

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630*377.21

**О РАБОТЕ СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ НЕСУЩИХ КАНАТОВ
ПОДВЕСНЫХ КАНАТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ
КАК КРИТЕРИИ ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ***Н. М. БЕЛАЯ, А. А. МИЩЕНКО*

Львовский лесотехнический институт

Несущий канат (НК) как подвесной путь канатных транспортных систем (ПКС) — главный, наиболее ответственный элемент всей их оснастки. Надежность и безопасность работы системы в первую очередь определяется степенью механической надежности несущих канатов, под которой подразумевается удовлетворение условиям прочности и долговечности при обеспечении минимальной металлоемкости конструкции и безопасности ее эксплуатации.

Методика расчета НК на прочность доведена до современного уровня, что обеспечивает (с использованием ЭВМ) широкий диапазон научного поиска оптимальных решений выбора конструкции и схем навески НК, применительно к конкретным условиям эксплуатации ПКС, а назначение минимальных запасов прочности соответствует условиям минимизации металлоемкости НК и конструкции ПКС в целом. Однако требованиям долговечности такие канаты пока не удовлетворяли, поэтому исследования в области повышения сроков службы НК необходимо продолжить и расширить. Решению такой задачи посвящена настоящая работа.

На начальной стадии исследования представлений о долговечности стальных канатов принципиальное различие между условиями работы несущих и тягово-подъемных канатов при изгибе еще не было установлено, поэтому в качестве критерия долговечности стальных канатов широкого назначения рассматривали максимальные суммарные напряжения от растяжения и изгиба — $\sigma = \sigma_p + \sigma_n$. В основу такого критерия был положен опыт работы канатов на блоках. Предполагалось, что поскольку в сравнении с углом обхвата изогнутого каната на блоке для несущих канатов ПКС угол обхвата колеса каретки мал, величина σ_n в НК пренебрежимо мала и доминирующими являются σ_p . Таким образом, в качестве первого критерия опасного состояния НК по прочности и долговечности были признаны максимальные растягивающие напряжения — σ_p . Этот критерий реализовывался расчетной моделью в виде упругой гибкой нити.

Опыт эксплуатации подвесных канатных дорог в СССР и за рубежом подтвердил правомерность принятой методики расчета НК на прочность и недостаточность ее при определении сроков их службы.

Первой попыткой совершенствования условий работы НК явилась тенденция к снижению действующих в них растягивающих напряжений. Запасы прочности НК были доведены до $n = 7 \dots 9$ для грузовых подвесных дорог и до $n = 10 \dots 12$ для пассажирских. Однако и в таких условиях сроки службы НК продолжали оставаться недостаточными; следовало искать другой путь повышения долговечности. Внимание ученых привлекли исследования И. Исааксена [17] и его предположение о возможной значимости влияния σ_n на работу несущих ка-

натов, так как порядок величин σ_n для рекомендуемых запасов прочности соответствовал порядку σ_p .

Первым существенным результатом в поиске решения проблемы повышения долговечности НК было снижение запасов их прочности до $n = 3,5 \dots 4,5$ для грузовых дорог стационарного типа и до $n = 3,0$ для систем временного типа, при которых сроки службы НК значительно повысились. Чтобы объяснить это явление, А. Рубин [18] и Р. Вернле [20] провели экспериментальные исследования долговечности НК при различных запасах прочности и эксплуатационно подтвердили повышение их долговечности с уменьшением n . Физическую сущность своих результатов исследователи еще не объяснили. Далее А. И. Дукельский [9], обработав опытные данные немецких ученых, с учетом рекомендаций И. Исааксена [17] получил зависимость выносливости НК J от напряжений изгиба:

$$J = 8,5 \cdot 10^7 / \sigma_n^2. \quad (1)$$

Это позволило расширить существующие представления об условиях работы НК под нагрузкой, выдвинуть новую гипотезу об использовании в качестве критерия долговечности максимальных напряжений изгиба σ_n^{max} (вместо σ_p) и реализовать ее с помощью расчетной модели НК в виде упругой жесткой нити.

В качестве основного пути увеличения сроков службы НК было рекомендовано снижение изгибных напряжений. Многофакторные экспериментальные исследования выносливости НК закрытого типа и опыты по определению напряжений σ_n в этих канатах, выполненные в Ленинградском политехническом институте под руководством А. И. Дукельского [10], подтвердили правомерность предложенного критерия долговечности.

