

К ВОПРОСУ ОБ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЯХ ВЫНОСОВ ПРОДОЛЬНЫХ ЗАПАНЕЙ

Целью данной работы является исследование производственных факторов, приводящих к возникновению упругих деформаций и установление функциональной зависимости между деформациями и приложенными нагрузками.

Вынос продольных запаней подвергается всем видам внешних нагрузок. В местах закрепления за опоры в бревенном пыже и при соприкосновении с берегом канат испытывает значительные контактные и изгибные напряжения. Но определяющими прочностными характеристиками являются касательные и нормальные напряжения, возникающие при внешнем приложении крутящего момента $M_{кр}$ и растягивающего усилия T . При этом для стальных канатов касательные напряжения намного опаснее нормальных [1], так как они являются в первую очередь причиной различных винтовых и петлевых образований, вытягиваемых в дальнейшем номинальным растягивающим усилием в необратимые дефекты, например в виде колышки.

Стальные канаты обладают винтовым изоморфизмом. Любая материальная точка, расположенная на канате при воздействии на него крутящего момента или растягивающего усилия, совершает одновременно вращательное и поступательное движение относительно нейтральной оси каната. При кручении каната в зависимости от направления крутящего момента наблюдается укорачивание или удлинение каната. И соответственно при приложении растягивающего усилия происходит кручение каната в сторону уменьшения его крутки. По этой причине действие растягивающего усилия T , крутящего момента $M_{кр}$ и соответствующие им деформации ϵ и θ рассматриваются во взаимосвязи.

Для прямого участка стального каната в соответствии с [1] связь выражается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} T &= A \epsilon + C\theta; \\ M_{кр} &= G\epsilon + B\theta, \end{aligned} \right\}$$

где A — обобщенный коэффициент жесткости при растяжении и кручении прямого каната соответственно; C — обобщенный коэффициент влияния.

В соответствии с [2]

$$\begin{aligned} A &= EF_{кр} = \cos^4 \alpha \cos^4 \beta; \\ B &= EF_{кр}^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta \sin^2 \beta; \\ C &= EF_{кр} \cos^4 \alpha \cos^3 \beta \sin \beta, \end{aligned}$$

где E — модуль линейной упругости материала каната.

Для углеродистой канатной стали

$$E = 2,16 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2,$$

Здесь F_k — площадь нетто поперечного сечения каната, m^2 ; r — радиус от центра сечения каната до центра пряди, m ; α — угол свивки проволок в прядь; β — угол свивки прядей в канат.

Канат, свернутый в винтовую спираль, будем рассматривать как винтовую многожильную пружину. Основываясь на этом положении [1], можно записать систему обобщенных уравнений для каната, образовавшего винтовую спираль в виде

$$\left. \begin{aligned} T &= a'' \epsilon + c'' \theta; \\ M_k &= c'' \epsilon + b'' \theta. \end{aligned} \right\}$$

Обобщенные коэффициенты жесткости для такого состояния стального каната определяются по формулам:

$$a'' = a - \frac{d'^2}{g};$$

$$b'' = b - \frac{e'^2}{g};$$

$$c'' = c - \frac{d'e'}{g};$$

$$a = a_0 \cos^3 \beta + 2 \frac{c_0}{r_0} \sin^3 \beta \cos^2 \beta + \frac{b_0 \sin^2 \beta + g_0 \cos^2 \beta}{r_0^2} \sin^4 \beta \cos \beta;$$

$$b = a_0 r_0^2 \sin^2 \beta \cos \beta + b_0 \cos^7 \beta + g_0 (1 + \cos^2 \beta)^2 \sin^2 \beta \cos \beta + 2c_0 r_0 \cos^4 \beta \sin \beta;$$

$$c = a_0 r_0 \cos^2 \beta \sin \beta + c_0 (1 + \operatorname{tg}^4 \beta) \cos^5 \beta + \frac{b_0 \cos^2 \beta - g_0 (1 + \cos^2 \beta)}{r_0} \times \sin^3 \beta \cos^2 \beta;$$

