

Фидровская Н.Н., д-р техн. наук, проф.,
Писарцов А.С., ст. преп.,
Ломакин А.А., аспирант

Украинская инженерно-педагогическая академия

ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОГНУТОГО КАНАТА НА БЛОКАХ И БАРАБАНАХ

delgado@bk.ru

В статье рассмотрено поведение каната при набегании его на блоки и барабаны. Для этого проведен анализ двадцати литературных источников по вопросу формирования изогнутого каната на блоках и барабанах. Проанализированы основополагающие работы таких ученых как: Klein E., Прокофьев В. И., Дукельский А. И., Жуков Л. И., Никитин И. Ф., Глушко М. Ф., Рабинович И. М., Фидровская Н.Н. и другие. Представлены схемы изгиба каната на блоке, а также проведен анализ существующих расчетных схем.

Ключевые слова: канат, блок, барабан, дифференциальные уравнения, изгиб, смещение проволок, пряди.

Введение. Стальной канат является многостержневой системой с достаточно сильным внутренним конструкционным трением. Поэтому известные решения задачи изгиба стального каната в чисто упругой постановке не описывают особенности поведения, связанные с его свойствами, например, различие форм набегающей и сбегавшей ветвей на переходных участках у блока, образование волны обратного перегиба за блоком, диссипацию энергии за цикл изгиб-выпрямление и другие явления.

Огибание блока, барабана, шкива - наиболее распространенный случай работы каната на изгиб - представляет собой движение каната вдоль себя по сложной кривой, включающей участок постоянной кривизны (собственно дугу обхвата) и участки переменной кривизны в зонах набегания на блок и сбегания с него (переходные участки).

Основная часть. Потеря прочности канатов при разрушении на неподвижных блоках исследователями объясняется по-разному. Е. Клейн [1], а несколько ранее Р. Финдейс указывают, что при изгибе каната на блоке силы трения противодействуют сдвигу проволок друг относительно друга. Для преодоления этих сил требуется дополнительное усилие, что приводит к перенапряжению элементов каната. В противовес такому утверждению В. Н. Блох [2] считает, что наличие сдвига проволок в канате не вызывает перенапряжения его элементов.

На основании опытов В. Вернле пришел к выводу, что в изогнутом спиральном канате уравновешивание напряжений растяжения и сжатия может произойти только при отсутствии сил трения. Поэтому, если шаг свивки не укладывается целым числом в дуге изгиба (длина дуги обхвата не кратна шагу), то будет возрастать растягивающее напряжение в одной части пряди и уменьшаться в другой (рис. 1, а). При изгибе каната наружная проволока а (рис. 1, б),

сдвинутая относительно внутренней в на 180° , закручивается быстрее.

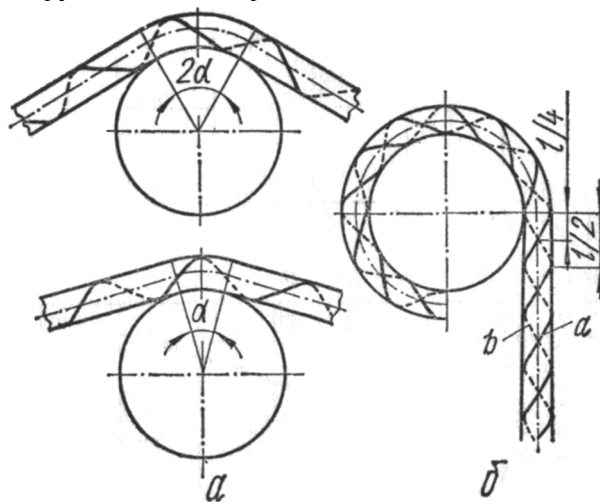


Рис. 1. Схема изгиба каната на блоке:

а – с малым углом обхвата; б – с большим углом обхвата

Следовательно, проволока а дополнительно нагружается растяжением, а проволока б разгружается. Дополнительные растяжения достигают максимального значения на расстояниях $1/4$ и $3/4$ шага свивки от первой точки соприкосновения каната с блоком при его набегании и равны нулю на расстоянии $1/2$ шага и одного шага свивки.

