

УДК 629.423

Воропай В.С. *

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ВАГОНОВ-ЦИСТЕРН

В статье представлены обобщенный показатель величины расхода остаточного ресурса вагона-цистерны и специализированные критерии, учитывающие действие на элементы базовых частей вагона коррозии, изменения механических характеристик металла, много- и малоциклового усталости, возможности хрупкого разрушения и условия ползучести. Предложено использование метода экстраполяции при прогнозировании допускаемого срока службы вагонов-цистерн по обобщенному показателю величины расхода остаточного ресурса.

Ключевые слова: параметр технического состояния, аппроксимация, остаточный ресурс, метод экстраполяции, процедура сглаживания, прогнозная величина.

Воропай В.С. Прогнозування строку служіння вагонів-цистерн. У статті представлені узагальнені показники величини витрати залишкового ресурсу вагону-цистерни і спеціалізовані критерії, що враховують дію на елементи базових частин вагону корозії, зміни механічних характеристик металу, багато- і малоциклової втоми, можливості крихкого руйнування і умови повзучості. Запропоновано використання методу екстраполяції при прогнозуванні терміну служби вагонів-цистерн, що допускається, по узагальненому показнику величини витрати залишкового ресурсу.

Ключові слова: параметр технічного стану, апроксимація, залишковий ресурс, метод екстраполяції, процедура згладжування, прогнозна величина.

V.S.Voropaj Forecasting of service lives of tank cars. Described in the article were generalized indices of residual resources of tank cars and special criteria, taking into account the action of corrosion upon car elements, as well as changes in metal mechanical characteristic, poly and small cycle fatigue, the possibility of destruction and creeping conditions, The use of the method of extrapolation for forecasting of a possible service lives of tank cars, according to generalized index of the value of the flow of residual resource was proposed.

Keywords: parameters of technical conditions, approximation, a residual resource, an extrapolation method, smoothing procedure, forecasted value look.

Постановка проблемы. С точки зрения диагностирования вагонов-цистерн, наибольший интерес представляет математическое описание характера зависимости параметра технического состояния от наработки. От выбора математической функции зависит качество, достоверность и простота постановки диагноза и прогнозирования остаточного ресурса. Эта функция должна быть универсальной – характеризующей линейную, степенную и другие зависимости изменения параметра от наработки, и простой – содержащей небольшое число коэффициентов и обеспечивающей простоту построения номограмм, таблиц и других справочных материалов. В статье предложено применение метода экстраполяции при прогнозировании допускаемого срока службы вагонов.[1,2,3]

Анализ последних исследований и публикаций. Созданию методического обеспечения проектирования и испытания котлов железнодорожных цистерн, элементов ударно-тяговых устройств, деталей ходовых частей и тормозов посвящены работы В.М.Бубнова, В.Н.Котуранова, В.А.Камаева, М.Б.Кельриха, А.Н.Савоськина, В.Д.Хусидова и др. В этих работах рассматриваются конкретные задачи выбора параметров отдельных узлов вагона на различных стадиях проектирования и модернизации.

Исследованиями, направленными на изучение и обоснование ресурса ответственных элементов металлоконструкции грузового подвижного состава, занимались следующие ученые:

* ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

А.А. Битюцкий, В.В. Болотин, Г.М. Волохов, Н.Н. Воронин, Г.И. Герасименко, А.Д. Кочнов, Ю.П. Портнов, А.М. Соколов, М.Г. Сыровцев, В.П. Сычев, А.В. Третьяков, С.В. Урушев, В.Н. Цюренко, Ю.М. Черкашин и ряд других исследователей. В данных работах проведен достаточно полный структурный анализ состояния универсальных грузовых вагонов. На основании длительного опыта эксплуатации произведена оценка основных повреждений несущих элементов вагонов. Предложен алгоритм оценки ресурса железнодорожного подвижного состава и рассмотрены основные этапы его реализации. Представлены результаты испытаний после ремонта увеличенного объема, которые свидетельствуют о наличии ресурса у вагонов с истекшим назначенным сроком эксплуатации.

Цель статьи – выделение наилучшего описания тренда и определение прогнозных значений путем их экстраполяции.

