

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ КАК ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПРОГНОЗА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

А.Н.Воронцов, Д.А.Слесарев, В.Ю.Волоховский

Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса, как правило, базируется на использовании текущей информации об объекте, которая накапливается в результате наблюдений и измерений в процессе его эксплуатации [1]. Для стальных канатов подобную информацию дают методы неразрушающего контроля, в частности, магнитная дефектоскопия [2]. На основании данных дефектоскопии экстраполируется поведение объекта (каната) в будущем и устанавливается оптимальный момент для проведения следующей инспекции или прекращения его эксплуатации.

Пусть текущее состояние технического объекта — стального каната — контролируют на основании измерения некоторых его характеристик (диагностических признаков), которые являются функциями дискретного параметра t (времени, наработки и т.п.). Совокупность результатов измерений в момент времени t образует так называемый диагностический вектор или вектор признаков \mathbf{w} . В магнитной дефектоскопии компонентами вектора $\mathbf{w}(t)$ являются количественные меры двух типов дефектов: 1) распределенной по длине каната потери сечения по металлу вследствие износа проволок, коррозии и т.п. и 2) локальных обрывов проволок. Оба дефекта приводят к уменьшению несущей способности каната вплоть до критического (допустимого) уровня, при котором канат следует отбраковывать. Области работоспособных состояний различного типа канатов определяются нормами браковки по допустимой величине потери сечения (ПС) и/или допустимому числу локальных дефектов (ЛД) - обрывов проволок [3]. Однако, предельные нормативные показатели не учитывают совместного влияния указанных дефектов на состояние каната, поэтому задать допустимую область относительно диагностических показателей можно лишь в грубом приближении. Скорости накопления потери сечения и обрывов проволок в ходе эксплуатации каната могут меняться в ту или другую сторону. Вследствие неопределенности ситуации механизм прогнозирования ресурса каната по двум диагностическим параметрам в настоящее время отсутствует.

Альтернативным подходом является оценка ресурса по изменению параметров механического состояния каната, которые можно задать в качестве компонент вектора

$u(t)$. С точки зрения механики конструкций параметрами состояния могут служить коэффициенты запаса прочности каната по напряжениям и (или) нагрузке.

Связь между параметрами состояния u и диагностическими показателями w представим в виде

$$u = G(w, q, a, b). \quad (1)$$

Оператор G определяется структурной моделью каната с дефектами. Здесь $q(t)$ - вектор внешних воздействий, a - вектор механических параметров каната, b - вектор параметров системы измерения (учитывающий также особенности алгоритма обработки ПС- и ЛД-дефектограмм).

Пусть результаты измерений процесса $w(t)$ в моменты времени $T_k = \{t_1, \dots, t_k\}$ равны $w(T_k) = \{w_1, \dots, w_k\}$. Решая уравнение (1) найдем значения $u(T_k)$, соответствующие измеренным параметрам $w(T_k)$ и экстраполируем по ним процесс $u(t)$ на отрезок $(t_k, t_{k+1}]$. Прогнозируемый процесс обозначим $u(t|T_k)$. Тогда естественно принять следующее правило: канат, работоспособный при $t \leq t_k$, можно эксплуатировать до момента времени $t_{k+1} > t_k$, если при всех $t \in (t_k, t_{k+1}]$ выполнено условие $u(t|T_k) \in \Omega_u$. Здесь Ω_u - допустимая область, определяемая через параметры состояния каната.

Реальные задачи прогнозирования долговечности, как правило, вероятностные. При этом $u(t)$ - случайный процесс, так что вопрос о принадлежности вектора состояния u области Ω_u должен быть поставлен в вероятностном смысле. Однако, из-за отсутствия статистической информации о предельном состоянии конкретных канатов в конкретных условиях эксплуатации, а также априорных вероятностных оценок их механических свойств и нагрузок ограничимся далее детерминистическим прогнозом сроков инспекций и долговечности.

