

УДК 629.4.077-592.117.001.4

Д.В. Федосов-Никонов, И.И. Федорак, Ю.Я. Водяников, А.Н. Стринжа

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЕДИНИЦ
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Рассмотрены критерии оценки остаточного ресурса подвижного состава железных дорог. Остаточный ресурс вагона определяется по трем критериям: достижению напряжений предела текучести, по пределу выносливости и по накопленным повреждениям при воздействии ударных нагрузок. Первый критерий применяется при низкой коррозионной стойкости материала вагона и обусловлен воздействием как атмосферных осадков, так и агрессивной средой. Вторым критерий применяется для определения долговечности конструкции и характеризуется коэффициентом запаса усталости, равным или меньшим единицы. Третий критерий используется для обоснования установленного срока службы вагона. Приведены расчетные зависимости, а также пример результатов испытаний на соударение вагона-цистерны модели 1404.

Диагностирование вагонов проводится в соответствии с «Положением о продлении сроков службы грузовых и рефрижераторных вагонов участников соглашений о совместном использовании грузовых и рефрижераторных вагонов в международном сообщении», утвержденного на заседании Совета по железнодорожному транспорту стран СНГ, Грузии, Литовской, Латвийской и Эстонской республик.

Настоящим документом устанавливается порядок продления срока службы грузовых и рефрижераторных вагонов государств - участников Соглашений о совместном использовании грузовых и рефрижераторных вагонов в международном сообщении, назначенный срок службы которых истекает или истек. Основным критерием установления возможности продления срока службы грузовых и рефрижераторных вагонов является наличие у них остаточного ресурса (или возможности его возобновления), оцениваемое путем проведения технического диагностирования. Допускается проводить продление срока службы грузовым вагонам постройки не ранее 1964 года, при этом общий срок службы вагонов с учетом продления не должен превышать полуторного назначенного срока службы, указанного в Технических условиях (далее - ТУ) завода - изготовителя на базовый вагон. В исключительных случаях при предоставлении разработчиком ТУ на КРП обоснованных материалов, общий срок службы с учетом продления может превышать полуторный назначенный срок службы, указанный в ТУ завода-изготовителя на базовый вагон, но не более удвоенного, если это предусмотрено ТУ на КРП. Отсчет нового срока службы вагона устанавливается с даты выдачи Технического решения.

© Д. В. Федосов-Никонов, И.И. Федорак, Ю.Я. Водяников, А.Н. Стринжа, 2014

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Работы проводятся организацией - исполнителем (организация исполнитель - специализированная организация или ремонтное предприятие, которое проводит техническое диагностирование, определяет и устанавливает новый срок службы вагона), имеющей Свидетельство на право проведения работ по техническому диагностированию с целью продления срока службы грузовых и рефрижераторных вагонов (далее - Свидетельство), выданное Комиссией Совета и включенной в перечень организаций, имеющих право на проведение работ по техническому диагностированию с целью продления сроков службы грузовых и рефрижераторных вагонов государств - участников Соглашений о совместном использовании грузовых и рефрижераторных вагонов в международном сообщении. Указанное Свидетельство было выдано ДП «УкрНИИВ» 27.02.2009 г.

Принятое направление на увеличение назначенного срока службы грузовых и пассажирских вагонов обуславливает необходимость проведения ряда исследований, важнейшей составной частью которых является обследование технического состояния вагонов в эксплуатации, а также обоснование возможности такого продления путем проведения ресурсных испытаний конструкции вагона.

Решение поставленной задачи требует разработки методики, которая подразумевает проведение ряда исследований, включающие сбор и первичную обработку информации о техническом состоянии вагонов, обработку и анализ полученной информации, определение показателей надежности, исследование зависимости коррозионной стойкости материала от времени эксплуатации, оценку остаточного ресурса конструкции вагона.

Критерием оценки остаточного ресурса вагона является исчерпание конструкцией несущей способности. Исчерпание несущей способности характеризуется тремя показателями:

- достижением в ответственных узлах вагона напряжений предела текучести при действии статической нагрузки с учетом коэффициента динамики, такие напряжения возникают при снижении временного сопротивления поперечного сечения элемента конструкции вследствие высокой интенсивности коррозии материала;
- пределом выносливости, характеризуемым коэффициентом запаса, равным или меньше единицы;
- числом циклов продольных ударных нагрузок (соударений), характеризуемых числом накопленных повреждений.