Изложение основного материала. Использование метода экстраполяции при прогнозировании срока службы вагонов-цистерн основано на том, что рассматриваемый процесс изменения параметров технического состояния представляет собой сочетание двух составляющих: детерминированной и случайной

$$y(x) = f(\bar{a}, x) + \tau(x) \quad (1)$$

Считается, что детерминированная составляющая $f(\bar{a}, x)$ представляет собой гладкую функцию от аргумента, описываемую конечномерным вектором параметров $\{a\}$, которые сохраняют свои значения на периоде упреждения прогноза. Эта составляющая называется трендом или тенденцией.

Случайная величина составляющей $\tau(x)$ является величиной некоррелированного случайного процесса с нулевым математическим ожидаемым. Ее оценки необходимы для дальнейшего определения точностных характеристик прогноза

Специфической чертой прогнозной экстраполяции является предварительная обработка числового ряда с целью преобразования его к виду, удобному для прогнозирования, с учетом анализа логики и физики прогнозируемого процесса.

Для предварительной обработки числового ряда прогноза нового срока службы вагона используется процедура сглаживания и выравнивания.

Процедура сглаживания направлена на минимизацию случайных отклонений точек ряда от некоторой гладкой кривой предполагаемого тренда процесса.

В работе сглаживание проводилось с помощью многочленов. В этой процедуре наилучшее сглаживание достигалось для средних точек группы. Так по первым точкам Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 сглаживалась средняя точка Y_3 , затем по следующей пятерке Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6 сглаживалась Y_4 и т.д. Оставшиеся крайние точки сглаживались по специальным формулам. Применялась наиболее распространенная линейная форма сглаживания, т.е. использовался многочлен первой степени.

Для сглаживания по трем точкам применялись следующие формулы:

$$\tilde{y}_0 = \frac{1}{3}(y_{-1} + y_0 + y_{+1}); \quad \tilde{y}_{-1} = \frac{1}{6}(5y_{-1} + 2y_0 + y_{+1}); \quad \tilde{y}_{+1} = \frac{1}{6}(-y_{-1} + 2y_0 + 5y_{+1}), \quad (2)$$

где y_0, \tilde{y}_0 - значения исходной и сглаженной функции в средней точке;

y_{-1}, \tilde{y}_{-1} - значения исходной и сглаженной функции в левой от средней точке;

y_{+1}, \tilde{y}_{+1} - значения исходной и сглаженной функции в правой от средней точке.

Формулы \tilde{y}_{-1} и \tilde{y}_{+1} применялись по краям интервала.

Аналогичные формулы применялись для сглаживания ряда по пяти точкам:

$$\tilde{y}_0 = \frac{1}{5}(y_{-2} + y_{-1} + y_0 + y_1 + y_2); \quad \tilde{y}_{-1} = \frac{1}{10}(4y_{-2} + 3y_{-1} + 2y_0 + y_1); \quad \tilde{y}_{+1} = \frac{1}{10}(y_{-1} + 2y_0 + 3y_1 + 4y_2);$$

$$\tilde{y}_{-2} = \frac{1}{5}(3y_{-2} + 2y_{-1} + y_0 - y_2); \quad \tilde{y}_{+2} = \frac{1}{5}(-y_{-2} + y_0 + 2y_1 + 3y_2). \quad (3)$$

Сглаживание в линейном варианте, как показала практика эксплуатации вагонов, позволяет достаточно точно выявлять величину тренда и определять срок полезного использования.

При формировании прогноза технического состояния вагона учитывались следующие оценки соотношений между временем основания прогноза, временем упреждения и заданной

точностью.

Для линейной функции экстраполяции стандартное отклонение прогнозной величины ресурса вагона определялась по формуле:

$$S_p = S_y \sqrt{\frac{n+1}{n} + \frac{(t_L - \bar{t})^2}{\sum_{t=1}^n (t - \bar{t})^2}}, \quad (4)$$

где S_y - стандартное отклонение исходного ряда от расчетных значений у;

n - число наблюдений ретроспективного периода;

t_L - время упреждения плюс время ретроспекции;

\bar{t} - середина ретроспективного периода.

Заменив в (4) значения

$$\bar{t} = \frac{n+1}{2}; \quad \sum (t - \bar{t})^2 = \frac{n(n^2 - 1)}{12} \quad \text{и} \quad t_L - \bar{t} = \frac{n+2L-1}{2},$$

получали

$$S_p = S_y k = S_y \sqrt{\frac{n+1}{n} + \frac{3(n+2L-1)^2}{n(n^2 - 1)}}. \quad (5)$$

Тогда доверительный интервал прогноза определялся как

$$\mathcal{E}_t + L \pm S_y K t_a, \quad (6)$$

где t_a - значение t - критерия Стьюдента.

