимых в нее уточнениях будет говориться в процессе дальнейшего изложения.

Рассмотрим канатную систему, изображенную на рис. 3. Расстояние между ветвями каната в пролете принимаем одинаковым.* Оно обусловлено запасовкой канатов на опорах A и B и на каретке. При этом имеется в виду такое закрепление каретки на нижней ветви, при котором исключено возникновение больших внутренних моментов сил, влияющих на нагружение ветвей.

Отбросив связь между ветвями, налагаемую кареткой, и заменив ее сосредоточенными силами, получим две ветви. Верхняя ветвь будет нагружена равномерно распределенной нагрузкой от веса возвратно-несущего каната q_b и силой P_{bx} , а нижняя — равномерно распределенной нагрузкой веса тягово-несущего q_1 и возвратно-несущего q_b канатов, силой P_{bx} , направленной вверх, и силами K и P , полученными после разложения силы S по двум направлениям — параллельному хорде пролета и по вертикали.

* Здесь мы не рассматриваем влияния непараллельности расположения ветвей, влияния на величину натяжения из-за монтажа канатной системы или наклонов каретки в процессе работы.

Рассматривая систему подобным образом, мы выделяем вертикальную составляющую усилия, действующего на верхнюю ветвь. В действительности равнодействующая давления катка не всегда направлена вертикально, особенно при движении каретки по наклонному пролету, и на каток действует также горизонтальная составляющая равнодействующей. Если бы верхняя ветвь работала как несущий канат, то в этом случае под действием горизонтальной составляющей каток двигался бы по канату. В рассматриваемой системе действие горизонтальной составляющей воспринимается нижней ветвью, к которой прикрепляется каретка, и воздействие этой составляющей почти равно нулю. Попутно заметим, что при расчете несущих канатов эта погрешность остается.

Для каждой из ветвей из условий статического равновесия можно записать уравнения для определения натяжений. Очевидно, эти величины будут отличаться на величину к. п. д. блока η_B (или блоков, если система многопролетная).

Отсюда, рассматривая натяжения на опоре B , можно найти выражение для силы

$$P_{ax} = \frac{(Px - Kf_x \cos \alpha) \eta_B}{x(1 + \eta_B)} + \frac{x(q_T - q_b)\eta_B - q_b l(1 - \eta_B)}{2 \cos \alpha(1 + \eta_B)}. \quad (1)$$

Принятые в формуле (1) обозначения понятны из рис. 3.

Силы P и K в свою очередь можно выразить через усилие, необходимое для трелевки леса:

$$K = S \frac{\sin \gamma}{\cos \alpha}, \quad (2)$$

$$P = S(\cos \gamma \pm \sin \gamma \operatorname{tg} \alpha). \quad (3)$$

Знаки (+) и (-) в формуле (3) соответствуют работе установки «на спуск» и «на подъем».

Величина силы P_{bx} в основном зависит от первого члена формулы, для практических расчетов вторым членом в формуле (1) можно пренебречь. Кроме того, если в эту формулу подставить значения сил K и P , то получим зависимость для определения нагрузки, воспринимаемой верхней ветвью при $x = 0,5l$.

$$P_b = \frac{S \sin \gamma \eta_B}{l(1 + \eta_B)} [l(\operatorname{ctg} \gamma \pm \operatorname{tg} \alpha) - 2l]. \quad (4)$$

В формуле знак (+) принимается при работе установки «на спуск», а знак (-) «на подъем».

При работе канатной системы величина P_b , как правило, всегда положительна, что указывает на совместную работу ветвей канатов. Однако структура формулы не исключает получение отрицательных значений P_b , что более вероятно при работе установки «на подъем». Это указывает на «обратный провес» канатов под действием усилия S , т. е. на случай, не имеющий практического значения.

Зная величину P_b , можно определить натяжение канатов и их сечение.

Натяжение в верхней ветви, т. е. в возвратно-несущем канате, при расположении груза в середине пролета может быть определено по известной формуле с подстановкой в нее значения P_b :

$$T_b = \frac{l^2}{8f \cos \alpha} \left(\frac{q_b}{\cos \alpha} + \frac{2P_b}{l} \right). \quad (5)$$

Натяжение тягово-несущего каната, пренебрегая разностью веса канатов q_t и q_b , будет равно

$$T_n = T_b + K = T_b + S \frac{\cos \gamma}{\cos \alpha}. \quad (6)$$

Более точен расчет при использовании зависимостей, приведенных в нашей работе [4]. Натяжение возвратно-несущего каната у верхней опоры при сохранении принятых в указанной работе обозначений будет равно

$$H_{xb} = \frac{q_b l(l + 2f \sin 2\alpha) + 2P_b(l + f \sin 2\alpha) \cos \alpha}{8f \cos^2 \alpha}. \quad (7)$$

Необходимая площадь поперечного сечения всех проволок каната (металлическое сечение) может быть найдено по формуле

$$F_m^b = \frac{2P_b n \cos \alpha (l + f \sin 2\alpha)}{8\sigma_{pa} f \cos^2 \alpha - 0,01 \ln(l + 2f \sin 2\alpha)}, \quad (8)$$

где σ_{pa} — расчетный предел прочности проволок, отнесенный к агрегатной прочности каната;

n — коэффициент запаса прочности каната.