Выбор оценочного показателя для определения остаточного ресурса производится исходя из результатов диагностирования вагона.

Методика определения коррозионной стойкости материала элементов вагона от воздействия окружающей среды и атмосферы.

Целью исследования является оценка коррозионной стойкости материала элементов вагона к воздействию атмосферы и агрессивной среды, получение функциональной зависимости утонения поперечного сечения конструктивных элементов от времени эксплуатации (срока службы).

Величина коррозии определяется как разность между фактическими (замеренными) толщинами и номинальными, определяемыми по чертежам.

Данные замеров толщин (утонения элементов) группируются по сроку службы вагонов с интервалом времени наработки Δt и подвергаются статистической обработке, состоящей в определении [1]:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

– математического ожидания

$$\bar{m}_{\Delta_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} h_{ij}}{n_i}, \quad (1)$$

где h_{ij} – значение j -ой случайной величины толщины стенки в i -ом интервале;

n_i – количество замеров в i -ом интервале;

m_{Δ_i} – математическое ожидание случайной величины в i -ом интервале

– среднеквадратического отклонения

$$S_{\Delta_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (h_{ij} - m_{\Delta_i})^2}{n_i - 1}}. \quad (2)$$

Случайные величины в каждом временном срезе группируются на классы (интервалы) по правилу Штюргеса [2]:

$$k \approx 1 + \lg(n_{ij}), \quad (3)$$

где k – число классов.

Проверка нулевой гипотезы о равенстве (однородности) средних оценивается с помощью критерия Стьюдена.

Оценкой σ^2 служит выборочная полная (общая) дисперсия S^2 , а интервальной оценкой математического ожидания a – выборочное общее среднее \bar{m}_{Δ_i} . Доверительные интервалы для a и σ^2 , для $p = \sum_{j=1}^{n_i} n_{ij} - 1$ степеней свободы определяются из выражений [2]:

$$\bar{m}_{\Delta_i} - \frac{S_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n_i} n_{ij}}} t_{\alpha, p} < a < \bar{m}_{\Delta_i} + \frac{S_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n_i} n_{ij}}} t_{\alpha, p}, \quad (4)$$

$$\frac{S_i^2 \left(\sum_{j=1}^{n_i} n_{ij} - 1 \right)}{\chi_{P_1}^2} < \sigma^2 < \frac{S_i^2 \left(\sum_{j=1}^{n_i} n_{ij} - 1 \right)}{\chi_{P_2}^2}. \quad (5)$$

Значения $t_{\alpha, p}$, $\chi_{P_1}^2$ и $\chi_{P_2}^2$ определяются по таблицам в зависимости от числа степеней свободы и выборочного уровня доверительной вероятности ($P=0,95$).

По данным замеров толщины элемента для каждого временного среза строятся кумулятивная линия, гистограмма и полигон распределения, по которым производится выбор теоретического закона распределения.

Для нормального распределения плотность вероятности случайной величины определяется формулой [3]:

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}, \quad (6)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение теоретического распределения;

μ – среднее значение (математическое ожидание) теоретического распределения.

Проверка гипотезы нормального распределения для класса выборок выполняется с использованием критерия Пирсона.

В случае проявления функциональной зависимости величины утонения от времени эксплуатации, производится выравнивание методом наименьших квадратов математических ожиданий отклонений толщин элементов от номинальных значений. В качестве аппроксимирующей функции принят полином относительно независимой переменной t – времени наработки. В качестве полинома выбирается линейный, квадратичный и кубический

$$\begin{aligned} f_1(t) &= a + bt \\ f_2(t) &= a + bt + ct^2 \\ f_3(t) &= a + bt + ct^2 + dt^3 \end{aligned} \quad (7)$$

где a, b, c, d – неизвестные коэффициенты.

Выбор полинома производится исходя из наименьшей величины остаточной дисперсии, определяемой по формуле [3]:

$$\bar{S}_{ост}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - m_i^*)^2}{N - 1 - p} \quad (8)$$

где m_i – математическое ожидание случайной величины в i -ом интервале;

m_i^* – аналитическое значение этой же величины;

N – количество интервалов времени наработки;

p – число степеней свободы, а также максимального значения критерия

Фишера:

$$F = \frac{S_{\Delta}^2}{S_{\bar{m}0}^2} \quad (9)$$

где S_{Δ}^2 – дисперсия случайной величины при уровне значимости 5%.

