

А.Н.Воронцов, канд.техн.наук, **В.Ю. Волоховский**, канд.техн.наук
(Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет) Кафедра динамики и прочности машин им.В.В.Болотина,
e-mail: Vorontsov@intron.ru)

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН ПО ДАННЫМ ДИАГНОСТИКИ

Предлагается методика анализа несущей способности и индивидуального остаточного ресурса стальных канатов на основе данных магнитной дефектоскопии. Методика базируется на механической модели каната с частичной потерей сечения по металлу и обрывами проволок. Остаточный ресурс прогнозируется по истории изменения текущего коэффициента запаса прочности эксплуатируемого каната. Приведен пример расчета изменения несущей способности и ресурса шахтного каната по данным пяти инспекций.

Ключевые слова: стальной канат; магнитная дефектоскопия; потеря сечения; обрыв проволоки; механическая модель, оценка прочности, планирование инспекций, остаточный ресурс.

A.N.Vorontsov, Cand.Tech.Sci., **V.Yu.Volokhovsky**, Cand.Tech.Sci.
(Moscow Power Engineering Institute (National Research University) V.V.Bolotin
Department of the Dynamics and Strength of Machines)

MECHANICAL MODEL FOR STRENGTH AND LIFE-TIME ASSESSMENT OF NDT TESTED HOISTING ROPES

Principles of successive strength assessment and life-time forecasting of steel wire ropes based on magnetic NDT technique are presented. The mechanical model of deteriorated stranded ropes is proposed. Stress safety factor is considered as a suitable indicator of working history state of degraded rope. Example of strength estimation and life-time prediction of hoisting mine rope under fatigue tension-tension loading is demonstrated.

Keywords: Hoisting steel rope; Magnetic diagnostic; Deterioration; Mechanical model; Strength assessment; Safety factor; Life-time prediction.

Введение

Стальные канаты являются ответственными компонентами подъемных механизмов. Они требуют периодической замены, если несущая способность снижается до недопустимого уровня или если исчерпан назначенный ресурс. Ресурс стального каната зависит от типа подъемной машины, конструкции самого каната, материала проволок и рабочего режима. Для эксплуатируемых объектов в теории надежности вводится понятие индивидуального остаточного ресурса, а именно – срока службы от данного момента времени до достижения предельного состояния [1]. Источниками информации для прогноза индивидуального ресурса служат данные текущего (оперативного) поиска дефектов, которые накапливаются в результате наблюдений и измерений в процессе

эксплуатации. Для стальных канатов подобная диагностическая информация может быть получена средствами неразрушающего контроля, в частности методом магнитной дефектоскопии [2]. Задача состоит в том, чтобы на основании данных дефектоскопии оценить текущий запас прочности каната, экстраполировать его поведение в будущем и установить подходящий срок проведения следующей инспекции или момент прекращения работы.

Метод магнитной дефектоскопии основан на регистрации изменения магнитного потока вдоль оси каната при наличии структурных дефектов. Диагностическими параметрами каната являются дефекты двух типов: 1) потеря металлического сечения проволок, вызванная истиранием, коррозией или другими причинами и 2) локальные обрывы проволок. Оба дефекта уменьшают несущее сечение прядей, что ведет к снижению остаточной прочности каната.

Существующие нормы браковки канатов по допустимой величине потери сечения и/или допустимому числу обрывов не учитывают совместного влияния этих дефектов на состояние каната. К тому же скорости накопления потери сечения и обрывов в конкретных рабочих условиях могут меняться в ту или другую сторону. Вследствие неопределенности ситуации методология прогнозирования ресурса каната по двум диагностическим параметрам в настоящее время отсутствует.

Альтернативным подходом выглядит попытка оценивать ресурс не по данным диагностики, а по параметрам состояния объекта. В качестве параметров состояния стального каната естественно выбрать коэффициенты текущего запаса прочности по напряжениям и (или) нагрузке, которые определяются с помощью подходящей механической модели каната. Входными данными модели служат количественные оценки потери сечения и локальных дефектов. Эти оценки зависят от чувствительности измерительных каналов дефектоскопа и алгоритма обработки соответствующих дефектограмм.

Методы прогнозирования надежности и ресурса основаны, как правило, на вероятностных моделях. Однако, из-за отсутствия статистической информации о предельных состояниях конкретных канатов в заданных ситуациях, а также априорных вероятностных оценок механических параметров и нагрузок, в данной работе ограничимся детерминистическим анализом сроков планируемых инспекций и индивидуального ресурса.