По полученному F_m^b определяется вес 1 п. м. каната, который равен

$$q_b = 0,01 F_m^b.$$

Величины F_m^b и q_b несколько изменяются до значений выбранного по ГОСТу диаметра каната.

Натяжение у опоры A и подбор поперечного сечения тягово-несущего каната рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} H_{xA}^T &= \frac{(l \mp f \sin 2\alpha)[(P - P_b)l + 2Kf \cos^2 \alpha] + \dots}{16lf \cos^2 \alpha} \dots \rightarrow \\ &\rightarrow \dots \frac{+ l^2 [q_b(l \mp f \sin 2\alpha) + q_n(l \mp 3f \sin 2\alpha)]}{16lf \cos^2 \alpha}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$F_m^T = \frac{n(l \pm f \sin 2\alpha)[4(P - P_b)l \cos \alpha + q_b l^2 + 8Kf \cos^2 \alpha]}{l[16\sigma_{pa} f \cos^2 \alpha - 0,01 \ln(l \pm 3f \sin 2\alpha)]}. \quad (10)$$

При работе установки «на спуск» в формулах перед членами с двойными знаками берутся знаки (-), а при работе установки «на подъем» знаки (+).

Очевидно, приведенный расчет сохраняет силу и для многопролетной установки, если применяется такая же конструктивная схема каретки.

С целью снижения динамических нагрузок при проходе через промежуточную опору многопролетная установка может работать с кареткой, выполненной по другой конструктивной схеме (рис. 4). В каретке две секции; первая состоит из ходовых катков, расположенных на верх-

ней ветви, и чалки канатов для закрепления на нижней ветви, а вторая — из направляющего блока для возвратно-несущего каната, которая соединена с первой при помощи отрезка каната определенной длины. Вторая секция нагружена натяжением возвратно-несущего каната и усилием, необходимым для трелевки леса. Нагрузка на верхнюю ветвь передается через первую секцию.

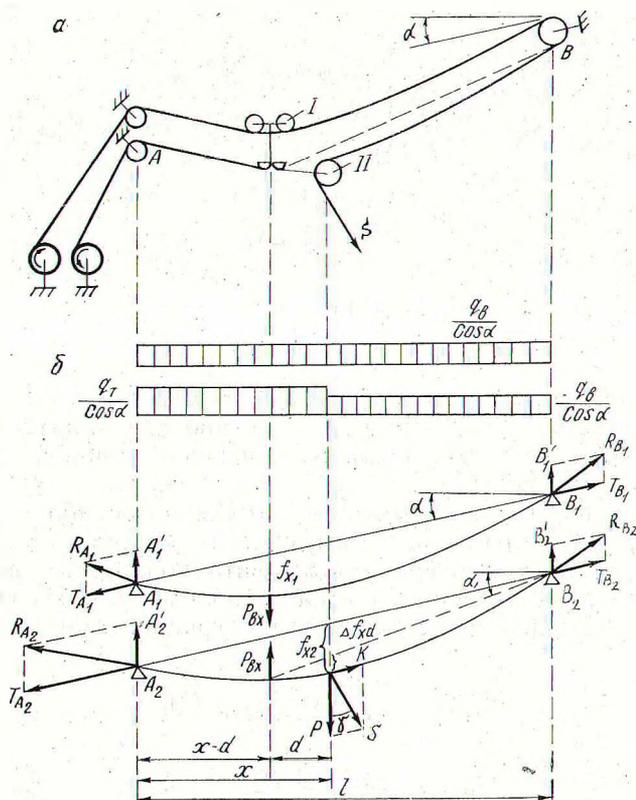


Рис. 4. Схема для определения натяжений в ветвях замкнутого контура канатов с двухсекционной кареткой многопролетной установки:

а — принципиальная схема; б — расчетная схема.

Таким образом, система состоит из двух совместно работающих канатных нитей: нити с переменной длиной пролета — от задней опоры до первой секции каретки, являющейся в этом случае своего рода подвижной опорой; и верхней нити, нагруженной вертикальной силой в обычном пролете установки.

Для получения расчетной схемы исключим связь между ветвями, налагаемую первой секцией каретки, и заменим ее сосредоточенными силами P_{bx} .