$$d' = a_0 \sin^2 \beta - \frac{c_0}{r_0} \cos^2 \beta \sin^3 \beta - \frac{b_0 \sin^2 \beta + g_0 \cos^2 \beta}{r_0^2} \sin^4 \beta \cos \beta;$$

$$e' = a_0 r_0 \sin^3 \beta + c_0 \cos^2 \beta \sin^2 \beta - \frac{b_0 \cos^2 \beta - g_0 (1 + \cos^2 \beta)}{r_0} \sin^3 \beta \cos^2 \beta;$$

$$g = a_0 \frac{\sin^4 \beta}{\cos \beta} - 2 \frac{c_0}{r_0} \sin^5 \beta \cos \beta + \frac{b_0 \sin^2 \beta + g_0 \cos^2 \beta}{r_0^2} \sin^4 \beta \cos^2 \beta;$$

$$a_0 = EF_0 \cos^3 \alpha;$$

$$b_0 = EF_0 r^2 \cos \alpha \sin^2 \alpha;$$

$$c_0 = EF_0 r \cos^2 \alpha \sin \alpha;$$

$$g_0 = \frac{\pi d_0^4}{64} E.$$

В данных формулах характеристики пряди каната имеют индекс "о". С применением приведенных формул составлена программа для вычисления на ЭВМ ЕС-1020 обобщенных коэффициентов жесткости стальных канатов, применяемых на лесосплаве в качестве выносов. Рассмотрим некоторые технологические операции, производимые с выносами при их эксплуатации, для выяснения функциональной зависимости крутильных θ и линейных ϵ перемещений элементов канатов от внешне приложенных крутящего момента $M_{кр}$ и растягивающего усилия T .

Предположим, что на протяжении определенного технологического цикла вынос может нагружаться только одним внешним силовым фактором. В соответствии с этим возникают четыре частные ситуации нагружения, показанные на рис. 1, а—г.

На рис. 1, а показана схема чистого растяжения выноса, когда способ закрепления концов и приложения растягивающего усилия предполагают наличие упругого удлинения при отсутствии крутильных перемещений.

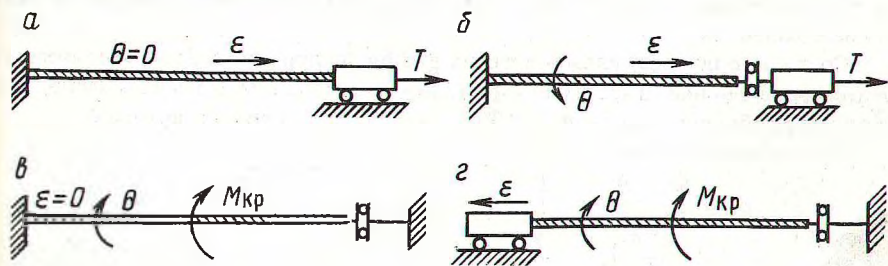
Свободное растяжение выноса (рис. 1, б) характеризуется наличием двух видов деформации и имеет место в том случае, когда один конец его закрепляется с возможностью угловых перемещений, например через вертлюг, или буксирный канат, имеющий жесткость при кручении значительно меньшую, чем сам вынос.

При приложении только крутящего момента возникают ситуации чистого кручения, когда исключены линейные перемещения выноса (рис. 1, в) и свободного кручения (рис. 1, г).

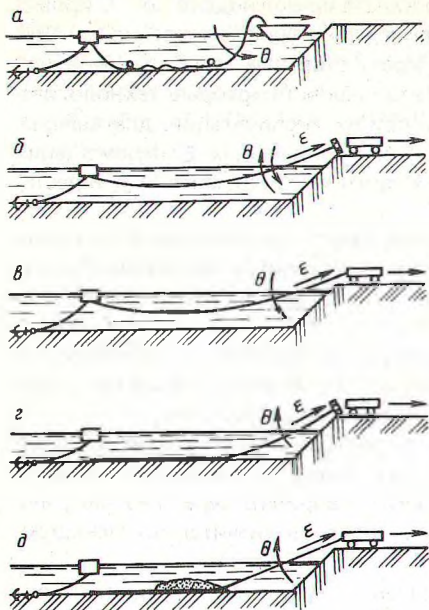
Выносы предназначены для удержания наплавных опор в определенном положении и передают растягивающие усилия на береговые опоры. Таким образом линейные перемещения в выносе неизбежны, что вызывает крутильные деформации, приводящие к возникновению винтовых и петлевых образований в выносе. Соответственно крутильные деформации, уменьшающие модуль крутки каната и предотвращающие формирование в выносе спиралей и петель, являются полезными.