Элементы механики стальных канатов

Механическая модель, используемая для оценки прочности канатов с дефектами, опирается на теории стальных канатов Глушко-Малиновского [3]. Канат рассматривается как система с двумя обобщенными степенями свободы – линейной деформацией осевого растяжения и угловой деформацией, вызванной кручением. Условия равновесия структурных элементов каната (прядей и проволок) и каната в целом подчиняются уравнениям теории тонких стержней. Уравнения механического состояния прямого каната связывают натяжение (осевое усилие) T и крутящий момент M с обобщенными деформациями – относительным удлинением ε и относительным углом закручивания θ :

$$\left. \begin{aligned} T &= C_{11}\varepsilon + C_{12}\theta \\ M &= C_{12}\varepsilon + C_{22}\theta \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где C_{11} , C_{12} и C_{22} - эффективные коэффициенты жесткости каната как гетерогенной структуры. Они зависят от параметров жесткости проволок и геометрических параметров винтовой структуры прядей и каната в целом. Развернутые выражения этих коэффициентов довольно громоздки и здесь не приводятся.

Деформации каната ε и θ определяются из соотношений (1) для заданных нагрузок T и M . Эти деформации последовательно преобразуются к системам координат, связанным с винтовыми осями прядей и проволок. Деформации растяжения, изгиба и кручения проволок и соответствующие напряжения – нормальные σ и касательные τ – вычисляются в подвижных системах координат винтовых осей. Сложное напряженное состояние в проволоке сводится к линейному эквивалентному состоянию, например $\sigma_{\text{экв}} = (\sigma^2 + 4\tau^2)^{1/2}$. Коэффициент запаса по отношению к пределу прочности материала проволок σ_s определяется для наиболее нагруженной проволоки:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_s}{\max \sigma_{\text{экв}}}. \quad (2)$$

Для канатов, работающих на блоках и барабанах, результирующие нормальные напряжения в проволоках σ являются суперпозицией напряжений однородного осевого растяжения σ_p , изгибных напряжений σ_u , вызываемых кривизной проволоки на поверхности блока, и вторичных растягивающих напряжений σ_δ от стесненного кручения проволок разных слоев при заходе каната на блок [3]. Изгибные напряжения σ_u определяются по формуле

$$\sigma_u = \frac{\delta}{D} E \cos^2 \alpha \cos^2 \beta,$$

где δ - диаметр проволоки, D - диаметр кривизны оси каната на блоке, E - модуль упругости материала проволок и α, β - средние углы свивки проволок и прядей соответственно. Вторичные напряжения σ_{∂} оцениваются в первом приближении соотношением

$$\sigma_{\partial} = \sigma_p \left(e^{\mu (\varphi_0 - \varphi) \sin \alpha} - 1 \right) .$$

Здесь μ - коэффициент трения между проволоками, α - средний угол свивки проволок, φ - угловая координата сечения проволоки на блоке, $\varphi_0 \geq \pi/2$ - соответствующая координата затухания вторичных напряжений в прямой ветви каната.

Помимо расчетов по напряжениям, в механике прямых канатов принят и расчет запаса прочности по предельным усилиям

$$n_T = \frac{T_{II}}{T} ,$$

где T_{II} - сертифицированное разрывное усилие каната, T - наибольшее паспортное рабочее натяжение. Канат подбирается из условия $n_T \geq Z$, где Z - нормативный «коэффициент использования», зависящий от группы классификации подъемного механизма [4].

Канаты грузоподъемных машин работают, как правило, при циклических нагрузках, когда проволоки испытывают переменные напряжения. В этих условиях, помимо проверки на статическую прочность, требуется и проверка по коэффициенту запаса на выносливость [5].

Напряжения в проволоках распределены по сечению каната неравномерно, причем тем заметнее, чем сложнее конструкция каната. Поэтому наиболее нагруженный элемент структуры (проволока, прядь и т.п.) обрывается при меньшей нагрузке, чем предельное значение T_{II} , которое соответствует разрушению конструкции каната в целом. Коэффициент запаса по напряжениям n_{σ} , будучи меньше коэффициента запаса по предельному состоянию n_T , косвенно учитывает снижение несущей способности вследствие изменчивости свойств материала, разброса реальных нагрузок (в том числе, динамических) относительно номинального значения T , условий закрепления каната, ограничений расчетной модели, погрешностей измерения и обработки данных диагностики и др. Поэтому, расчет по напряжениям, в конечном итоге, более объективно отражает состояние каната и дает оценки, идущие в запас по надежности.

Оценка несущей способности каната с дефектами по результатам диагностики

Изложенная методика применяется для расчета запаса прочности каната с дефектами. Входные параметры механической модели – измеренные дефектоскопом потеря сечения ΔA и количество локальных обрывов проволок B – меняются вдоль контролируемого участка каната в процессе наработки. Эти изменения отражаются дефектограммами, записанными при периодических инспекциях каната. В любом несущем сечении диагностические параметры ΔA и B следует рассматривать как обобщенные показатели деградации, так как они не дают информации о точном распределении дефектов по прядям и группам проволок. По этой причине зависимость прочности каната от картины износа анализируется с помощью статистического моделирования расположения дефектов по сечению [6]. Выборочные реализации представляют случайные количества оставшихся несущих фрагментов проволок в прядях, которые и определяют агрегатные коэффициенты жесткости поврежденного каната \tilde{C}_{jk} .