М. Леганер [3], соглашаясь с доводами В. Вернле, считает, что при изгибе каната возникает крутящий момент, стремящийся повернуть канат вокруг оси в направлении его свивки и тем самым увеличить напряжения в проволоках.

В. Пангель, О. Крафт, В. И. Прокофьев [4], А. И. Дукельский [5...7], А. И. Колчин [8] провели многочисленные исследования, пытались установить влияние конструкции каната, отношения D/d , диаметров проволок и ряда других факторов на потерю разрывной прочности каната при разрушении на неподвижных блоках.

В результате этих исследований выяснилось, что потеря прочности каната незначительна (до 9%) независимо от конструкции каната при отношении $D/d > 30$. Малая потеря прочности каната объясняется тем, что после достижения в крайних волокнах проволок суммарных напряжений от изгиба и растяжения, равных пределу текучести, происходит перераспределение нагрузок и в дальнейшем растягивающая нагрузка в первую очередь воспринимается недонапряженными проволоками.

Исследуя свободный изгиб натянутого каната и рассматривая передвижку сечений проволок на участке, на котором происходит смещение проволок при изгибе, Л. И. Жуков [9, 10] определил возникающее среднее относительное удлинение ε и напряжение растяжения, связанное со свободным изгибом,

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (1)$$

Несмотря на правильную физическую трактовку явлений, происходящих в канате при его свободном изгибе, в теоретических исследованиях Л. И. Жукова много неточностей. Прежде всего задача рассматривается в одноосном представлении, то есть учитываются действия сил и моментов только относительно оси каната, а действия силовых факторов относительно двух других осей не учитываются.

Используя приближенные дифференциальные уравнения, пригодные для исследования изогнутой оси балок большой жесткости, Л. И. Жуков определил момент внешних изгибающих сил, который равен моменту внутренних сил и моменту сил трения, преодолеваемых сдвигающими силами при перемещении участков проволок. Л. И. Жуков считает эти моменты сил трения постоянными, не зависящими от координат сечений, что не соответствует действительности, так как ввиду кривизны оси плечи соответствующих сил трения для различных сечений будут неодинаковыми. Исходное уравнение для определения изгибающего момента (рис. 2).

$$M = Sy. \quad (2)$$

где S – усилие, растягивающее канат; y – ордината кривой изгиба оси каната.

В уравнение усилия, сдвигающего проволоки в канате, подставлено значение [10]

$$y = y_1 = c_1 e^{\frac{x}{\lambda}}, \quad (3)$$

где c_1 – ордината кривой изгиба оси каната в месте начала освобождения проволок от сцепления силами трения. При $x=0$ $y = y_1 = c_1$, что противоречит исходной расчетной схеме, согласно которой при $y=0$, $x=0$.

Л. И. Жуков утверждает, что наибольшее смещение проволок наблюдается в области,

примыкающей к оси каната. Это утверждение противоречит приведенной им же формуле, согласно которой

$$\varepsilon = \frac{r \sin \varphi}{R}, \quad (4)$$

где ε – относительное удлинение; R – радиус кривизны оси изогнутого каната; r – расстояние от центра сечения каната до рассматриваемого элемента; φ – угол наклона линии, соединяющей центр сечения каната и элемент каната, к горизонтали.

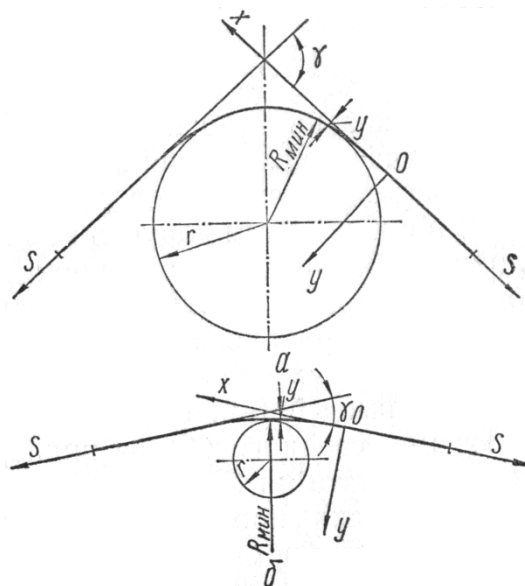


Рис. 2. Расчетные схемы Л. И. Жукова:
 а – радиус блока равен радиусу изгиба оси каната $r = R_{\min}$; б – $r = R_{\min}$.