Результаты этих исследований были признаны основополагающими в развитии канатного транспорта в целом к началу 60-х годов позволили предположить, что проблема обеспечения заданных сроков службы НК в принципе решена. Дальнейшее развитие подвесных канатных дорог планировалось в направлении совершенствования конструктивных решений оснастки и подвижного состава. Рекомендованные значения запасов прочности НК к тому времени были уменьшены для грузовых дорог стационарного типа до $n = 3,0$, для дорог временного характера до $n = 2,5$ и для пассажирских — до $n = 3,3$, причем значения этих коэффициентов сохранились до настоящего времени.

В дополнение к своим исследованиям А. И. Дукельский провел статистическую обработку многочисленных опытных данных о работе НК на подвесных дорогах стационарного типа и установил, что наибольшая работоспособность таких канатов наблюдается при отношении натяжения каната к поперечной нагрузке — $T/V > 40$. Научного обоснования эта рекомендация еще не имела.

В лесной промышленности подвесные канатные системы начали применять с начала 50-х гг. для транспортирования леса в горных районах Карпат. Временные подвесные канатные установки облегченной конструкции (ПКУ) существенно отличались от дорог стационарного типа, поэтому традиционные методы расчета и выбора НК оказались неприемлемыми при расчете несущих канатов ПКУ.

Для детального изучения условий работы ПКУ в процессе эксплуатации и создания нормативных документов по их проектированию, по заданию Минлеспрома УССР, Львовским лесотехническим институтом (ЛЛТИ) был проведен широкий комплекс экспериментальных исследований силовых режимов работы канатной оснастки ПКУ в реальных производственных условиях на действующих установках [1, 2]. Резуль-

таты исследований позволили установить величину и характер усилий, действующих в НК, и, главное, показали, что эти канаты работоспособны при запасах прочности $1,8 \leq n \leq 2,0$ — более низких, чем рекомендуемые.

Для проверки и научного обоснования допустимости работы несущих канатов на ПКУ при столь малых запасах прочности были проведены дополнительные экспериментальные исследования долговечности основных типов канатов, применяемых на лесозаготовках, при варьировании n в диапазоне $1,5 \leq n \leq 6,0$. Первые исследования проводили в полупроизводственных условиях на Брошневском испытательном полигоне Станиславского СХЗ, а затем в научной лаборатории ЛЛТИ. Одновременно были исследованы и напряжения изгиба σ_n , возникающие в НК, и оценено их влияние на долговечность несущих канатов ПКУ [6, 15].

Результаты опытов показали, что с уменьшением запасов прочности НК до определенной величины сроки их службы существенно повышаются. А. Г. Прохоренко установил, что для НК с линейным касанием проволок в прядях (ЛК) (ГОСТ 2688—55 и др.) напряжения изгиба были на 50 % больше, чем для канатов с точечным касанием (ТК) (ГОСТ 3070—55 и др.), а сроки службы канатов в первом случае были вдвое больше [15]. Таким образом, предложенный А. И. Дукельским критерий долговечности НК в виде σ_n^{max} потребовал проверки и уточнения. Наблюдения за работой несущих канатов в производственных и лабораторных условиях показали, что при малых натяжениях и больших запасах их прочности, за колесом грузовой каретки появляется обратный перегиб каната, вызывающий в НК знакопеременные напряжения изгиба, существенно понижающие их долговечность. Дальнейшие исследования этого явления позволили установить, что долговечность НК зависит не от абсолютного значения σ_n^{max} , а от отношения изгибных напряжений отрицательного знака к максимальным положительным напряжениям — σ_n^-/σ_n^+ и возрастает по мере его снижения. Это позволило представить отношение σ_n^-/σ_n^+ в качестве более достоверного критерия долговечности НК, так как его физическая сущность уже могла быть обоснована влиянием на процесс изгиба НК внутренних сил трения, возникающих в канате в результате взаимных смещений проволок и прядей. Таким образом, главная причина уменьшения сроков службы несущих канатов в виде проявления внутренних сил трения была установлена и зафиксирована. Потребовалось дальнейшее более глубокое ее изучение [6, 15]. Далее было установлено, что при $T/V > 40$ отрицательные напряжения изгиба на участке, расположенном за колесом грузовой каретки, практически исчезают. Такого состояния можно достичь двумя путями: либо увеличением T (с соответствующим уменьшением n до $1,8 \leq n \leq 2,0$), либо уменьшением V до 5 000... 2 750 Н. Влияние снижения V оказалось существенней и интенсивней [6], что послужило в дальнейшем основой для перехода от мало- к многоколесным грузовым кареткам. Графики зависимости $J = f(T/V)$ и $\sigma_n^-/\sigma_n^+ = f(T/V)$ для каната ГОСТ 2688—69(80) показаны на рис. 1, а и б. Установленную закономерность можно рассматривать как убедительное научное обоснование эффективности повышения отношения T/V . С увеличением натяжения НК интенсивность проявления сил внутреннего трения существенно возрастает и по условиям работы, в пределе, НК приближается к монолитному стержню. Это положение было проверено и подтверждено А. Г. Прохоренко [15]. Чтобы объяснить его теоретически, авторами, на основании полученных зависимостей долговечности НК J и отношения σ_n^-/σ_n^+ от величины T/V , в диапазоне изменения рекомендуемых параметров работы этих канатов ($1,8 \leq n \leq 2,0$ и $V \leq 5$