Комбинированное влияние потери части сечения и локальных дефектов на несущую способность каната остается неизвестным. Для заданного объема выборки и доверительной вероятности вычисляются независимо оценки математических ожиданий коэффициентов запаса каната с распределенной потерей сечения $\langle n_{\Delta A} \rangle$ и обрывами проволок $\langle n_B \rangle$. Выборочные коэффициенты $n_{\Delta A}$ и n_B определяются по формуле (2). Независимыми показателями относительного снижения прочности каната в сечении с координатой x являются параметры

$$\chi_{\Delta A}(x) = 1 - \frac{\langle n_{\Delta A}(x) \rangle}{n}, \quad \chi_B(x) = 1 - \frac{\langle n_B(x) \rangle}{n}.$$

Они соответствуют наиболее вероятным распределениям дефектов для измеренных (неслучайных) величин ΔA и B . Здесь и далее n - коэффициент запаса целого каната по напряжениям (2).

На рис.1 в качестве примера показаны гистограммы относительной остаточной прочности (несущей способности в процентах) $\eta_{\Delta A} = 100(1 - \chi_{\Delta A})$ каната ГОСТ 3077-80 при заданной потере сечения $\Delta A = 16\%$. Число реализаций распределения износа по проволокам равно 500 при доверительной вероятности 0,997. Гистограммы построены для трех предполагаемых исходных вероятностей P_i разрушения проволок: $P_i = 1/N$, $P_i \sim A_i$ и $P_i \sim 1/A_i$ (N – общее число проволок целого каната, A_i – площадь сечения i -й проволоки).

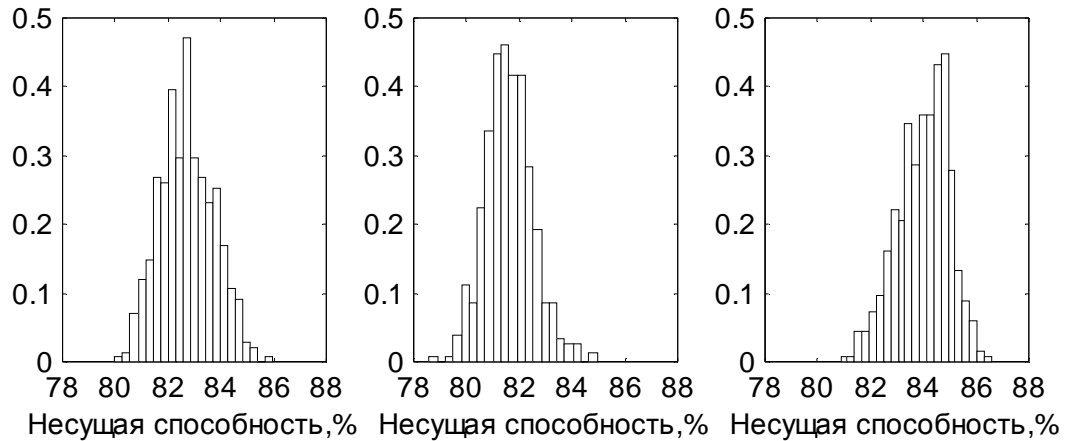


Рис.1. Гистограммы несущей способности каната при разных исходных вероятностях разрушения проволок: $P_i = 1/N$, $P_i \sim A_i$, $P_i \sim 1/A_i$

Несущая способность оказывается наименьшей, когда модель учитывает масштабный эффект прочности $P_i \sim A_i$. Статистическое моделирование позволяет выявить неблагоприятное и благоприятное расположения фрагментов с потерей металла по сечению (редкие события, отвечающие нижней и верхней оценкам несущей способности), а также типичную картину износа, которая соответствует ожидаемой оценке.

Влияние обрывов на прочность каната можно уточнить, принимая во внимание, что оборванная проволока, благодаря силам трения, начинает воспринимать такую же нагрузку, что и целые проволоки, на расстоянии примерно равном трем шагам свивки каната от места обрыва. Введем функцию влияния $G(x - \xi)$ сил трения на потерю прочности в сечении x от единичного обрыва в сечении ξ :

$$G(x - \xi) = \begin{cases} 0 & \text{при } |x - \xi| \geq 3h, \\ \varphi(x - \xi) & \text{при } |x - \xi| \leq 3h. \end{cases}$$

Здесь h - шаг свивки каната, $\varphi(x - \xi)$ - эмпирическая зависимость потери работоспособности оборванной проволоки [3]. Относительная потеря прочности каната в сечении x , вызванная обрывами проволок в сечениях ξ_l ($l = 1, \dots, L$), оценивается величиной

$$\chi_B(x) = \sum_{l=1}^L \left(1 - \frac{\langle n_B(\xi_l) \rangle}{n} \right) G(x - \xi_l).$$

Изменение прочности эксплуатируемого каната контролируется в дискретные моменты его наработки. Для неподвижных канатов наработку естественно измерять в единицах календарного времени, для подвижных – числом циклов нагружения.