Рабочее состояние стального каната будем характеризовать коэффициентом запаса прочности по напряжениям $n(x, t)$ (x - продольная координата контролируемого участка). Он является компонентой вектора u и вычисляется по механической модели (1) с использованием данных $w(x, t)$ инструментальной диагностики.

Условие надежного функционирования каната выражается требованием

$$\min_x n(x, t) \geq n_*. \quad (2)$$

Допустимый остаточный запас прочности $n_* \geq 1$ отражает уровень приемлемого риска при эксплуатации каната с учетом повреждений. Он назначается, исходя из опыта работы похожих канатов в сходных условиях, или определяется пересчетом по механической модели нормативного браковочного числа дефектов. На его величину ориентируется алгоритм планирования сроков инспекций и прогноза остаточного ресурса [6]. Нарушение условия (2) означает отказ каната.

Параметрами прогноза являются минимальные на контролируемом участке прочностные показатели состояния $n_{T_k} = \min_x n(x, |T_k)$. При текущей наработке t_k срок очередной инспекции и остаточный ресурс рассчитываются экстраполяцией аппроксимации дискретной зависимости n_{T_k} .

Прогноз сводится к ответам на два вопроса:

1) прекращать или продолжать эксплуатацию каната при текущей наработке t_k на основе анализа совокупности значений n_{T_k} и какой при этом ожидается остаточный ресурс ?;

2) если продолжать, то, для какого значения наработки $t_{k+1} = t_k + \Delta t_k$ необходимо проводить следующий контроль, и какой при этом ожидается коэффициент запаса n_{k+1} ?

Интервал $\Delta t_* = t_* - t_k$ с момента последнего контроля t_k до момента t_* достижения предельного уровня при средней (на ближайший предыдущий период) скорости снижения прочности, может быть принят за оценку текущего остаточного ресурса каната. Заметим, что теоретический прогноз имеет лишь рекомендательный характер; окончательное решение о состоянии каната и планируемых действиях принимает оператор.

На основе представленной методики в компании Интрон Плюс разработано программное обеспечение Wintros/RopeStrength, которое, по данным магнитной дефектоскопии позволяет оценивать состояние эксплуатируемого каната с точки зрения прочности, планировать даты инспекций и давать рекомендательный прогноз индивидуального остаточного ресурса. Программа предназначена для расчета неподвижных и несущих канатов различного типа, работающих при растяжении, а также подвижных канатов, огибающих блоки, шкивы и барабаны при сочетании растяжения и циклического изгиба.

Обработка дефектограмм стальных канатов, полученных с помощью прибора Интрос, заключается в обнаружении и определении параметров локальных дефектов

(числа и местоположения обрывов проволок) и в анализе распределенной потери сечения. В нормативных документах критерии браковки формулируются относительно максимально допустимого числа обрывов проволок на заданную длину, например, на 5 или 30 диаметров каната, и относительно максимально допустимой потери сечения. Программа “Wintros 3.1” позволяет отмечать местоположение, задавать параметры локальных дефектов и автоматически проверять браковочные показатели. В качестве примера рассмотрим дефектограммы, полученные при проведении 3-го, 4-го и 5-го обследований шахтного каната на предприятии Уралкалий (первые две инспекции не выявили каких-либо заметных дефектов). Диаметр каната 63 мм, конструкция соответствует ТУ 14-4-1552-89, номинальное натяжение 600000 Н.

На рис. 1 показаны соответствующие дефектограммы локальных дефектов (ЛД), на которых желтым маркером отмечены обрывы проволок. На первой дефектограмме сигналы от локальных дефектов отсутствуют, на второй присутствуют сигналы от 26 локальных дефектов, преимущественно одиночных обрывов проволок, 5 из них соответствуют обрывам двух проволок в одном сечении и 1 — обрыву трех проволок. На третьей дефектограмме зафиксированы сигналы от 47 локальных дефектов, из которых 10 соответствуют обрывам двух проволок в одном сечении и 2 — обрывам 3 проволок. Число оборванных проволок, соответствующих конкретному локальному дефекту, определяется с учетом амплитуды и формы сигнала от обрыва на дефектограмме ЛД, локальной величины потери сечения и конструкции каната.