При монтаже продольной запяни осуществляется операция постановки выносов, заключающаяся в растяжке их от наплавных опор, установленных в русле, к соответствующим береговым опорам.

Постановка производится путем роспуска бухты вытягиванием или сброской петель в воду с понтона вручную [3].



Р и с 1. Схема частных нагружений стального каната, используемого в качестве гибкой связи: а, б — чистое и свободное растяжения; в, г — чистое и свободное кручение.



Р и с.2. Схема технологических операций при монтаже и выборке выносов продольных запаней: а — постановка выносов; б, в — набивка выносов при закреплении конца выноса к тяговой машине соответственно через компенсирующее звено и жестко; г, д — выборка выносов при закреплении конца выноса к тяговой машине соответственно через компенсирующее звено и жестко.

Вынос, закрепленный одним концом за наплавную опору, укладывается на дно русла в виде прямых участков, разделенных спиралями и петлями (рис. 2, а). Количество спиралей и петель, направление их свивки и геометрические размеры зависят от направления укладки шлагов бухты, ее диаметра, жесткостных характеристик каната.

В практике по настоящее время большинство операций с запаным такелажем проводится вручную. Для механизации тяжелого и низкопроизводительного труда на переместительных операциях в настоящее время используются установки ЦЛР-153 (на базе трактора ТТ-4), позволяющие собирать выносы диаметром до 32 мм в бухты малых диаметров (до 0,7 м). Роспуск такой бухты вытягиванием или сброской шлагов в воду вручную приводит к образованию большого количества витков спиралей и петель. В дальнейшем спирали и петли вытягиваются в прямой участок с увеличением крутки на 2π при вытяжке каждого полного витка или петли. Отдельные петли затачиваются с образованием колышек.

Состояние выноса, уложенного на дне русла при постановке, аппроксимируется уравнениями деформаций для случая свободного кручения. Используя системы обобщенных уравнений [1, 2], получим значение деформаций:

$$\left. \begin{aligned} &\text{на прямых участках} \\ &\theta = \frac{M_{кр} A}{\Delta_n}; \\ &\epsilon = \pm \frac{M_{кр} C}{\Delta_n}, \end{aligned} \right\}$$

где $\Delta_n = AB - C^2$.

на криволинейных участках

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{M_{кр} a''}{\Delta_c}; \\ \epsilon &= \frac{M_{к} c''}{\Delta_c}, \end{aligned} \right\}$$

где $\Delta_c = a'' b'' - c''^2$

Знак "—" в уравнениях линейной деформации соответствует укорачиванию выноса при его скручивании на прямом участке (кручение против часовой стрелки для канатов правой свивки) и образованию петель на криволинейных участках.

Перед закреплением за береговую опору вынос набивают, т.е. обеспечивают ему необходимое монтажное натяжение с целью уравнивания рабочих нагрузок на все выноса при размещении древесины в запани. Набивку производят трактором или лебедкой. В зависимости от способа закрепления конца выноса за тяговое средство возникают две ситуации.

1. Набивка выноса при закреплении его конца за тяговое средство через вертлюг. Ситуация аппроксимируется уравнениями деформаций для свободно-го растяжения (рис. 2, б)

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \frac{Tb''}{\Delta_c} + \frac{TB}{\Delta_n}; \\ \theta &= \pm \frac{c''T}{\Delta_c} - \frac{CT}{\Delta_n}, \end{aligned} \right\}$$

но

$$\begin{aligned} \frac{Tb''}{\Delta_c} &= \Sigma l_{сп} + \Sigma l_{пт}; \\ \frac{c''T}{\Delta_c} &= 2\pi n, \end{aligned}$$

где $\Sigma l_{сп}$ — удлинение выноса при вытяжке спиралей; $\Sigma l_{пт}$ — удлинение выноса при вытяжке петель; n — количество полных витков спирали или петель.