Результирующая потеря прочности $\chi(x, t)$ в сечении x при наработке t оценивается суперпозицией потерь от двух видов измеряемых дефектов

$$\chi(x, t) = \chi_{\Delta A}(x, t) + \chi_B(x, t).$$

Оперативное техническое состояние каната можно охарактеризовать прочностным показателем

$$\tilde{n}(x, t) = n(1 - \chi(x, t)), \quad (3)$$

который имеет смысл функции, описывающей изменение прочности по длине каната в процессе наработки.

Верификация расчетной модели каната

Методика теоретического расчета канатов с дефектами проверялась на данных экспериментов и решениях, полученных по родственным механическим моделям. Приведем несколько характерных примеров.

1. Результаты расчета напряженного состояния сравнивались с результатами, полученными по теории Costello-Velinsky, и данными тензометрирования проволок каната 6x17 диаметром 40 мм с прядями типа Seale в условиях сочетания растяжения с кручением [7]. На рис. 2 показано изменение соответствующих нормальных напряжений в наружных проволоках при увеличении натяжения каната.

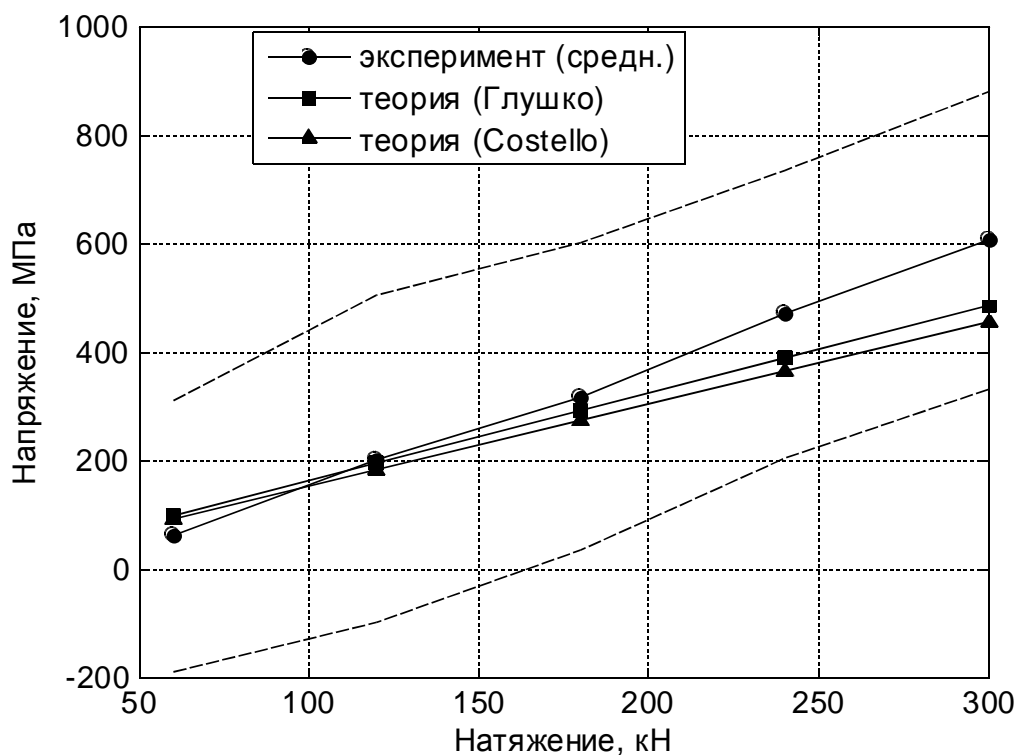


Рис.2. Сравнение экспериментальных и теоретических значений напряжений в проволоках (штриховые линии – стандартные отклонения от среднего)

2. Теоретическая остаточная прочность по предельному состоянию сравнивалась с данными испытаний на разрушение канатов с заданными искусственными обрывами в наружных слоях проволок [8]. Относительная прочность на разрыв оценивалась параметром $\eta_q = P_q/P_0$, где P_q - разрушающая нагрузка для образца каната с q начальными обрывами, P_0 - разрывная нагрузка для каната без дефектов. Аналогичный теоретический параметр был получен моделированием процесса разрушения каната при поэтапном росте натяжения [9]. На рис.3 приведены опытные и теоретические оценки остаточной прочности каната марки PYTHON 8xK19S+PWRC(K) ISO 17893:2004 диаметром 8 мм при различном числе начальных обрывов, равномерно распределенных по прядям.