Коэффициенты a, b, c, d определяются путем решения системы алгебраических уравнений, которые имеют вид:

– для полинома первой степени

$$\begin{cases} an + b \sum_i x_i = \sum_i y_i \\ a \sum_i x_i + b \sum_i x_i^2 = \sum_i x_i y_i \end{cases} \quad (10)$$

– для полинома второй степени

$$\begin{cases} an + b \sum_i x_i + c \sum_i x_i^2 = \sum_i y_i^2 \\ a \sum_i x_i + b \sum_i x_i^2 + c \sum_i x_i^3 = \sum_i x_i y_i \\ a \sum_i x_i^2 + b \sum_i x_i^3 + c \sum_i x_i^4 = \sum_i x_i^2 y_i \end{cases} \quad (11)$$

– для полинома третьей степени

$$\begin{cases} an + b \sum_i x_i + c \sum_i x_i^2 + d \sum_i x_i^3 = \sum_i y_i \\ a \sum_i x_i + b \sum_i x_i^2 + c \sum_i x_i^3 + d \sum_i x_i^4 = \sum_i x_i y_i \\ a \sum_i x_i^2 + b \sum_i x_i^3 + c \sum_i x_i^4 + d \sum_i x_i^5 = \sum_i x_i^2 y_i \\ a \sum_i x_i^3 + b \sum_i x_i^4 + c \sum_i x_i^5 + d \sum_i x_i^6 = \sum_i x_i^3 y_i \end{cases} \quad (12)$$

Как показывают результаты диагностирования, интенсивность коррозии металла при воздействии природных факторов имеет линейный характер, а агрессивных сред – нелинейный. По выбранному полиному зависимости утонения элементов конструкции от времени эксплуатации определяется остаточный ресурс, при котором временное сопротивление поперечного сечения станет равным минимально допустимому по условию достижения предела текучести:

$$\frac{M}{W(h_{kp})} = \sigma_m, \quad (13)$$

где l – изгибающий момент от статической нагрузки с учетом коэффициента динамики;

W – момент сопротивления поперечного сечения элемента или узла вагона.

$h_{\partial 0}$ – критическое значение толщины стенок поперечного сечения элемента, определяемое по формуле:

$$h_{kp} = h_{ном} - \Delta h(T_p), \quad (14)$$

где h_{nom} – номинальная толщина стенок элемента или узла вагона;

$\Delta h(T_p)$ – утонение толщины стенок элемента или узла вагона за время T_p ;

T_p – остаточный ресурс, время за которое утонение стенок станет критическим.

Так как временное сопротивление пропорционально площади поперечного сечения, то минимальная площадь поперечного сечения определится по формуле:

$$F_{kp} = F_{ном} \cdot \frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_m}, \quad (15)$$

где F_{nom} – номинальная площадь поперечного сечения элемента, соответствующая конструкторской документации;

σ_{ϕ} – фактические напряжения в элементе конструкции;

σ_m – предел текучести материала.

Расчетные соотношения для определения остаточного ресурса несущих элементов вагона по пределу выносливости.

Исходным соотношением для определения срока службы несущих элементов конструкции вагона является выражение [4]:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}^n}{\sigma_s}, \quad (16)$$

где n – коэффициент запаса;

$\sigma_{a,N}^u$ – расчетный предел выносливости при симметричном цикле напряжений, приведенной к базе испытаний $N = 10^7$, полученной на основе проведения стендовых вибрационных испытаний несущих элементов;

σ_s – эквивалентное расчетное эксплуатационное напряжение, приведенное к напряжению симметричного цикла и базе испытаний $N = 10^7$;

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

Предел выносливости натурной детали [4]:

$$\sigma_{a,N}^u = \bar{\sigma}_{a,N}^u (1 - z_p v_{\sigma_{a,N}}), \quad (17)$$

где $\bar{\sigma}_{a,N}^u$ – медианное значение предела выносливости детали;

z_p – квантиль распределения при вероятности $P = 0,95$;

$v_{\sigma_{a,N}}$ – коэффициент вариации предела выносливости детали, принимаемое для сталей равным 0,07.