Из формулы (4) видно, что наибольшее смещение проволок наблюдается в наиболее удаленной от оси каната области. И.Ф. Никитин [11...16] рассматривает изменение осевого усилия в элементе каната (проволоки), когда на блок зашел полувиток каната в нагруженной части. Область изменения усилий разделена на область переходного участка (от точки соприкосновения каната с блоком) и область изогнутого каната на блоке. Результаты подсчета дополнительных усилий при такой расчетной схеме оказались несколько меньше, чем по зависимостям, полученным автором.

При указанной постановке И. Ф. Никитин не обосновывает величину участка смещения элементов каната в сторону блока. Кроме того, расчетная схема построена для однослойных спиральных канатов и с некоторым допущением может быть применена для однослойных канатов двойной свивки, а экспериментальное определение дополнительных усилий И. Ф. Никитиным проводилось для двухслойного спирального каната конструкции 1 + 6 + 12. Величина дополнительных усилий определялась для прово-

лок наружного слоя, взаимодействие слоев не учитывалось.

Из приведенного обзора видно, что процесс формирования изогнутого каната на блоке не нашел обоснованного объяснения и не имеет приближенного теоретического решения. Механизм формирования изогнутого каната, кроме отдельных предположений, вытекающих из частных экспериментов, не был предметом детального теоретического и экспериментального исследования. При попытке изучить этот вопрос экспериментальным путем многие исследователи придавали переходному участку каната важное значение, как очагу концентрации местных напряжений.

Утверждения В. Вернле, А. И. Колчина, К. М. Масленникова, Л. И. Жукова, построенные на наблюдениях, в основном правильно подсказывают природу возникающих явлений в зоне свободного изгиба каната. Решение М. Ф. Глушко [17] относится к участкам прямого и изогнутого каната при достаточном удалении от его закрепленных концов и, естественно, не учитывает краевых эффектов в канате.

Задача состоит в том, чтобы, имея решения для участков прямого и изогнутого каната, получить решение для переходного участка. Если для прямого каната можно предположить силовое равноправие для геометрически подобных элементов в канате, допустив таким образом приемлемость гипотезы плоских сечений, для переходного участка это допущение не приемлемо. Одноименные элементы, расположенные в одном слое каната, в точке набегания на блок получают различные осевые смещения и, следовательно, их силовое равноправие нарушается.

При решении этой задачи необходимо изучить: характер и величину распространения смещений в прямолинейную ветвь каната, набегającego на блок; участок затухания смещений; картину силового взаимодействия элементов каната на участке набегания на блок и величину возникающих максимальных напряжений; влияние условий закрепления конца набегającej ветви каната на переходный участок; влияние скорости набегającego на блок каната на величину дополнительных усилий переходного участка; влияние переходного участка на мгновенную разрывную прочность каната на вращающихся блоках.

Принято допущение, что канат состоит из отдельных упругих ненапряженных проволок или прядей, оси которых представляют точные математические винтовые линии. Приемлемость этого допущения обоснована М. Ф. Глушко [17]. Канат подвергается многократному нагружению, при котором проявляются пластические

свойства материала проволок. Как известно, образец, нагруженный выше предела упругости, после разгрузки и последующих нагружений подчиняется закону Гука, если эти напряжения не превышают ранее достигнутого максимума [18]. Следовательно, рабочие напряжения, возникающие в канате, можно рассматривать независимо от технологических.