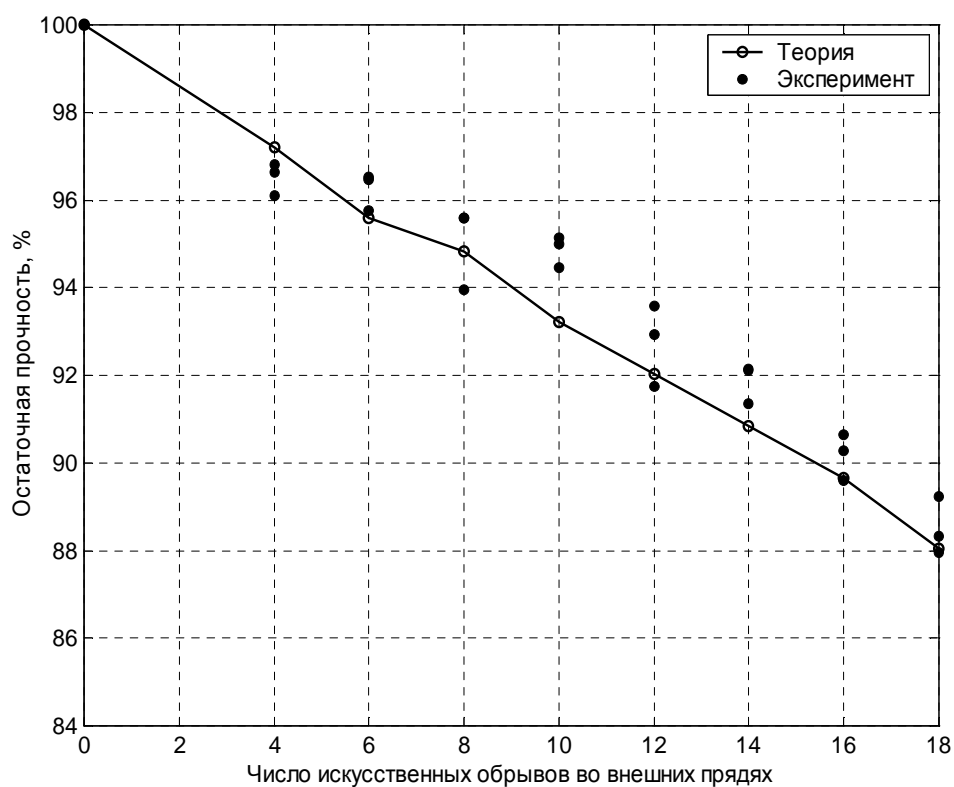


Рис.3. Сравнение данных испытаний и теоретических оценок прочности канатов с искусственными обрывами внешних проволок

3. Расчетные характеристики цикла нормальных напряжений в проволоках при пробегании каната по блоку сравнивались с теоретическими оценками и данными экспериментов из работы [10]. Определялись среднее напряжение и размах (удвоенная амплитуда). Рассматривался канат 6x19(1+9+9) + ОС (ГОСТ 3077-80) диаметром 36 мм на блоке диаметром 1037 мм с натяжением 162300 Н. Результаты приведены в табл. 1.

1. Характеристики цикла напряжений в проволоках каната

Расположение проволоки	Среднее напряжение, МПа			Размах напряжений, МПа		
	Глушко-Малиновский	Feyrer, Schiffner	Разница, %	Глушко-Малиновский	Feyrer, Schiffner	Разница, %
Контакт с блоком	713	864	17,5	620	644	3,7
На боковой поверхности каната	689	563	18,3	776	812	4,4

Средние напряжения цикла определяются уровнем напряжений в проволоках прямой ветви, дополнительными напряжениями стесненной депланации на переходном участке и изгибными напряжениями на блоке. Отличие в их величине по двум моделям связано с различными исходными кинематическими предпосылками при определении деформаций проволок, а также различными методами учета влияния трения на изгибную жесткость каната. По амплитудам циклов оба подхода дают близкие результаты.

4. Теоретические оценки снижения прочности канатов, работающих на блоках, сопоставлялись с опытными данными работы [11]. Испытывались три типа канатов с начальным износом в виде 10% порванных внешних проволок на шаге свивки. Диаметры блоков D подбирались в определенной пропорции к диаметрам канатов. Снижение прочности канатов при заходе на блок оценивалось по отношению к прочности прямых новых канатов и прямых канатов с аналогичным износом. Экспериментальные (Э) и расчетные (Р) оценки приведены в табл.2.