Для определения величины P_{bx} требуется составить систему уравнений из условий статики для верхней и нижней ветвей:

$$T_{B_1} = \frac{x(l-x)}{2f_{x_1} \cos \alpha} \left[\frac{2P_{bx}}{l} + \frac{q_b}{\cos \alpha} \right], \tag{11}$$

$$T_{B_2} = \frac{x(l-x)}{2f_{x_2} \cos \alpha} \left[\frac{2\left(P - P_{bx} + P_{bx} \frac{d}{x} - K \frac{f_{x_2}}{x} \cos \alpha\right)}{l} + \frac{q_b l + x(q_T - q_b)}{l \cos \alpha} \right], \quad (12)$$

$$T_{B_2} = \frac{d(l-x-d)}{2\Delta f \cos \alpha_1} \left[\frac{2\left(P - K \frac{\Delta f}{d} \cos \alpha_1\right)}{l-x} + \frac{q_b}{\cos \alpha_1} \right], \quad (13)$$

$$T_{B_1} = \eta_B T_{B_2}, \quad (14)$$

$$f_2 = f_1 + \Delta f, \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha + \frac{f_{x_1}}{l-x}. \quad (16)$$

Принятые в формулах обозначения понятны из рис. 4.

В этой системе уравнение (13) записано для канатной нити с переменной длиной пролета, равной $l-x$, передней опорой которой является первая секция каретки.

Так как канаты систем работают по схеме «ослабленного каната», а провесом f_{x_1} мы можем задаться, система решается довольно легко. В частности, если в уравнения подставить конкретные величины для определенного расположения каретки в пролете, то она сводится к системе из трех уравнений с постоянными коэффициентами

$$\begin{aligned} T_{B_2} &= \frac{1}{f_{x_1}} (A_i P_{bx} + C_i), \\ T_{B_2} &= \frac{C_2 - A_2 P_{bx}}{f_{x_1} + \Delta f} - C_3, \\ T_{B_2} &= \frac{C_4}{\Delta f} - C_5, \end{aligned} \quad (17)$$

где A_i и C_i — действительные числа, полученные после выполнения арифметических вычислений.

Найдя величину P_{bx} изложенным выше методом, можно определить натяжения канатов у опор.

Покажем на примере, как влияет расстояние между секциями каретки d на величину P_{bx} , а следовательно, и на величину натяжения.

Возьмем следующие данные: $S=3000$ кг, $q_b=1$ кг/н. м, $q_T=1,5$ кг/н. м, $l=200$ м, $f_{x_1}=10$ м, $x=0,5$, $l=100$ м, $d=3$ м, $\gamma=30^\circ$; $\alpha=0$, $\eta_B=0,9$.

Подстановка этих данных в уравнении (11)—(16) дает систему уравнений

$$T_{B_2} = 5,5P_{bx} + 550,$$

$$T_{B_2} = \frac{13,6 \cdot 10^4 - 48,5 \cdot P_{bx}}{10 + \Delta f} - 750,$$

$$T_{B_2} = \frac{700}{\Delta f} - 14,5 \cdot 10^3,$$

откуда получим $P_{bx} = 1230 \text{ кг}$, $\Delta f = 0,097 \text{ м}$. Эти значения должны быть несколько уточнены, так как мы ориентировочно задались величинами b_t и q_b . Интересно, что определение P_{bx} по формуле (4) для схемы, показанной на рис. 3, дает результат 1160 кг . Таким образом, смещение первой секции каретки вперед на 3 м увеличивает P_{bx} всего на 70 кг и натяжение на 350 кг . Вместе с тем эта мера позволяет уменьшить динамические нагрузки, действующие на канаты в момент прохода каретки через промежуточную опору. Это объясняется тем, что для прохода первой секции не требуется раскрытия роlikоопоры, в то время как при проходе второй секции она раскрывается, взаимодействуя с клиньями каретки. И в этот момент важно обеспечить стабильное положение роlikоопоры за счет натяжения верхней ветви.

Литература

[1] В. Д. Мартынихин. Трелевочная установка с одним тягово-несущим канатом. «Лесозэксплуатация и лесное хозяйство», 1963, № 10. [2] В. Д. Мартынихин, Б. И. Добрыслов. Канатная установка для первичной трелевки леса в горах. «Лесная промышленность», 1965, № 6. [3] В. Д. Мартынихин. Новые виды трелевочных установок. «Лесозэксплуатация и лесосплав», 1970, № 21. [4] В. Д. Мартынихин. Новый метод статического расчета канатов от действия поперечной нагрузки. В сб.: Механизация лесозаготовок и транспорт леса, вып. 1, 1970.