Обозначив $K' = K t_a$, получали $\mathcal{E}_y = S_y K'$. Таким образом, K' рассматривалось как отношение стандартных отклонений прогнозных значений к отклонениям фактических значений на ретроспективном участке тренда:

$$K' = \frac{\mathcal{E}_y}{S_y}. \quad (7)$$

Прогнозирование остаточного ресурса вагона-цистерны специализированными критериями выполнялось следующим образом.[3,4] Остаточный ресурс базового элемента вагона, подвергающегося действию коррозии, определялся по формуле:

$$T_k (T_s) = \frac{S_\phi - S_p}{a} \quad (8)$$

где S_ϕ - фактическая минимальная толщина стенки элемента, мм;

S_p - расчетная толщина стенки элемента, мм;

a - скорость равномерной коррозии (эрозийного износа), мм/год;

Формула (8) используется, если число замеров N толщины стенок за время эксплуатации вагона не превышает 3. Скорость равномерной коррозии «а» определялась следующим образом. Если после проведения очередного обследования имелось только одно измерение контролируемого параметра $S_\phi(t_1)$, полученное при рассматриваемом обследовании, то скорость коррозии определялась по формуле

$$a = \frac{S_u + C_o - S_\phi}{t_1}, \quad (9)$$

где S_u - исполнительная толщина стенки элемента, мм;

C_o - плюсовой допуск на толщину стенки, мм;

t_1 - время от момента начала эксплуатации до момента обследования, лет.

Если после проведения очередного обследования имелось два измерения контролируемого параметра $S_\phi(t_2), S_\phi(t_1)$, то скорость коррозии определялась по формуле:

$$a = \frac{S_\phi(t_1) - S_\phi(t_2)}{(t_2 - t_1) K_1 K_2}, \quad (10)$$

где $S_\phi(t_2), S_\phi(t_1)$, - фактическая толщина стенки элемента при первом и втором обследовании.

дованиях соответственно, мм; t_1, t_2 - время от момента начала эксплуатации до момента первого и второго обследования, соответственно, лет; K_1 - коэффициент, учитывающий отличие средней ожидаемой скорости коррозии (эрозии) от гарантированной скорости коррозии (эрозии) с доверительной вероятностью $\gamma = 0,7 \div 0,95$; K_2 - коэффициент, учитывающий погрешность определения скорости коррозии по линейному закону, от скорости коррозии, рассчитанной по более точным (нелинейным) законам изменения контролируемого параметра.

Для большинства грузовых вагонов значение K_1 и K_2 можно принимать в пределах

$$K_1 = 0,5-0,75; K_2 = 0,75-1,0.$$

Если после проведения очередного диагностирования имелось три значения контролируемого параметра $S_\phi(t_1), S_\phi(t_2), S_\phi(t_3)$, полученные при обследованиях в моменты времени t_1, t_2, t_3 , то для определения скорости коррозии a проводились следующие вычисления.

Определялись величины:

$$S_1 = \sum_{i=1}^3 S_\phi(t_i); \quad S_2 = \sum_{i=1}^3 S_\phi(t_i)t_i; \quad x_1 = \sum_{i=1}^3 t_i; \quad x_2 = \sum_{i=1}^3 t_i^2. \quad (11)$$

После чего «а» определялась по формуле:

$$a = \frac{S_1 X_1 - 3S_2}{(3X_2 - X_1^2)K_1 K_2}. \quad (12)$$

Во всех трех случаях скорость коррозии – величина случайная, и ее оценку необходимо производить в доверительном интервале прогноза – по зависимости (2), выбирая наиболее неблагоприятный ход развития событий – максимально возможную скорость коррозии.

Как было показано выше, в процессе эксплуатации вагонов, в ряде случаев, происходит снижение механических свойств материалов отдельных элементов. Такое снижение механических свойств выявляется в процессе испытания образцов, изготовленных из контрольных вырезов, либо путем замера твердости металла и определения механических характеристик элементов вагона по существующим корреляционным зависимостям. В случае, если снижение механических свойств оказалось более 5% нормативных, то все расчеты проводились по фактическим механическим свойствам материала, а скорость снижения свойств определялась аналогично скорости коррозии и путем экстраполяции определялись механические свойства материала к концу ожидаемого остаточного периода эксплуатации вагона.

Оценка ресурса вагона-цистерны по критерию мало- и многоциклового усталости проводилась следующим образом.