При определении предела выносливости натуральных деталей путем проведения вибрационных испытаний используется формула [4]:

$$\bar{\sigma}_{a,N}^u = \sqrt[m]{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^k \sigma_{ui}^m n_{ui}}, \quad (18)$$

где $\sigma_{a,N}^u$ – предел выносливости натуральных деталей, определяемый в результате стендовых вибрационных испытаний;

$m = 4$ – рекомендуемое значение показателя степени кривой усталости элементов вагона;

σ_{ui} – величины напряжений, полученные в процессе вибрационных испытаний и приведенные к эквивалентным симметричным;

n_{ui} – количество циклов нагружения, реализованное на i -ом интервале;

k – количество интервалов нагружения.

Согласно нормативной документации влияние асимметрии циклов динамических напряжений на накопление усталостных повреждений в конструкции не учитывается, поэтому принимается

$$\sigma_{ui} = \sigma_{ia_i}$$

Вместе с тем, для проведения проверочного расчета коэффициента запаса по сопротивлению усталости и оценки остаточного ресурса, влияние асимметрии циклов нагружения учитывается путем его приведения к амплитудам эквивалентных симметричных циклов с использованием идеализации Гудмана диаграммы предельных амплитуд циклов и приведения их к эквивалентной амплитуде симметричного предельного цикла по подобию амплитуд [5]:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{ia_i}}{(1 - \sigma_{im_i} / \sigma_s)}, \quad (19)$$

где σ_{ia_i} – амплитуды динамических напряжений, полученные в процессе испытаний;

σ_{im_i} – амплитуды постоянных составляющих напряжений, реализованных в процессе испытаний;

σ_s – предел прочности элемента равны пределу прочности материала.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Расчетные величины амплитуд динамических напряжений определяются по формуле [4]:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{T_p f_s d_s}{N_0}}, \quad (20)$$

здесь T_p – суммарное действие эксплуатационных нагрузок;

f_s – центральная (эффективная) частота процесса изменения динамических напряжений;

d_s – удельная наработка несущей конструкции (определяет различие условий эксплуатации однотипных несущих элементов).

Эффективная частота изменения динамических напряжений определяется по формуле [4]:

$$f_s = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_{cm}}}, \quad (21)$$

где $a=1,1$ и $a=1,6$ соответственно для кузова пассажирского вагона и обрессоренных частей тележки;

$g = 9,81$ – ускорение свободного падения;

f_{cm} – статистический прогиб вагона.

Величина T_p согласно действующим нормативам вычисляется по формуле [4]:

$$T_p = 3600 \cdot T_e \cdot \frac{L_a}{V}, \quad (22)$$

здесь T_K – проектный (календарный) срок службы вагона;

L_e – среднегодовой пробег пассажирского вагона;

V – средняя техническая скорость движения вагона.

Оценка ресурса элемента по критерию усталостной долговечности при многоцикловом динамическом нагружении производится по формуле [4]:

$$T_k = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right) \cdot N_0}{B f_s d_s}, \quad (23)$$

где удельная наработка d_s определяется в соответствии с формулой [4]:

$$d_s = \sum_{j=1}^n K_{y_{ij}} \sum_{v_i}^{k_{v_i}} P_{v_i} \sum_{\sigma_{si}}^{k_{\sigma_{si}}} \sigma_{si}^m P_{\sigma_{si}}, \quad (24)$$

здесь $K_{y_{ij}}$ – средняя доля протяженности прямых ($i=1$), кривых участков пути ($i=2$) и стрелочных переводов ($i=3$) в общей длине железнодорожных линий;

P_{v_i} – доля времени, приходящаяся на эксплуатацию в i -ом интервале скоростей;

σ_{si} – уровень (разряд) амплитуды динамических напряжений;

$P_{\sigma_{si}}$ – частота (вероятность) появления амплитуд напряжений с уровнем σ_{si} в i -ом интервале скоростей движения вагона.

Долговечность конструкции вагона определяется по формуле (21), в которой коэффициент запаса принимается равным единице ($[n]=1$), а остаточный ресурс – как разность долговечности и назначенного технической документацией срока службы.

Оценка остаточного ресурса при испытаниях на соударение

При испытаниях на соударение в качестве исходного (эксплуатационного) спектра нагружения вагона принимается обобщенное распределение повторяемости продольных сил сжатия и растяжения, установленное [4]. Обобщенное распределение принимается в предположении об одинаковом повреждающем воздействии растягивающих и сжимающих продольных сил в каждом интервале их распределения.