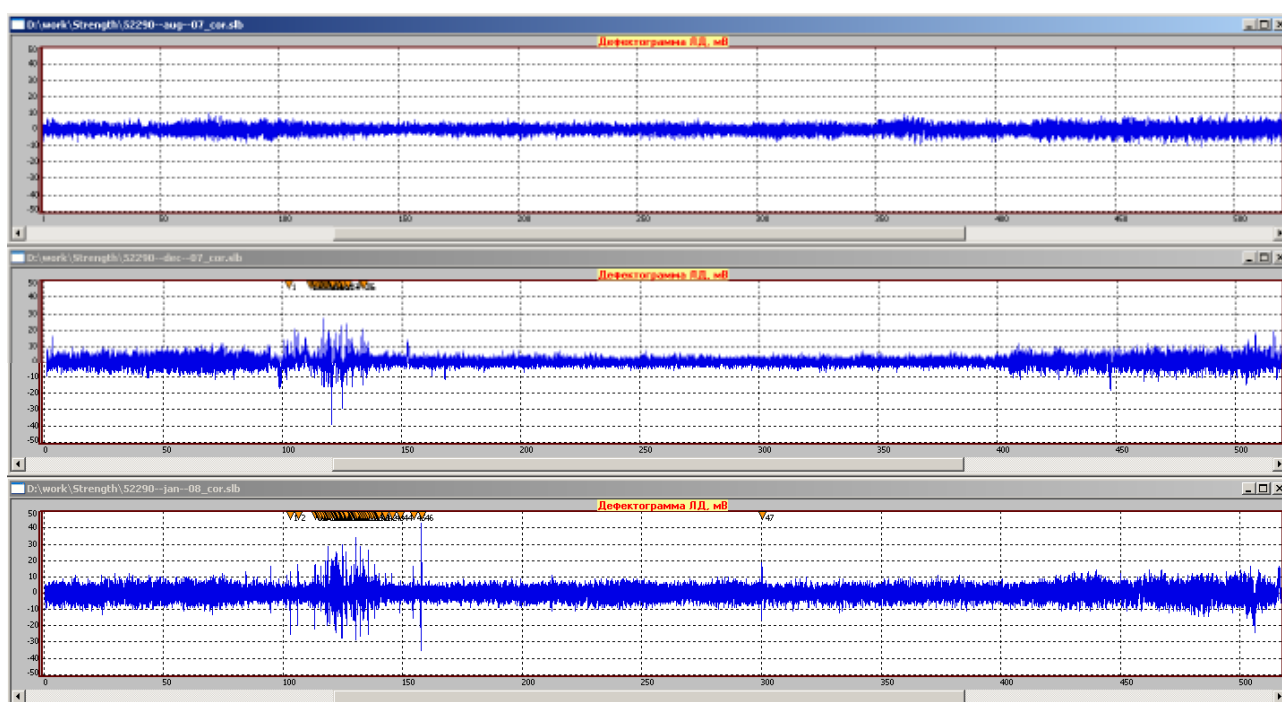


Рис.1 Дефектограммы ЛД

Проведенные обследования, наряду с процессом роста числа локальных дефектов, выявили и развивающуюся потерю сечения. На рис. 2 показаны соответствующие дефектограммы потери сечения (ПС), наложенные друг на друга. Максимальный уровень потери сечения при третьем обследовании на 2% выше, чем при первом. Очевидно, подобные дефектограммы отражают постепенную деградацию прочности каната.