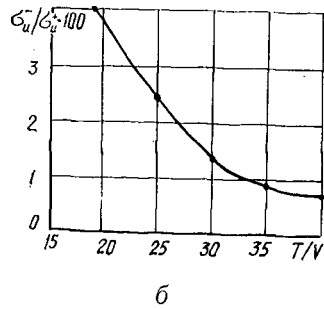
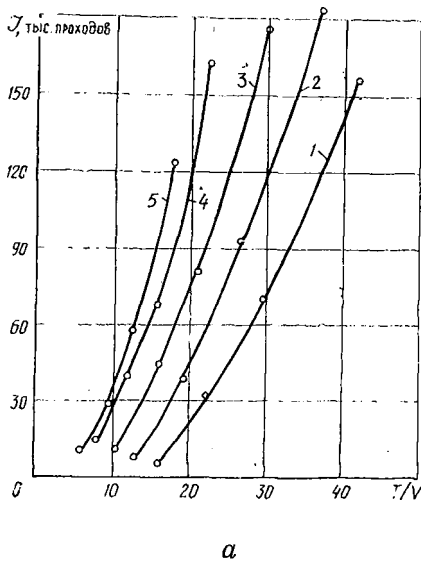
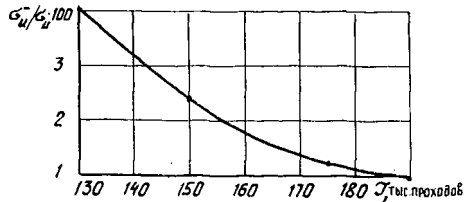


Рис. 1. Графики зависимости: а — долговечности J несущего каната от отношения T/V при различных n ; 1 — $n = 1,5$; 2 — $1,7$; 3 — $2,1$; 4 — $2,8$; 5 — $n = 3,5$; б — отношения σ_n^-/σ_n^+ от T/V

кН [5]) был построен график функции $\sigma_n^-/\sigma_n^+ = f(J)$ (рис. 2) для одной из наиболее распространенных конструкций НК — ЛК-Р ГОСТ 2688—55. Полученный график по форме соответствует усталостной кривой Веллера, что позволяет считать отношение σ_n^-/σ_n^+ усталостным критерием долговечности НК.

Рис. 2. График зависимости отношения σ_n^-/σ_n^+ от долговечности несущего каната J



Появление знакопеременных напряжений изгиба на участке каната, расположенного за колесом грузовой каретки, и их влияние на срок службы НК не могло быть теоретически объяснено в рамках принятой ранее реологической модели НК в виде упругой жесткой нити. Она не позволяла, на уровне известных представлений, проследить динамику изменения характера σ_n в реальном канате по мере перемещения по нему колес грузовой каретки и поэтому потребовала более глубокого анализа и уточнения.

Известно, что для упругой жесткой нити и монолитного стержня изменение напряжений изгиба подчиняется экспоненциальному закону [10]

$$\sigma_{n/x} = \sigma_{n/0} l^{-\frac{x}{\lambda}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{n/0}$ — максимальные напряжения изгиба в сечении НК, расположенном непосредственно под колесом каретки;

$\sigma_{n/x}$ — напряжения изгиба в сечении НК, расположенном на расстоянии x от точки приложения колеса;

λ — коэффициент жесткости, равный $\lambda = \sqrt{B_n/T}$, где B_n — изгибная жесткость каната.

На основании экспериментальных исследований изменения величин и характера σ_n под колесами грузовой каретки нами рассмотрена ги-

позеза о существенности влияния внутренних сил трения на состояние и срок службы НК в процессе эксплуатации. В качестве расчетной предложена модель несущего каната, наиболее точно отражающая реальные условия его работы под нагрузкой с учетом влияния сил трения — в виде реологической модели неупругой жесткой нити.