В расчетной схеме при статическом решении задачи точка соприкосновения каната с блоком принята за начало отсчета смещений которые распространяются только в прямолинейную ветвь каната. В действительности натяжение проволоки происходит еще в прямолинейной ветви каната и зависит от многих факторов, кроме того в точке набегания каната не все проволоки (пряди) контактируют со шкивом. Если это можно отнести и к проволокам (прядам), лежащим на вогнутой стороне изогнутого каната, то это не относится к проволокам (прядам), находящимся на выпуклой стороне. Следовательно, смещение проволок (прядей), возникающее на переходном участке, будет происходить не только в прямую ветвь каната, но и в изогнутую часть его. Поэтому величины смещения проволок в поперечном сечении каната, полученные теоретическим путем, будут несколько меньшими по сравнению с опытными.

При теоретическом рассмотрении процесса формирования изогнутого каната последний считался абсолютно гибким, то есть кривизна в точке набегания изменялась от нуля (прямой участок каната) до $1/R$, где R – радиус блока (изогнутый участок каната). В действительности ввиду влияния жесткости каната его кривизна на участке набегания на блок изменяется не мгновенно, а с некоторой конечной скоростью. Следуя А. Н. Диннику и М. Ф. Глушко, автор также пренебрегает деформациями каната. Это допущение не совсем подходит для канатов с органическим сердечником. Однако современные стандарты предусматривают применение тугокрученых органических сердечников, и это допущение в отношении стандартных сердечников оказывается приемлемым.

В расчетной схеме принято наличие зазоров между прядями и в то же время отсутствие свободных окружных перемещений элементов каната. Это обосновывается тем, что зазоры между прядями в канатах, свиваемых по действующим ГОСТам [19], незначительны и даже если бы окружное смещение прядей могло произойти, то нетрудно показать расчетом, что оно мало бы отразилось на величине осевого смещения элементов [20].

Кроме того, контактирование пряди с сердечником каната теоретически рассматривается

линейным. В действительности прядь и сердечник контактируют по некоторой поверхности. В результате взаимного деформирования прядь внедряется в сердечник на некоторую величину. Это визуально можно наблюдать в канатах с пеньковым сердечником. Для металлических сердечников картина меняется лишь масштабно. Поэтому, если говорить об угловых смещениях пряди относительно сердечника, то следует рассматривать сдвиг материала сердечника. Естественно, что в этом случае сопротивление осевым перемещениям пряди будет во много раз меньше, чем угловым. Если бы это было не так, то в канатах с пеньковым сердечником через непродолжительный срок работы сердечник пришел бы в полную негодность, а в канатах с металлическим сердечником наблюдался резкий износ проволок сердечника, что не имеет места в реальных канатах. Кроме того, изгибная жесткость пряди под натяжением также будет препятствовать угловым смещениям.

Таким образом, расчетную схему каната можно представить так: канат состоит из винтовых элементов, расположенных на круговом цилиндре (сердечнике) и несущих осевую растягивающую нагрузку; сердечник предполагается абсолютно жестким в поперечном направлении, в связи с чем размеры контура поперечного сечения каната в процессе его деформации остаются неизменными; канат свит с достаточными зазорами, обеспечивающими отсутствие давления между прядями, то есть предполагается, что пряди создают давление только на сердечник; пеньковый сердечник осевой нагрузки не воспринимает; канат в агрегате представляется абсолютно гибким и в точке набегания на блок его кривизна изменяется мгновенно от 0 до $1/R$, сопротивление перемещению элементов каната подчиняется закону сухого трения.

Выводы. Свойства элементов каната – проволок в спиральном канате и прядей в канате двойной свивки – можно рассматривать двояко.