2. Относительные оценки снижения прочности канатов, работающих на блоках

Канат	Процент потери прочности изношенного каната на вращающихся блоках по сравнению с							
	новым прямым канатом		изношенным прямым канатом		новым прямым канатом		изношенным прямым канатом	
	D/d = 20				D/d = 30			
	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р
ГОСТ 3070-80 d = 11 мм	29	31,2	25	18,6	23	24,1	18	12,1
ГОСТ 3066-80 d = 9,9 мм	30	26,1	17	16	20	22,1	15	11,5
ГОСТ 3067-88 d = 10,5 мм	27	33,4	21	23,0	23	24,5	16	13,0

Принимая во внимание неопределенность некоторых исходных параметров (шагов свивки проволок и прядей, характеристик жесткости, распределения обрывов на шагах свивки и т.п.), а также погрешность эксперимента, согласие результатов можно признать удовлетворительным.

Прогноз остаточного ресурса

Минимальное значение показателя \tilde{n} (3) вдоль инспектируемого участка имеет смысл коэффициента запаса прочности каната при текущей наработке t_* . Дальнейшая безопасная эксплуатация каната возможно при соблюдении условия

$$\min_x \tilde{n}(x, t_*) \geq [n]. \quad (4)$$

Параметр $[n]$ определяет допустимый запас живучести каната как частично поврежденной конструкции. По своей природе это эмпирическая величина, которая может быть установлена из ресурсных испытаний или назначена на основании требований нормативных документов [4,12]. При нарушении условия (4) канат должен быть снят с эксплуатации.

Ближайшее будущее каната после очередной инспекции и оценки его запаса прочности зависит от ответов на следующие вопросы:

- 1) Останавливать или продолжать эксплуатацию, принимая во внимание недавнюю прочностную историю каната?
- 2) Если принято решение «продолжать», то при какой наработке необходимо провести следующий контроль, и какой запас прочности при этом следует ожидать?
- 3) Какой остаточный ресурс имеет данный канат по отношению к допустимому запасу прочности $[n]$?

Планирование инспекций и прогноз индивидуального ресурса производится экстраполяцией зависимости показателя $\min_x \tilde{n}(x, t)$ от наработки t на заданный уровень живучести $[n]$. Детали алгоритма изложены в [8].

Расчет изменения несущей способности каната и ресурса

Приложение разработанной методики рассмотрим на примере оценки прочностной истории и ресурса восьмипрядного шахтного каната диаметром 63 мм (ТУ 14-4-1552-89), который был проинспектирован пять раз с декабря 2006 г. по январь 2008 г. на предприятии Уралкалий. Дефектограммы, использованные в качестве входных данных прочностного расчета, получены лабораторией неразрушающего контроля компании

Интрон Плюс (Москва). Они демонстрируют развивающуюся потерю сечения и накопление обрывов проволок в процессе эксплуатации.

На рис. 4 приведены распределения функционального показателя прочности $\tilde{n}(x,t)$ для трех характерных наработок, измеряемых в циклах (один цикл соответствует одному периоду «нагрузка-разгрузка»). Расчет по напряжениям проводился по отношению к пределу прочности проволок на разрыв $\sigma_g = 1860$ МПа при номинальном натяжении каната 600000 Н. Пунктирная линия отмечает коэффициент запаса нового каната $n = 4,68$. Резкие падения несущей способности соответствуют скоплениям обрывов проволок. Эти зоны являются вероятными очагами финального разрушения. Жирными точками отмечены минимальные значения показателя \tilde{n} , по которым можно судить о работоспособности каната. Именно эти значения и определяют оперативные коэффициенты запаса прочности (живучести) каната с дефектами. Плавные изменения прочностного показателя обусловлены в основном распределенной по длине частичной потерей сечения проволок.