Закономерность такой постановки задачи убедительно подтверждается результатами наблюдающий различных исследователей за проявлением сил трения, возникающих между проволоками и прядями, и их влиянием на работу канатов. Однако оценка интенсивности влияния сил трения и отражение его в инженерных расчетах долгое время задерживались, вследствие сложности постановки опытов и определенной ограниченности использовавшегося математического аппарата для описания исследуемых процессов.

Из анализа комплекса известных наблюдений наиболее убедительными доказательствами влияния сил трения на работу канатов можно считать:

сохранение более 60 % несущей способности растянутого каната при обрыве до 90 % его проволок [8];

повышение жесткости НК с увеличением его натяжения [7, 11];

изменение величин и характера напряжений изгиба в НК под колесами грузовой каретки в зависимости от натяжения каната и поперечной нагрузки [6, 15];

зависимость показателей долговечности канатов от интенсивности их испытаний [3];

результаты опытов университета в Карлсруэ (ФРГ) и Одесского политехнического института по определению значений коэффициентов внутреннего трения в стальных канатах [14, 19];

подтверждение влияния сил трения на усталостную прочность проволок и прядей стальных канатов опытами, проведенными в последние годы в Бристольском университете (Англия) [16].

Для подтверждения правомерности предлагаемой реологической модели и возможности ее реализации в процессе расчетов НК на долговечность был исследован процесс изгиба НК под колесом грузовой каретки при решении двух практических задач: математической интерпретации наличия знакопеременных напряжений изгиба на участке каната, расположенном за колесом грузовой каретки, и определения сопротивления передвижению каретки по НК.

Решение первой задачи было получено как результат исследования колебаний НК под действием движущихся колес грузовой каретки с учетом влияния внутренних сил трения каната. Расчетная схема системы представлена на рис. 3, а. Дифференциальное уравнение колеба-

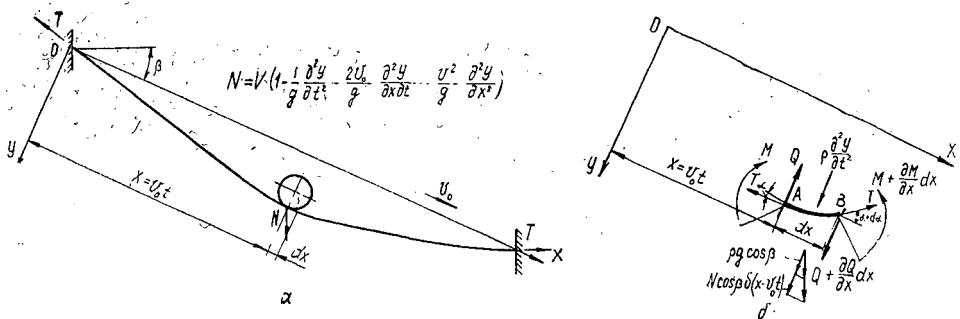


Рис. 3. Расчетная схема процесса колебаний несущего каната под колесом грузовой каретки: а — общая схема системы; б — условие равновесия отсеченного элемента несущего каната длиной dx

ний НК длиной l получено из условий равновесия элемента НК, расположенного под колесом и отсеченного на расстоянии $x = v_0 t$, под действием всех внешних и внутренних сил (рис. 3, б) и имеет вид:

$$\left(1 + i \frac{\delta}{\pi}\right) B_k \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = - \left[\rho g + V \delta (x - v_0 t) \left(1 - \frac{1}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{2v_0}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} - \frac{v_0^2}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}\right) \right] \cos \beta, \quad (3)$$

где δ — декремент затухания колебаний НК с погонной массой ρ , растянутого с обоих концов силами T ;
 v_0 — скорость движения груза Q по наклонной под углом β к горизонту плоскости;

$$i = \sqrt{-1};$$

$\delta(x - v_0 t)$ — дельта-функция Дирака.

Деформации НК из этого уравнения определяются с помощью метода Крылова разложением в бесконечный ряд Фурье по фундаментальным функциям

$$y = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j X_j. \quad (4)$$

Здесь φ_j — функция времени j -го тона колебаний;

X_j — фундаментальная функция, которая для исследуемого случая жесткого закрепления концов НК имеет вид:

$$X_j = (\operatorname{sh} k_j l - \sin k_j l)(\operatorname{ch} k_j x - \cos k_j x) - (\operatorname{ch} k_j l - \cos k_j l)(\operatorname{sh} k_j x - \sin k_j x), \quad (5)$$

где $k_j l$ — совокупность корней частотного уравнения свободных колебаний НК.