Проволоки и пряди имеют определенные жесткостные характеристики, однако преобладающее значение имеет жесткость на растяжение. Поэтому, с одной стороны, можно решать задачу для каната как для стержневой системы с учетом изгибной и крутильной жесткостей элементов. Тогда при решении необходимо использовать общие уравнения статики для криволинейных стержней (уравнения Кирхгофа), что приведет к чрезвычайно сложной математической задаче. С другой стороны, ввиду преобладающего влияния продольной жесткости, можно проволоки и пряди в канате интерпретировать абсолютно гибкими и упруго-растяжимыми

элементами (нитями). Это существенно упрощает математическую сторону задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Klein E. Die innere Reibung von Drahtseilen. // Z-für Fortertechnik und Frachtverkehr, . 1950. №11/12. S. 16-40.
2. Блох В.И. К расчету несущих канатов подвесных проволочно-канатных дорог // Научные записки ХММИ, 1935. № 1. С 19-26.
3. Lehannet M. La flexion des câbles métalliques (Bending of steel ropes) // Annales des Ponts et Chaussées, 1949. № 18. pp. 321-386.
4. Прокофьев В.И. О действительной несущей способности монтажных тросов и их соединений // Строительная промышленность. 1956. № 7. С. 129-139.
5. Дукельский А.И. Результаты экспериментальных исследований выносливости несущих канатов / Труды конференции по метизному производству (15-21 мая 1959) // М.: Изд-во ЦБТИ, 1961. С. 29-36.
6. Дукельский А.И. Исследование выносливости несущих канатов // Стальные канаты. 1965. №2. С. 161-164.
7. Дукельский А.И. Выносливость канатов при работе на футерованных блоках // Стальные канаты. 1966. №3. С. 181-184
8. Колчин А.И. Стальные канаты. М.: Изд. Машгиз, 1950. 102 с.
9. Жуков Л.И. Усилия сдвигающие проволоки каната при изгибе // Известия вузов. Горный журнал. 1960. № 6. С. 51-58.
10. Жуков Л.И. Свободный изгиб натянутого каната // Известия вузов. Горный журнал. 1963. № 5. С. 91-100.
11. Никитин И.Ф. Распределение напряжений в канате при пробегании его по блоку. / Стальные канаты // Киев: Изд-во Техника, 1966. №3. С. 130-139.
12. Никитин И.Ф. Дополнительные усилия при переходе каната из прямого в изогнутый // Стальные канаты. 1967. №4. С. 81-84.
13. Никитин И.Ф. Исследование дополнительных усилий при переходе каната из прямого в изогнутый // Стальные канаты. 1964. №1. С. 116-123.
14. Никитин И.Ф. О схеме решения переходных процессов при формировании изогнутого каната в области набегания на шкив / Горная электромеханика и автоматика // Харьков, Изд-во ХГУ, 1968. №.10. С. 22-37.
15. Никитин И.Ф. Определение дополнительных усилий в проволоке с учетом пространственного изгиба каната / Подъемно-транспортное оборудование / Киев, Изд. Техника,

1971. №2. С. 157-164.

16. Никитин И.Ф., Щербак О.В. Исследование изгиба каната на блоках // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2007. № 38. С. 108-110

17. Глушко М.Ф. Основные элементы механики плоского изгиба каната // Стальные канаты. 1965. №2. С. 87-106.

18. Рабинович И.М. Основы строительной механики стержневых систем. М.: Изд. Гос-

стройиздат, 1960. 519 с.

19. ГОСТ 3241-91 Канаты стальные. Технические условия (Введен в действие с 01.01.93.) // М.: Изд. ИПК Издательство стандартов. 2008. 18 с.

20. Фидровская Н.Н., Варченко И.С. Определение усилий в канате, изогнутом на барабане // Технологический аудит и резервы производства. 2013. №2(10). С. 20–21.

Fidrovskaya N. N., Pisartsov A. S., Lomakin A. A.

FORMATION CURVED ROPE ON THE BLOCK AND DRUMS

In this paper, the behavior of the rope with his clash of blocks and drums. To do this, an analysis of twenty literature on the formation of a curved line on the blocks and drums. Analyzed the pioneering work of scholars such as E Klein, VI Prokofiev, AI Duklski, LI Zhukov, IF Nikitin, MF Glushko, IM Rabinovich, NN Fidrovskaya and others. Presents schemes the bending of the rope on the block, and conducted an analysis of existing design schemes.

Key words: *steel wire rope, block, drum, differential equations, bend, displacement wires, strands.*