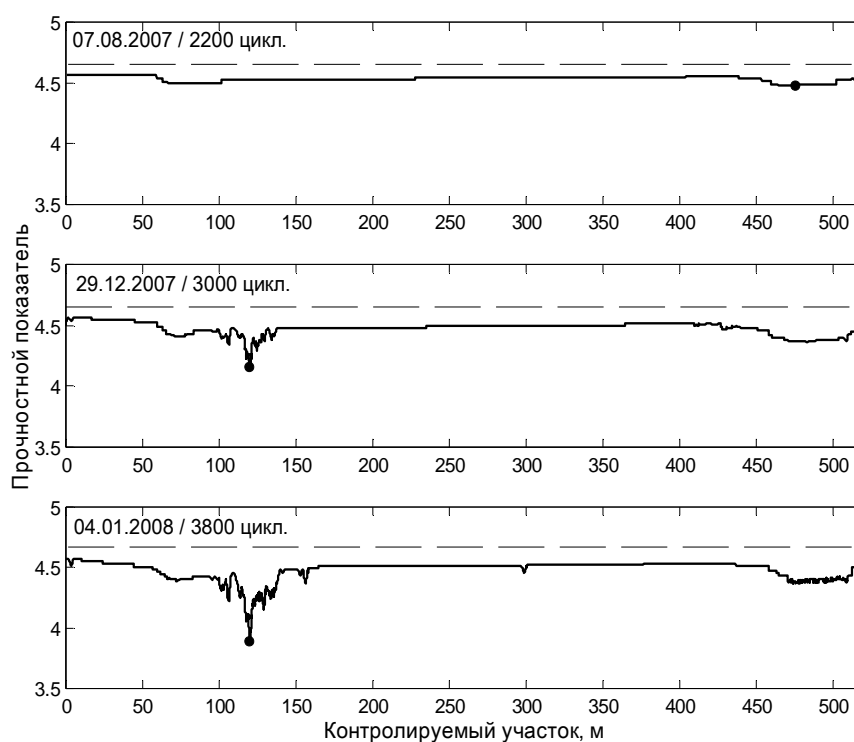


Рис.4. Изменение прочностного показателя шахтного каната на участке контроля

Рис. 5 демонстрирует изменение коэффициента запаса прочности каната в зависимости от наработки. Здесь и далее расчетные значения для наглядности соединены прямыми линиями. Светлые кружки соответствуют рекомендуемым срокам очередных

инспекций и ожидаемым запасам прочности. Каждый прогноз сделан на основании трех предыдущих ближайших данных. После пятой инспекции очередной контроль каната запланировано провести после 4600 циклов наработки, при этом коэффициент запаса ожидается равным 3,61.

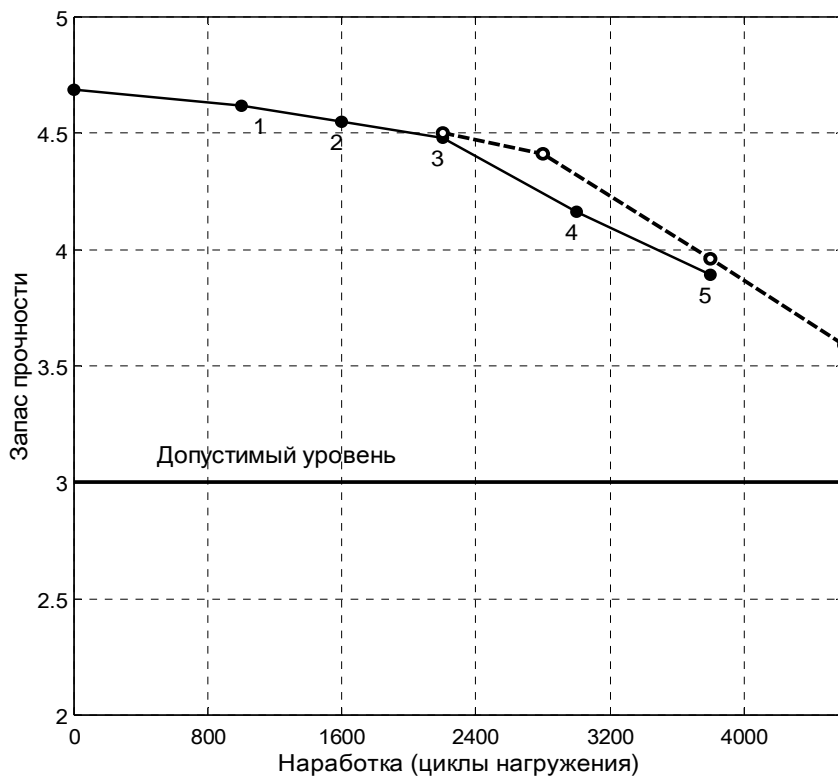


Рис. 5. Изменение коэффициента запаса прочности шахтного каната в процессе эксплуатации (штриховая линия – траектория прогнозов очередных инспекций)

Ресурс каната, меняющийся по мере накопления дефектов и снижения несущей способности, показан на рис.6. Первый прогноз сделан после двух инспекций. Прогнозируемые значения рассчитаны относительно допустимого коэффициента живучести $[n] = 3,0$, который приблизительно соответствует принятым нормам браковки канатов шахтных стволов [12]. По данным последней (пятой) инспекции остаточный ресурс оценивается в 2498 циклов, а общий ресурс с начала эксплуатации – в 6298 циклов. Данный канат не был доведен до разрушения, поэтому его реальный ресурс остается неизвестным.