Функция $\varphi_j(t)$ определяется из выражения (3) с помощью принципа виртуальных работ и для произвольного тона колебаний принимает следующий вид:

$$\varphi = C e^{-(v+r)t} \cos(ut + \gamma) + A \psi_3^2 / (\psi_3^4 + \psi_2^4); \quad (6)$$

$$2r = 2Vv_0 \cos \beta \int_0^l X' X dx / DEL,$$

$$\text{где } \psi_1^2 = B_k g \int_0^l X^{IV} X dx + (Vv_0^2 \cos \beta + Tg) \int_0^l X'' X dx / DEL;$$

$$\psi_2^2 = \frac{\delta}{\pi} B_k g \int_0^l X^{IV} X dx / DEL; \quad \psi_3^2 = \psi_1^2 - r^2;$$

$$A = -(\rho g + V) \cos \beta g \int_0^l X dx / DEL; \quad DEL = (\rho g - V \cos \beta) \int_0^l X^2 dx;$$

$$u = \psi_3^2 / \sqrt{2(-\psi_3^2 + V\psi_3^4 + \psi_2^4)}; \quad v = \sqrt{(-\psi_3^2 + V\psi_3^4 + \psi_2^4) / 2};$$

$$C = \sqrt{(C \cos \gamma)^2 + (C \sin \gamma)^2}; \quad \gamma = \operatorname{arctg}(C \sin \gamma / C \cos \gamma);$$

$$C \cos \gamma = \operatorname{tg} \beta \int_0^l X dx / \int_0^l X^2 dx - A \psi_3^2 / (\psi_3^4 + \psi_2^4);$$

$$C \sin \gamma = -\frac{1}{u} \left(v_0 \int_0^l X dx / \int_0^l X^2 dx + v C \cos \gamma \right).$$

Интегралы фундаментальных функций определены с использованием свойств их ортогональности и нормируемости.

Напряжения изгиба в НК находят из известных зависимостей теории изгиба балок с заменой упругих характеристик последних соответствующими параметрами стальных канатов и могут быть представлены в окончательной форме зависимостью

$$\sigma_{и} = E_{к} d / 2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad (7)$$

где $E_{к}$ — модуль упругости НК диаметром d .

Для проверки соответствия аналитических зависимостей экспериментальным данным определим напряжения изгиба при значениях геометрических и силовых параметров НК, соответствующих условиям проведения экспериментов — для каната диаметром 25 мм ГОСТ

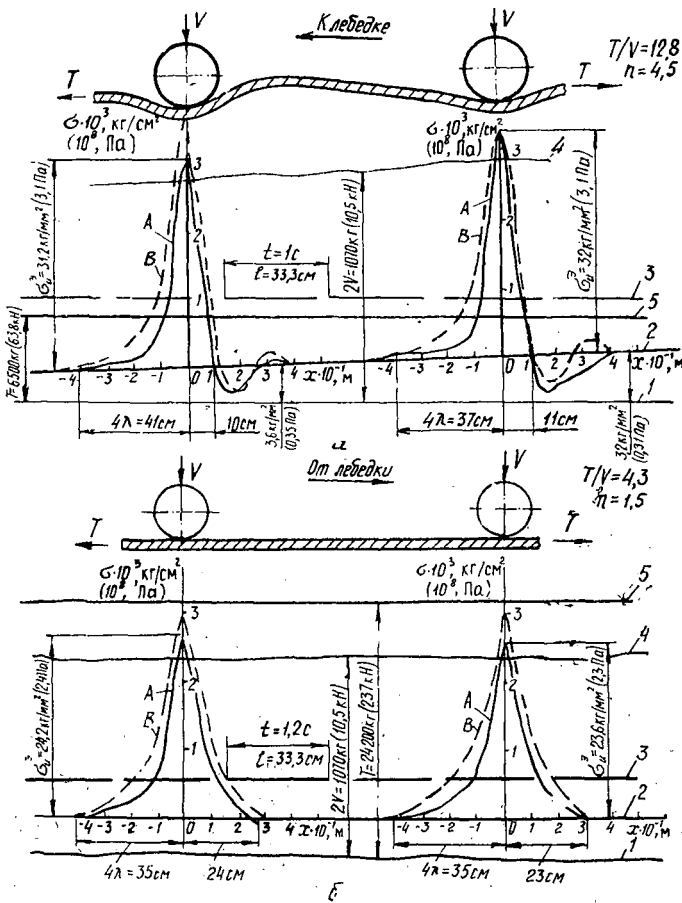


Рис. 4. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований напряжений изгиба в несущих канатах для каната ГОСТ 2688—55 $d = 25$ мм: А — осциллограмма изменения величин и характера $\sigma_{и}$ при движении колес грузовой каретки по несущему канату; В — теоретический график изменения величин и характера $\sigma_{и}$; 1 — нулевая линия для T и V ; 2 — нулевая линия для $\sigma_{и}$; 3 — линия отметчика пути; 4 — уровень поперечной нагрузки V ; 5 — уровень напряжения в несущем канате T

2688—55 при отношениях $T/V = 12,8$ и $T/V = 43$ [6, 15], выполненного с помощью моделирования процесса на ЭВМ ЕС-1022. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований приведено в виде графиков на рис. 4, которые подтвердили достаточную точность совпадения как величин, так и характера изменения полученных теоретических значений σ_n с опытными данными.