Величина эквивалентного усилия соударения $D_{y\dot{\sigma}}$, приведенная к расчетной базе испытаний, определяется по формуле [6]:

$$P_{\text{экв}} = \frac{N_{\text{общ}}^{\text{расч}}}{N_{\dot{\sigma}}} \cdot \sum_{i=1}^n F_i^m \cdot p_i, \quad (25)$$

где $N_{\text{общ}}^{\text{расч}}$ - общее расчетное количество циклов действия импульсов продольных ударных сил;

F_i и p_i - величины динамических продольных сил и их частоты, определяемые по табл. 5.3 и 5.4 [6];

m - показатель степени кривой усталости, $m = 4$.

Общее расчетное количества циклов действия (импульсов) продольных сил в течение рассматриваемого расчетного периода эксплуатации вагона определяется с учетом общесетового коэффициента пробега по формуле [6]:

$$N_{\text{общ}}^{\text{расч}} = N_{\text{общ}}^{\text{y}\dot{\sigma}} \cdot T_{\text{расч}} \cdot k_{\text{реж}} \cdot k_{\text{y}\dot{\sigma}}, \quad (26)$$

где $N_{\text{общ}}^{\text{y}\dot{\sigma}}$ - общее количество циклов действия ударных продольных сил за один год $N_{\text{общ}}^{\text{y}\dot{\sigma}} = 20200$ [6];

$T_{\text{расч}}$ - расчетный период эксплуатации;

$k_{\text{реж}}$ - коэффициент, учитывающий влияние порожнего пробега, $k_{\text{реж}} = 1$ [6];

$k_{\text{y}\dot{\sigma}}$ - коэффициент, учитывающий несимметричность нагружения конструкции, $k_{\text{y}\dot{\sigma}} = 0,6$ [6].

В качестве примера рассмотрим результаты оценки остаточного ресурса вагона цистерны (далее цистерны) модели 15-1404 [7]. Выбор режима нагружения осуществляется с учетом следующих данных, характеризующих условия эксплуатации:

- назначенный срок службы цистерны до списания 20 лет;
- коэффициент порожнего пробега $K=0,45$;
- ориентировочный среднесуточный пробег составляет 297 км/сутки.

Общее расчетное количество циклов нагружения цистерны за срок службы 1 год составит:

$$N_{\text{общ}}^{\text{расч}} = N_{\text{общ}}^{\text{y}\dot{\sigma}} \cdot T_{\text{расч}} \cdot k_{\text{реж}} \cdot k_{\text{y}\dot{\sigma}} = 20200 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,6 = 12120 \text{ циклов}. \quad (27)$$

По данным табл. 5.3 [6] и $P_{\text{экв}} = 2,5$ МН базовое число циклов составит:

$$N_{\dot{\sigma}} = \frac{12200}{2,5^4} \cdot (0,25^4 \cdot 0,12575 + 0,6^4 \cdot 0,28520 + 1^4 \cdot 0,28025 + 1,4^4 \cdot 0,0029 + 1,8^4 \cdot 0,07724 + 2,2^4 \cdot 0,03592 + 2,6^4 \cdot 0,00978 + 3^4 \cdot 0,0029 + 3,4^4 \cdot 0,0003 + 3,8^4 \cdot 0,00007) \cong 1118 \quad (28)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Учитывая, что исследуемый вагон не проходит сортировку на горках, экспертно уменьшаем число эквивалентных сил умножением на коэффициент, равный 0,5, тогда расчетное число циклов составит:

$$n_p = 1118 \cdot 0,5 = 559. \quad (29)$$

С учетом повторных ударов число соударений определится по формуле (письмо ВНИИЖТ от 09.11.89 № В-29/95), при этом усилие второго удара принимается равным 90 % усилия первого удара, а в качестве эквивалентной силы принимается величина 2,5 МН:

$$n_p' = \frac{P_{экв}^4 \cdot n_p}{P_{экв}^4 + 0,9^4 \cdot P_{экв}^4} = \frac{2,5^4 \cdot 559}{2,5^4 \cdot (1 + 0,9^4)} = 337. \quad (30)$$

Расчетная сила накопленных повреждений D_p на 1 год составит:

$$D_p = n_p' \cdot P_{экв}^4 = 337 \cdot 2,5^4 = 13185 \text{ МН}^4. \quad (31)$$

Испытания цистерны на соударение проводились путем накатывания вагона-бойка на цистерну, стоящую в упоре. Гистограмма распределения сил соударения представлена на рис. 1, а сумма накопленных повреждений – в табл.