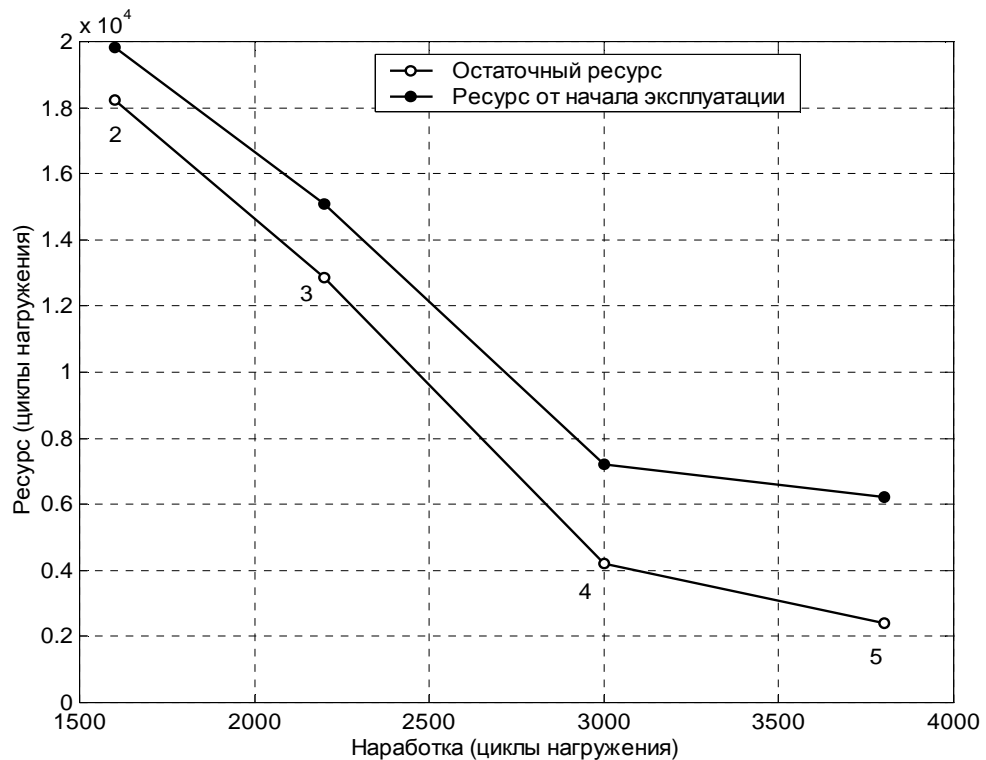


Рис. 6. Изменение показателей ресурса шахтного каната в процессе эксплуатации

Выводы

Разработанная методика демонстрирует комплексный подход к анализу технического состояния эксплуатируемых канатов средствами инструментальной диагностики и методами механики конструкций. Прочностной расчет позволяет оценить живучесть частично изношенного конкретного каната в конкретных эксплуатационных условиях, рекомендовать на этом основании сроки инспекций и давать обоснованный прогноз индивидуального ресурса.

Библиографический список

1. **Болотин В.В.** Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.
2. **Котельников В.С., Сухоруков В.В.** Дефектоскопия канатов грузоподъемных машин//Безопасность труда в промышленности. 1998, №5. С. 34 – 38.
3. **Малиновский В.А.** Стальные канаты: В 2 ч. Одесса: Астропринт. Ч. 1, 2001. 188 с.; Ч. 2, 2002. 180 с.
4. **Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов:** Сборник документов. Серия 10. Выпуск 7 / Колл. авт. М.:ГУП «НТЦ Промышленная безопасность» Госгортехнадзора России, 2002. 304 с.

5. **Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М.** Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
6. **Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н., Каган А.Я.** Вероятностная оценка прочности стальных канатов по данным магнитной дефектоскопии // Вестник МЭИ, 2002, № 5. С.5 – 10.
7. **Dubuisson J., Cantin M.** Study on mechanical conditions of looseness of outer wires of ropeway haulage ropes. OIPEEC Conference, Johannesburg, 2007. p. 175-193.
8. **Vorontsov A., Volokhovsky V., Halonen J., Sunio J.** Prediction of operating time of steel wire ropes using magnetic NDT data. OIPEEC Conference, Johannesburg, 2007. p. 145-154.
9. **Воронцов А.Н., Волоховский В.Ю., Морин И.Ю.** Прочностные показатели технического состояния стальных канатов // Стальные канаты, Одесса: Астропринт, вып.6, 2008. С. 284-294.
10. **Feyrer K., Schiffner G.** Spannungen in laufenden Drahtseilen Teil 2, 1987, DRAHT 38, N3. S.203-206.
11. **Похольченко А.С.** Экспериментальное определение потери прочности изношенных канатов. Сб. Стальные канаты. Киев. Техніка, 1967, вып.4. С.114-116.
12. **Инструкция по эксплуатации стальных канатов в шахтных стволах (РД 03-439-02)**, Серия 03, Выпуск 13 // Колл. авт. М.: НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2002. 224 с.