Таким образом, задача математического описания процесса взаимодействия контактирующей пары канат — колесо решена в достаточно удобной форме записи, что позволило проверить показатели экспериментальных исследований и подтвердить правомерность предложенной гипотезы.

Аналитические выражения (3)—(7) для определения напряжений σ_n в НК с использованием графиков зависимости выносливости канатов и отношения σ_n^-/σ_n^+ (рис. 2) могут быть положены в основу метода усталостного расчета НК на долговечность. Однако громоздкость расчетных выражений, в которые входят величины, требующие дополнительного экспериментального уточнения, ограничивает широкое использование такого метода на практике при проектировании ПКУ. Для решения конкретных практических задач удобнее перейти к более простым и привычным представлениям о физической сущности особенностей длительной работы НК под нагрузкой, более приемлемым для современного аппарата проектирования ПКУ в НИИ и ПКТИ. Чтобы перейти к такой форме записи задачи, надо использовать результаты исследований сопротивления передвижению грузовой каретки по несущему канату с учетом влияния сил трения (вторая задача).

Порядок решения второй задачи и полученные результаты опубликованы [13]. Полное сопротивление передвижению грузовой каретки по НК определяется (без учета сопротивления от уклона пути) суммой сопротивления от трения в ходовых частях W_0 и дополнительного сопротивления от жесткости каната $W_{ж}$, обусловленного действием сил трения при взаимных смещениях проволок и прядей, составляющих канат.

Зависимости для определения первого слагаемого приведены в технической литературе. Величина $W_{ж}$ определяется через работу сил внутреннего трения, возникающих в НК при передвижении каретки на единицу длины каната, и выражается зависимостью:

$$W_{ж} = A_{тр} |_{\Delta x_0 = 1} = 2\mu \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \frac{V}{1 + B_{к}\omega^2/T}, \quad (8)$$

где μ — коэффициент внутреннего трения между m элементами НК, свитыми под углом α ;
 V — поперечная нагрузка на НК с изгибной жесткостью $B_{к}$, растянутого с обоих концов продольными силами T ;

$$\omega = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{r}, \quad r — \text{радиус свивки конструктивных элементов НК.}$$

Для наиболее распространенных в качестве НК ПКУ 6-прядных канатов открытого типа, для которых коэффициент внутреннего трения изменяется в пределах $0,25 \leq n \leq 0,32$ [14, 19], зависимость (8) может быть представлена в форме:

$$W_{ж}^{6\text{ пр}} = A_{тр}^{6\text{ пр}} |_{\Delta x_0 = 1} \approx 10 \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \frac{V}{1 + B_{к}\omega^2/T}. \quad (9)$$

Правомерность теоретических значений W , с достаточной для технических расчетов точностью, подтверждается их сравнением с результатами экспериментальных исследований на реальных [1] и экспери-

ментальных [12] канатных установках (расхождение не превышает 9 %).

Для убедительности представления критерия долговечности несущих канатов через работу сил внутреннего трения необходимо обратиться к известным литературным источникам, которые свидетельствуют о бытующей устойчивой тенденции в оценке сроков службы НК как монолитного стержня.

На основании анализа напряженного состояния такого стержня можно определить зависимость числа циклов его нагружения до разрушения J_p от амплитуды изменения действующего в нем напряжения σ_a , в виде усталостной кривой Веллера:

$$J_p = (\sigma_0 / \sigma_a)^{t_y}, \quad (10)$$

где σ_0 — экстраполированное значение напряжения, при котором цельный канат или стержень будет претерпевать, не разрушаясь, базовое число циклов N (для сталей $N = 10^7$ циклов);

t_y — показатель степени кривой усталости.