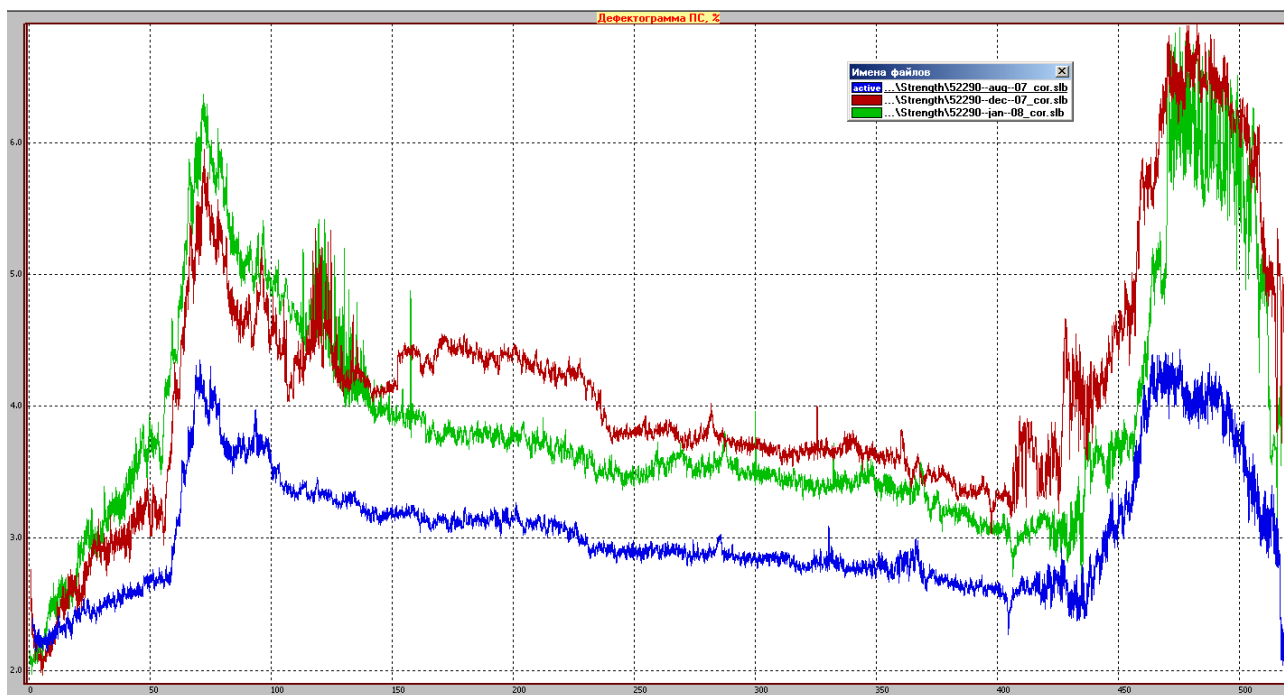


Рис. 2 Дефектограммы ПС

Для количественной оценки потери несущей способности и остаточного ресурса обследованного каната применяется программный модуль “RopeStrength”, в который из программы “Wintros 3.1” экспортируются результаты обработки дефектограмм — данные о локальных дефектах и распределении потери сечения. Прочностной расчет базируется на теории стальных канатов Глушко-Малиновского, которая, рассматривая канат как гетерогенную структуру, позволяет определить напряженное состояние каждой проволоки при разнообразных условиях нагружения [4,5]. На рис. 3 приведены данные расчета распределения запаса прочности по длине каната для рассмотренных выше инспекций при наработках в 2200, 3000 и 3800 циклов. Коэффициент запаса определялся по отношению к маркировочной группе 1860 Н/мм^2 (пределу прочности проволок на разрыв).

Провалы запаса прочности соответствуют зонам скопления локальных дефектов (рис.1), которые являются вероятными очагами разрушения каната, требующими особого

внимания. На участках (50 ÷ 100) м и (400 ÷ 500) м снижение прочности обусловлено в основном потерей сечения (рис. 2).