Тогда

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \Sigma l_{сп} + \Sigma l_{пт} + \frac{TB}{\Delta_n}; \\ \theta &= \pm 2\pi n - \frac{CT}{\Delta_n}. \end{aligned} \right\}$$

Знак "—" перед многочленом $\frac{c''T}{\Delta_c}$ соответствует раскручиванию каната, что имеет место для канатов правой свивки при вытяжке бухты, уложенной по часовой стрелке. Упругие крутильные деформации, возникающие при вытяжке спиралей и петель в зоне конца выноса, оснащенного вертлюгом, компенсируются.

2. Набивка выноса при жестком закреплении конца за тяговое средство (рис. 2, в) аппроксимируется как случай чистого растяжения. Поскольку конец выноса крутильных перемещений не имеет, максимальный угол закручивания выноса определяется количеством сброшенных в воду шлангов при постановке выноса и составляет $\theta = 2\pi n$.

Выборка выносов производится при демонтаже запани в конце навигации и осуществляется тяговым средством (трактором, лебедкой, специальным устройством, например ЦЛР 153) после отдачи конца выноса от наплавной опоры. При этом в зависимости от способа закрепления его конца за тяговое средство и состояние выноса деформация кручения протекает по-разному.

Конец выноса закреплен через компенсирующее промежуточное звено (рис. 2, г). Ситуация аналогична операции набивки выноса. Аппроксимируется как случай свободного растяжения для прямого каната:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \frac{TB}{\Delta_n}; \\ \theta &= \pm \frac{CT}{\Delta_n}. \end{aligned} \right\}$$

Деформации максимальны в начальный период выборки, когда велико значение растягивающего усилия T .

Часто по различным причинам вынос выбирается в несколько приемов. При этом буксирный трос несколько раз перезакрепляется ближе к русловому концу выноса. Возникающие касательные напряжения в натянутой ветви выноса закручивают свободную ветвь в винтовую спираль, как правило, образующую при последующей вытяжке колышку. При выборке выноса, замытого по каким-либо причинам русловыми наносами (рис. 2, д), создается особая ситуация, когда усилия выборки очень велики. Соответственно упругие деформации достигают больших размеров.

При жестком закреплении за тяговое средство (рис. 2, д) конец выноса лишается возможности совершать крутильные перемещения.

Ситуация аппроксимируется как случай чистого растяжения прямого каната:

$$\left. \begin{aligned} T &= A\epsilon; & \epsilon &= \frac{T}{A}; \\ M_{кр} &= C\epsilon; & M_{кр} &= \frac{C}{A}T. \end{aligned} \right\}$$

В результате следует сделать вывод, что существующая технология постановки выносов несовершенна в силу наличия больших по модулю деформаций кручения. Поэтому рекомендуется набивку выносов производить с применением вертлюга, закрепленного за конец каната. Следует отметить, что при выборке выносов, особенно тяжелых и замытых, значения упругих крутильных

деформаций сильно увеличиваются. При выборке же выноса в несколько ветвей необходимо закреплять его за тяговое средство жестко.

Полученные аналитические выражения учитывают все характерные эксплуатационные ситуации, для которых установлена функциональная зависимость между деформациями и вызывающими их внешними нагрузками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. — Киев: Техника. — 1966, с. 35–87.
2. Флоринский Ф.В. К вопросу определения параметров уравнений упругих продольно-крутильных колебаний проволочных канатов. — В сб.: Стальные канаты. Киев: Техника, 1965, № 2, с. 17–24.
3. Инструкция по изысканиям, проектированию, строительству, монтажу и эксплуатации запаней. — Лесн. пром-сть. М.: ЦНИИлесослав, 1971, с. 35–40.