В действительности условия работы НК существенно отличаются от условий работы стального стержня из-за действующих в них конструктивных фрикционных процессов, которые и определяют состояние и сроки службы НК. Это обстоятельство, с учетом ранее приведенных доказательств, позволяет обосновать возможность использования в качестве критерия долговечности НК силы внутреннего трения каната в виде интегральной их характеристики — работы таких сил, которую можно измерить с помощью относительно несложных технических средств. Тогда по аналогии с зависимостью (10) для описания усталостных процессов в материале, выражение для определения долговечности (выносливости) J_p^k несущего каната имеет вид:

$$J_p^k = (A_{тр}^c / A_{тр}^k)^{k_y}, \quad (11)$$

где $A_{тр}^k$ — работа внутренних сил трения реального каната;

$A_{тр}^c$ — работа внутренних сил трения для монолитного стержня, идентичного канату поперечного сечения и работающего в подобных с канатом условиях;

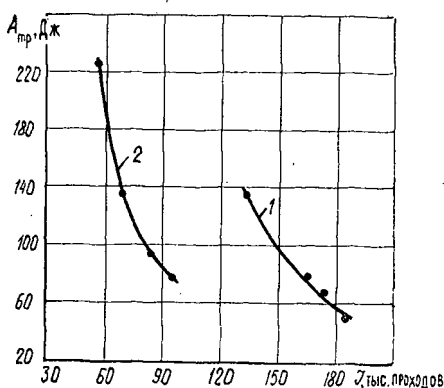
k_y — показатель степени кривой усталости.

Однако в связи с отсутствием экспериментальных данных о показателях выносливости стальных стержней при их работе под колесами грузовых кареток, зависимость (11) для инженерных расчетов не применяли.

Для подтверждения правомерности непосредственного использования работы сил внутреннего трения в качестве критерия долговечности НК были определены значения $A_{тр}$ при параметрах системы, соответствующих условиям проведения экспериментов с канатом $d = 5,6$ мм ГОСТ 2688—69 [12]. Результаты вычислений на основании приведенной в указанной работе зависимости $J = f(n)$ представлены в виде графика $A_{тр} = f(J)$ (рис. 5). Форма графика идентична кривой Веллера, что, в итоге, позволяет величину $A_{тр}$ как и отношение σ_n^- / σ_n^+ , рассматривать в качестве усталостного критерия долговечности несущего каната и использовать этот критерий в практике расчетов НК по сроку службы.

Практическое использование рекомендуемого критерия долговечности НК в виде $A_{тр}$ возможно для решения двух типов задач: сравнительной оценки долговечности несущих канатов для различных условий

Рис. 5. График зависимости работы внутренних сил трения $A_{тр}$ от долговечности J несущего каната: 1 — $V = 5,2$ кН; 2 — $V = 7,4$ кН



их эксплуатации; определения срока службы исследуемого несущего каната для конкретных условий его навески и нагружения.

Эволюция представлений об этапах совершенствования теории расчета НК, их расчетных моделей и критериев опасного состояния при расчетах на прочность и долговечность приведена в таблице.

Этапы развития представлений о работе несущих канатов	Расчетные модели		Критерии оценки опасного состояния несущих канатов		Авторы критериев долговечности
	при проверке прочности	при проверке долговечности	при проверке прочности	при проверке долговечности	
XIX в.—30-е гг. XX в.	Упругая гибкая нить	Упругая гибкая нить	σ_p	σ_p	Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации подвесных дорог стационарного типа
30—70 гг. XX в.	То же	Упругая жесткая нить	σ_p	σ_n	А. И. Дукельский [9, 10]
70—85 гг.	» »	То же	σ_p	σ_n^- / σ_n^+	А. Г. Прохоренко, Н. М. Белая [6, 15]
85—88 гг.	» »	Неупругая жесткая нить	σ_p	$A_{тр}$	Н. М. Белая, А. А. Мищенко [6, 13, данная статья]

Подводя итог изложенному, можно заключить, что результаты проведенных исследований позволили предложить и научно обосновать отличный от традиционных подход к решению проблемы долговечности НК и рекомендовать его для решения практических инженерных задач при создании современных прогрессивных подвесных канатных систем новых поколений с минимальной металло- и энергоемкостью и оптимальными; равновеликими сроками службы всего комплекса механических узлов, составляющих подвесную систему.