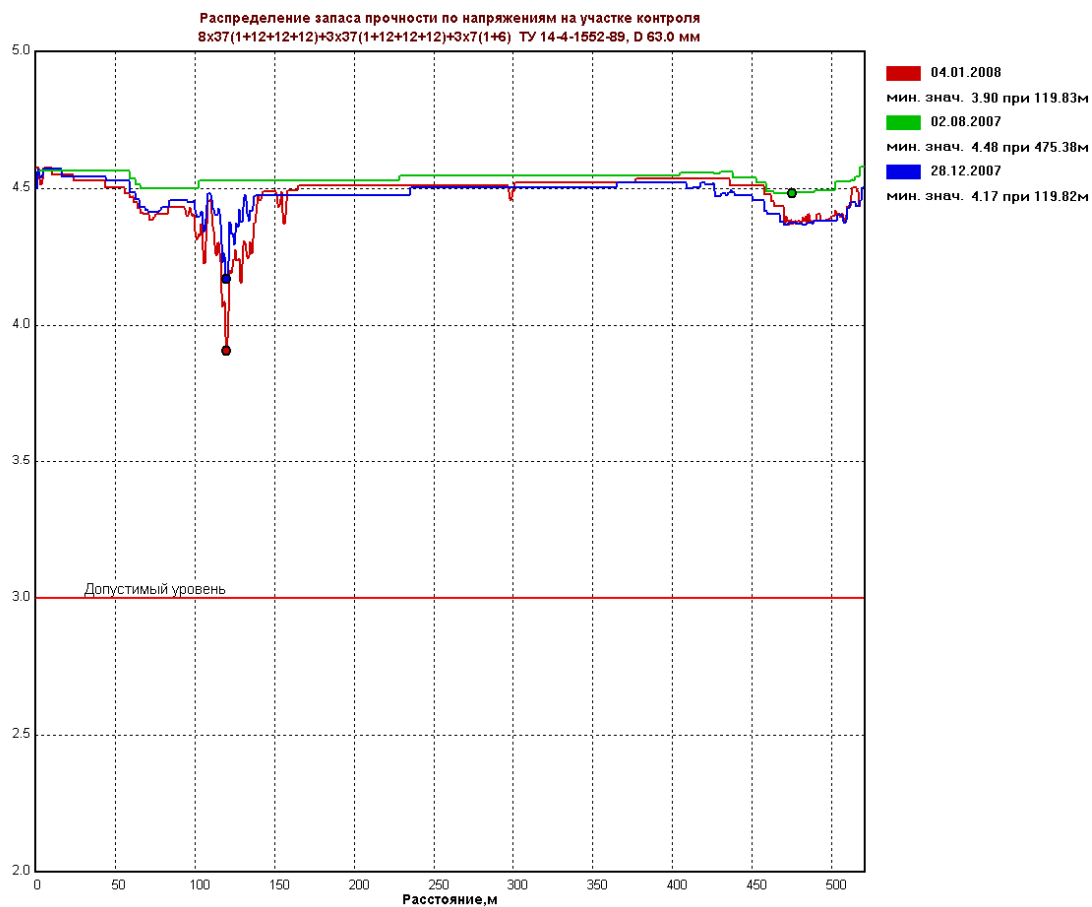


Рис. 3 Распределение запаса прочности каната на участке контроля

Рис.4 демонстрирует изменение прочностных показателей каната в зависимости от наработки, измеряемой в циклах нагружения (для всех пяти инспекций, начиная с условно целого каната). Интегральные оценки соответствуют средним запасам прочности на рассматриваемом участке, минимальные – значениям, которые отмечены кружками на рис.4. Рекомендуемые сроки инспекций оценивались всякий раз по ближайшей текущей прочностной истории каната.