Время наработки цистерны на ударные воздействия составило:

$$T_p = 82727,33 / 13185 = 6,27 \text{ года},$$

что позволяет продлить срок службы цистерны на 5 лет.

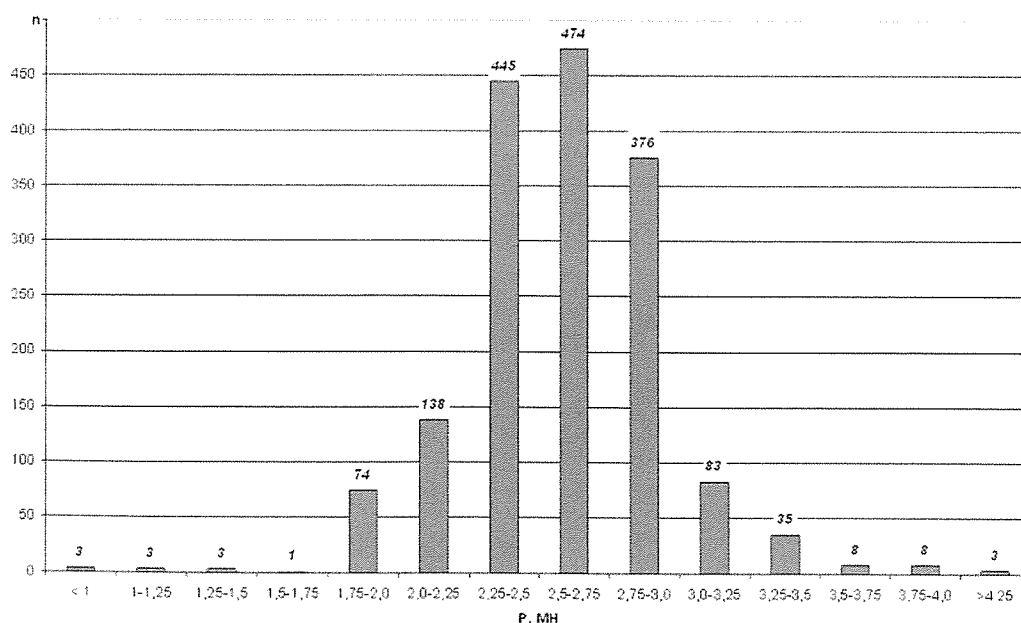


Рис. 1. Гистограмма распределения продольных сил при соударении

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблица 1. Полигон сил соударения, полученных в результате испытаний цистерны на соударение

Интервал сил соударения	Середина интервала	Частота	Накопленные повреждения
1	2	3	4
< 1	1.0	3	3.0
1-1,25	1.3	3	4.81
1,25-1,5	1.38	3	10.72
1,5-1,75	1.63	1	6.97
1,75-2,0	1.88	74	914.61
2,0-2,25	2.13	138	2813.94
2,25-2,5	2.38	445	14158.41
2,5-2,75	2.63	474	22505.86
2,75-3,0	2.88	376	25688.53
3,0-3,25	3.13	83	7915.5
3,25-3,5	3.38	35	4541.12
3,5-3,75	3.63	8	1381.41
3,75-4,0	3.88	8	1803.75
>4.25	4.25	3	978.76
Итого			82727,39

Выводы

Изложенная методика расчетных исследований позволяет:

- осуществить дифференцированную оценку остаточного ресурса каждого вагона с использованием результатов ресурсных испытаний и фактических геометрических параметров несущих элементов;
- получить прогнозируемую предельную оценку остаточного ресурса по группе вагонов исходя из фактического ресурса вагона-аналога и аналитической зависимости коррозионного износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учебное пособие для вузов / Е. Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.
2. Гутер Р.С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Р. С. Гутер, Б. В. Овчинский. – М.: Наука, 1970. – 255 с.
3. Степанов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник / М.Н. Степанов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
5. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В. П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
6. РД 24.050.37-95 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М.: ГосНИИВ, 1995. – 101 с.
7. Исследования, разработка и обоснование рекомендаций по увеличению назначенного полного срока службы вагонов цистерн моделей 15-1406 15-1404, 1408 эксплуатационного парка ПО «Ангарскнефтеоргсинтез: Отчет о НИР (этап 2) / ГП «УкрНИИВ»; рук. Лагута В. С., исп. Донченко А. В., Водяников Ю. Я. – Кременчуг, 1992. – 220 с. – № ГР 01910039382. – Инв. № 638.