В такой постановке задача определения долговечности несущих канатов ранее не рассматривалась.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Белая Н. М. Исследование работы подвесных канатных лесотранспортных установок и перспективы их развития и совершенствования // Проблемы комплексных лесных предприятий в Карпатах.— Ужгород: Карпаты, 1969.— С. 158—184. [2]. Бе-

лая Н. М., Прохоренко А. Г. Канатные лесотранспортные установки.— М.: Лесн. пром-сть, 1964.— 299 с. [3]. Белая Н. М., Прохоренко А. Г. О влиянии режимов работы пробегных машин на показатели долговечности канатов // Стальные канаты.— Киев, 1972.— Вып. 9.— С. 102—105. [4]. Белая Н. М., Прохоренко А. Г. К обоснованию величины запаса прочности несущих канатов подвесных лесотранспортных установок и канатных дорог // Лесн. журн.— 1974.— № 3.— С. 41—46.— (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Белая Н. М., Прохоренко А. Г. Технические условия использования канатов подвесных лесотранспортных установок и повышение сроков их службы.— Львов: ЛЛТИ, 1975.— 20 с. [6]. Белая Н. М., Прохоренко А. Г. Канатный транспорт леса и резервы повышения его эффективности // Лесн. журн.— 1982.— № 4.— С. 34—43.— (Изв. высш. учеб. заведений). [7]. Волошин В. И., Жиряков А. И. Изгибная жесткость стальных канатов // Подъемно-транспортное оборудование.— Киев, 1983.— Вып. 14.— С. 59—64. [8]. Динник А. Н. О зависимости прочности каната от числа оборванных проволок // Безопасность труда в горной промышленности.— 1935.— № 11.— С. 11—15. [9]. Дукельский А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны.— 2-е изд.— М.; Л.: Машгиз, 1938.— 400 с. [10]. Дукельский А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны.— 4-е изд., перераб. и доп.— М.; Л.: Машиностроение, 1966.— 484 с. [11]. Ковальский Б. С. Потери на блоках канатных полиспастов // Вестн. машиностроения.— 1965.— № 10.— С. 34—37. [12]. Мартынцив М. П. Исследование нагрузок на ходовые колеса грузовых кареток и их влияние на работу несущего каната: Дис... канд. техн. наук.— Львов, 1980.— 312 с. [13]. Мищенко А. А. Об определении сопротивления передвижению колеса грузовой каретки по несущему канату подвесных лесотранспортных установок // Лесн. журн.— 1987.— № 4.— С. 35—41.— (Изв. высш. учеб. заведений). [14]. Похольченко А. С. Экспериментальное определение усилий вытяжки проволок и коэффициента трения в канатах двойной свивки // Стальные канаты.— Киев, 1969.— Вып. 6.— С. 123—126. [15]. Прохоренко А. Г. Напряжения изгиба в несущих канатах открытого типа // Стальные канаты.— Киев, 1967.— Вып. 4.— С. 172—176. [16]. Blakeborough A., Cullimore M. S. G. Fretting in the Fatigue of Wire Rope // Adv. Fract. Res. Proc. 6th Int. Conf. Fract. (ICF 6).— New Delhi, 4—10 Dec., 1984.— Vol. 3; Oxford, 1984.— P. 2133—2141. [17]. Isaaksen I. Die Beanspruchung von Drahtseilen // Z.-VDI.— 1907.— Bd. 51, N 17.— S. 652—657. [18]. Rubin A. Personen-Seilschwebbahnen, Bauart Bleichert-Zuegg // Z.-VDI.— 1926.— Bd. 70, N 5.— S. 1755—1771. [19]. Schmidt K. Die Sekundäre Zugbeanspruchung der Drahtseile aus der Biegung // Fortschr.-Ber. VDI.-Z.— 1965, N 2.— S. 2—180. [20]. Woernle R. Drahtseilforschung // Z.-VDI.— Bd. 78, N 52.— S. 1492—1498.

Поступила 5 сентября 1988 г.

УДК 625.143.482

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ СИЛЫ ДЛЯ ПРЯМЫХ УЧАСТКОВ ЛЕСОВОЗНЫХ УЖД

С. И. МОРОЗОВ, М. В. ПОПОВ

Архангельский лесотехнический институт

Сварной (температурно-напряженный) железнодорожный путь, уложенный длинными рельсовыми плетями (300 м и более), позволяет стабилизировать техническое состояние верхнего строения пути лесовозных УЖД, уменьшить затраты на его ремонт и содержание. Фактический годовой экономический эффект от замены звеньевоего пути сварными рельсовыми плетями составляет 0,8 тыс. р. на 1 км для прямых участков пути и до 1,5 тыс. р. на 1 км — для кривых.

В настоящее время на лесовозных УЖД рельсы в плети сваривают вручную электродуговым способом. В 1988 г. будет изготовлен опытный образец комплекса для контактной сварки рельсов, который позволит повысить прочность сварного стыка до прочности целого рельса, а производительность работ в 8—10 раз. При поступлении этих комплексов на лесовозные УЖД, которое намечено на 1989 г. и последующие годы, темпы внедрения сварного пути существенно возрастут.

Для эффективного использования сварочных комплексов необходимо заблаговременно осуществить определенные организационно-техни-