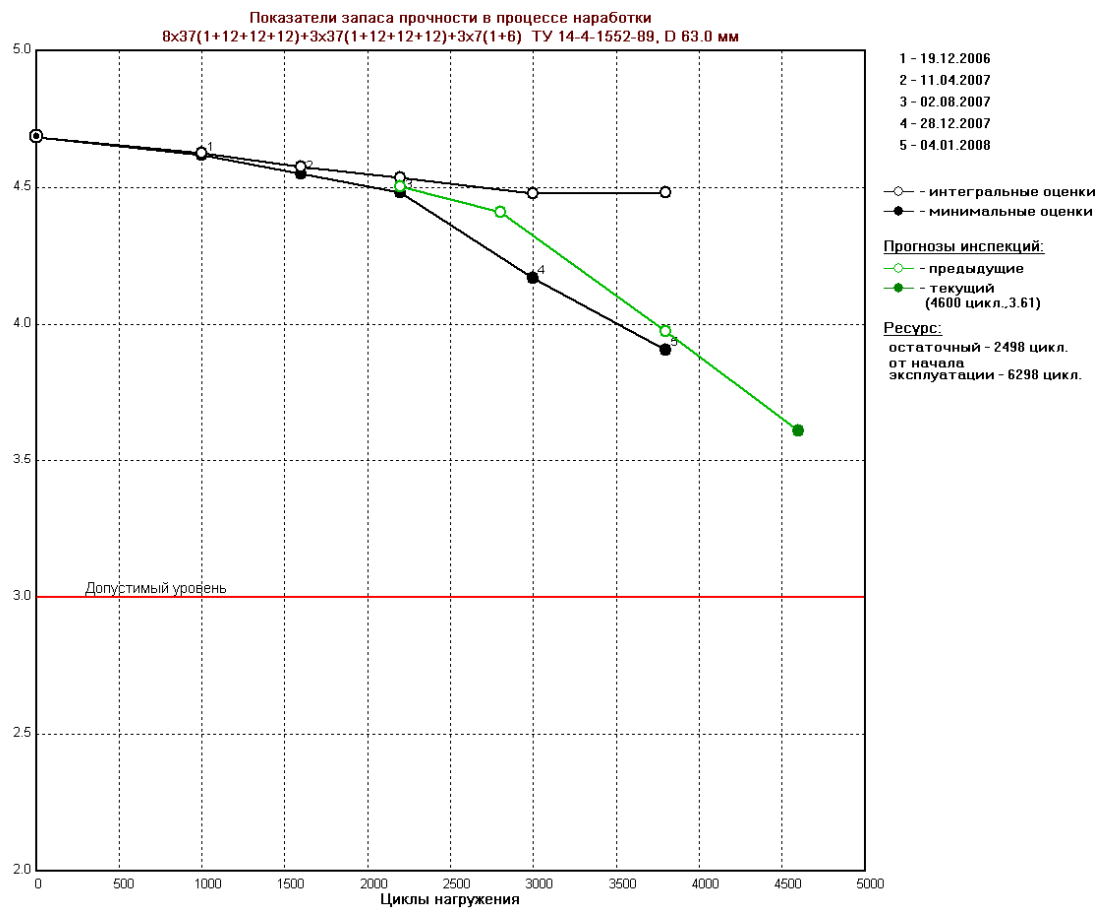


Рис.4 Изменение прочностных показателей каната шахтного подъема ТУ 14-4-1552-89 в процессе эксплуатации

Ресурс каната, меняющийся по мере накопления дефектов и снижения несущей способности, показан на фоне наработки на рис.5. Прогнозируемые значения рассчитаны относительно минимально допустимого коэффициента запаса $n_* = 3,0$, который приблизительно соответствует принятым нормам браковки канатов шахтных стволов [7].