Величина эквивалентной приведенной амплитуды динамических напряжений при расчете многоциклового усталости определялась по дискретной функции плотности распределения амплитуд напряжений по формуле[5]:

$$\sigma_{a,\phi} = m \sqrt{\frac{T_k}{N_0} \left[N_{c1} \sum_j (\sigma_{aj}^I)^m \cdot P_j^I + N_{c2} \sum_k (\sigma_{ak}^{II})^m \cdot P_k^{II} + N_{c3} \sum_n (\sigma_{an}^{III})^m \cdot P_n^{III} \right]}, \quad (13)$$

где $\sigma_{a,\phi}$ - расчетная величина амплитуды динамического напряжения условного симметрического цикла, приведенная к базовому числу циклов N_0 , эквивалентная по повреждающему действию реальному режиму эксплуатационных случайных напряжений за расчетный срок эксплуатации; m – показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах; T_k - расчетный срок эксплуатации в годах; N_0 - базовое число циклов; $N_{c1,2,3}$ - число циклов динамических напряжений, действующих на вагон соответственной через автосцепку, от колебаний на рессорах, ремонтных и др.; σ_{aj}^I - амплитуды динамических напряжений в j диапазонах ударных продольных сил; σ_{ak}^{II} - амплитуды динамических напряжений от колебаний на рессорном подвешивании (в k диапазонах); σ_{an}^{III} - амплитуды динамических напряжений от испытательного внутреннего давления, ремонтных нагрузок и т.д. (в n диапазонах); $P_{j,k,n}$ – частота возникновения амплитуд при соответствующих напряжениях.

Величина расчетного срока эксплуатации в годах по критерию многоциклового усталости

определялась по формуле:

$$T_k = \frac{(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]})^m \cdot N_0}{N_{c1} \sum_j (\sigma_{aj}^I)^m \cdot P_j^I + N_{c2} \sum_k (\sigma_{ak}^{II})^m \cdot P_k^{II} + N_{c3} \sum_n (\sigma_{an}^{III})^m \cdot P_n^{III}}, \quad (14)$$

где $\sigma_{a,N}$ - предел выносливости по амплитуде для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов N_0 ;

$[n]$ – допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости.

При расчете конструкции на малоцикловую усталость, согласно [5] принималось:

$$T_k \cdot \sum_i \frac{N_i}{[N]_i} = 1, \quad (15)$$

где N_i - число циклов i – го нагружения за 1 год эксплуатации; T_k - расчетный срок эксплуатации, в годах; $[N]_i$ - допускаемое число циклов i - го нагружения.

Из условия циклической прочности расчетный срок эксплуатации определялся по формуле:

$$T_k = \frac{1}{\sum_i \frac{N_i}{[N]_i}}. \quad (16)$$

Определение остаточного ресурса по критерию хрупкого разрушения (трещиностойкости) проводился в следующих случаях. Во-первых, если при проведении дефектоскопии элемента были обнаружены дефекты, близкие к установленным предельным значениям, и ремонт их связан с большими техническими трудностями. Во-вторых, если при проведении дефектоскопии были выявлены отдельные трещины, которые при ремонте были заварены и при повторном контроле было установлено отсутствие этих дефектов. Условие сопротивления хрупкому разрушению проверялось на основании выполнения соотношения:

$$K_{\sigma 1} \leq [K_{\sigma 1}],$$

где $K_{\sigma 1}$ – коэффициент интенсивности напряжений;

$[K_{\sigma 1}]$ – допускаемый коэффициент интенсивности напряжений.

При отсутствии информации о дефекте, что является наиболее распространенным случаем для базовых частей вагонов-цистерн, при определении $K_{\sigma 1}$ принималась условная поверхностная трещина глубиной $a = 0,25S$ и полудлиной $C=1,5a$ [116].

Остаточный ресурс с учетом ползучести материалов (длительной прочности) определялся для вагонов-цистерн, работающих при повышенных температурах, таких как вагон-цистерна для перевозки пека модели 15-1532, когда в расчетах на прочность допускаемое напряжение определяется по пределу длительной прочности или 1% предела ползучести для заданного срока эксплуатации. Если нет таких данных, то температура, когда учитывается ползучесть, принималась равной и выше $380 \text{ }^\circ\text{C}$ для углеродистых сталей, $420 \text{ }^\circ\text{C}$ - для низколегированных сталей, $525 \text{ }^\circ\text{C}$ - для аустенитных сталей.