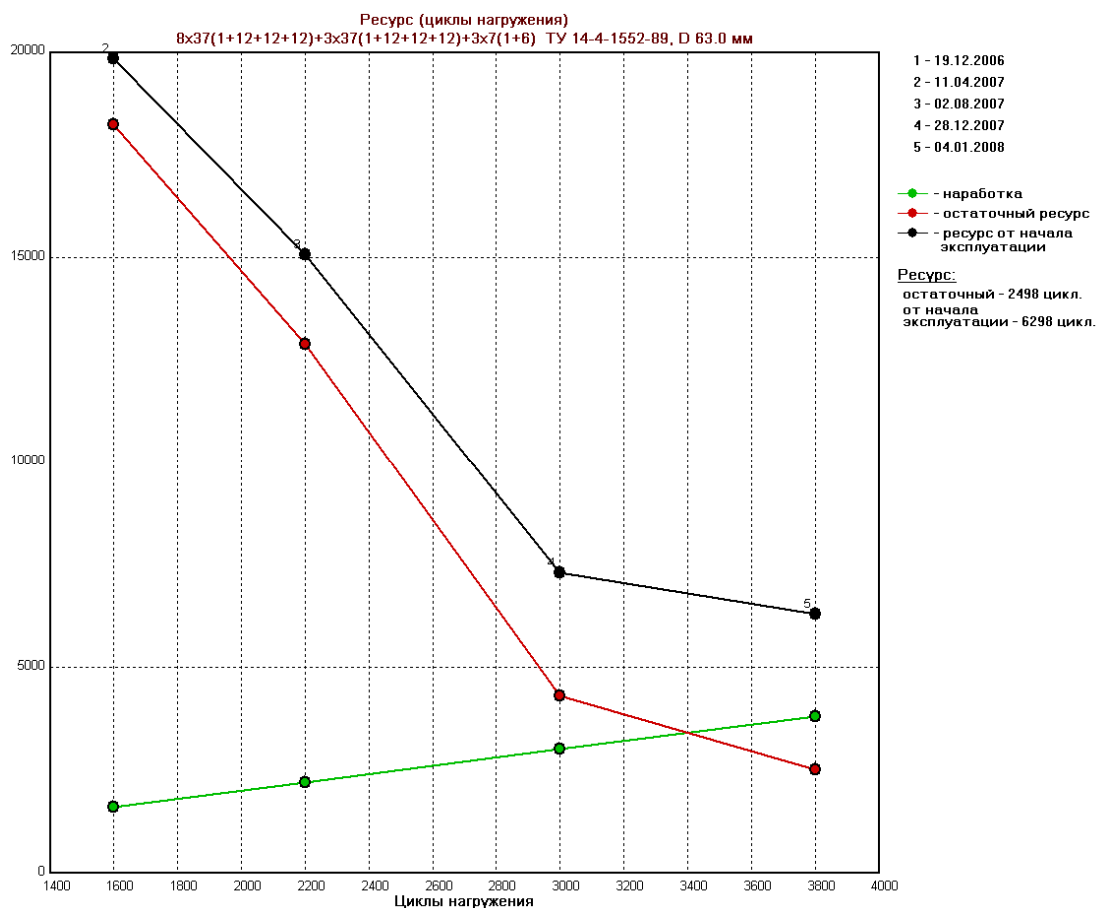


Рис.5 Изменение показателей ресурса каната шахтного подъема ТУ 14-4-1552-89 в процессе эксплуатации

Разработанная методика демонстрирует комплексный подход к анализу состояния эксплуатируемых канатов средствами инструментальной диагностики и методами механики конструкций. Прочностной расчет позволяет более реально оценить остаточную несущую способность каната с учетом взаимодействия различных факторов, влияющих на его деградацию, и дать обоснованный прогноз индивидуального ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

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. РД РОСЭК 012-97. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки.
4. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. Киев: Техника, 1966. 328 с.

5. **Малиновский В.А.** Стальные канаты: В 2 ч. Одесса: Астропринт. Ч. 1. – 2001. 188 с.; Ч. 2. – 2002. 180 с.

6. **A.Vorontsov, V.Volokhovsky, J.Halonen, J.Sunio.** Prediction of operating time of steel wire ropes using magnetic NDT data //OIPREC Conference, Johannesburg. 2007. P. 145-154.

7. **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.