На основании ретроспективной информации об изменении фактического размера $L_\phi(t)$ элемента базовых частей вагона, в местах действия наиболее высокой температуры, где была выявлена остаточная деформация ползучести, ресурс элемента T_n определялся по следующей зависимости:

$$T_n = \frac{1}{a_n}, \quad (17)$$

где a_n - скорость установившейся ползучести, %/год.

Остаточный ресурс T_n^0 элемента в этом случае определялся по формуле:

$$T_n^0 = T_n - T_\gamma, \quad (18)$$

где T_γ - продолжительность эксплуатации от начала до последнего обследования.

Скорость установившейся ползучести определялась по формуле:

$$a_n = \frac{100[L_\phi(t_1) - L_\phi(t_2)]}{L_\phi(t_1)\Delta t K_1 K_2}, \quad (19)$$

где $L_\phi(t_1), L_\phi(t_2)$, - фактический размер контролируемого элемента, мм; Δt - время между первым и вторым обследованием, лет; K_1 - коэффициент, учитывающий отличие средней ожидаемой скорости ползучести с доверительной вероятностью $\gamma = 0,7 \div 0,95$; K_2 - коэффициент, учитывающий погрешность определения скорости ползучести, рассчитанной по более точным нелинейным законам измерения контролируемого параметра.

Значения коэффициентов K_1 и K_2 для грузовых вагонов-цистерн принимались в пределах: $K_1 = 0,5-0,75$; $K_2 = 0,75-1,0$.

Если после проведения очередного диагностирования имелись три значения контролируемого параметра $L_\phi(t_1), L_\phi(t_2), L_\phi(t_3)$, полученные в моменты времени t_1, t_2, t_3 , то для определения скорости ползучести a_n проводились следующие вычисления:

$$L_1 = \sum_{i=1}^3 L_\phi(t_i); \quad L_2 = \sum_{i=1}^3 L_\phi(t_i)t_i; \quad x_1 = \sum_{i=1}^3 t_i; \quad x_2 = \sum_{i=1}^3 t_i^2. \quad (20)$$

Скорость ползучести определялась по формуле:

$$a_n = \frac{100(L_1 X_1 - 3L_2)}{L_n(X_1^2 - 3X_2)K_1 K_2}, \quad (21)$$

На основании прогнозной оценки остаточного ресурса вагона и с учетом оперативных комплексных показателей и экономических показателей работы вагона за ретроспективный период времени можно сделать вывод об экономически обоснованных управляющих воздействиях, которые должны быть применены к вагону. Возможными являются следующие управляющие воздействия: пролонгация (продление) срока службы вагона, его модернизация, реконструкция, модификация и, наконец – исключение из инвентаря. Кроме того, проведение прогностических расчетов позволяет определять оптимальный дополнительно назначаемый срок службы вагона-цистерны, после истечения его нормативного срока использования.

Выводы

1. Предложено применение метода экстраполяции при прогнозировании срока службы как метода, при котором происходит выделение наилучшего описания тренда, определение прогнозных значений путем их экстраполяции. Процедура сглаживания в линейном варианте позволяет достаточно точно выявлять величину тренда и определять срок полезного использования.
2. Результаты расчетов коэффициента запаса усталостной прочности n , расчетной эквивалентной величины амплитуды динамических напряжений $\sigma_{a,3}$ исследуемых вагонов-цистерн показали, что при $n = 1,6$ подтверждается наличие у испытуемой цистерны остаточного ресурса, срок ее эксплуатации может быть продлен до 10 лет (т.к. коэффициент запаса усталостной прочности находится в пределах, допускаемый «Нормами...»), при наименьшем, полученном расчетно-экспериментальным методом $n = 2,2$, подтверждается наличие у испытуемой цистерны остаточного ресурса свыше 5 лет и срок ее эксплуатации может быть продлен до 5 лет.

Список использованных источников:

1. Вальд А. Последовательный анализ. – М.:Физмат, 1960. – 328 с.;
2. Галлагер. Методы получения матриц жесткости элементов – М.: В сб.: Ракетная техника и космонавтика. 1963, вып.6. – с. 187-189;
3. Длин А.М. Математическая статистика в технике. – М.:Советская наука. 1958 – 466 с.;
4. Дробов Г.М. и др. Экспертные оценки в научно-техническом прогнозировании. – Киев.: Наукова думка, 1974. – 159 с.;
5. Нормы для расчета на прочность и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 315 с.

Рецензент: В.К. Губенко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 29.11.2010