

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ ім. Г. С. ПИСАРЕНКА

*Міжнародний науково-технічний збірник*

**НАДІЙНІСТЬ  
І ДОВГОВІЧНІСТЬ  
МАШИН І СПОРУД**

Заснований в 1982 р. Видання відновлене в 2004 р.

Випуск 27

Київ – 2006

**Засновники:** Національна академія наук України

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України  
Асоціація “Надійність машин і споруд”

**Видавник:** Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України

**Редакційна колегія:**

В. Т. Трощенко (головний редактор), В. А. Баженов, М. І. Бобир,  
Л. В. Кравчук, В. В. Матвеєв, В. І. Махненко, М. В. Новіков,  
Л. С. Новогрудський, І. В. Оріняк, С. В. Романов, М. П. Рудницький  
(відповідальний секретар), В. П. Стрельников, В. В. Харченко (заст.  
головного редактора), М. Г. Чаусов, П. В. Ясній

*Адреса редакції: 01014, Київ-14, вул. Тимірязєвська, 2*

*Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка  
Національної академії наук України*

*Телефон: (044) 281 63 34*

*Факс: (044) 286 16 84*

*E-mail: <nadiynist@ipp.kiev.ua>*

Реєстраційне свідоцтво серія КВ № 8773 від 24.05.2004 р.

Затверджено до друку вченого радою

Інституту проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України

Підп. до друку 30.06.06. Формат 70×108/16. Папір офс. Різogr. друк. Ум. друк. арк. 30,1.

Обл.-вид. арк. 17,63. Тираж 200 прим. Зам. № 26. Ціна договірна

Дільниця оперативного друку ПМіцн. ім. Г. С. Писаренка НАН України

01014, Київ-14, вул. Тимірязєвська, 2

© Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, 2006

# Содержание

## Прочность материалов и конструкций

Опанасович В. К., Слободян М. С. Граничний стан пластиини з круговим отвором та радіальною тріщиною з урахуванням контакту її берегів при згині та ростязі .....	9
Павлов В.Ф., <b>Бордаков С.А.</b> , Кирпичев В.А., Вакулюк В.С., Каранаева О.В., Николаев А.Н., Яковенко Н.И. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости в условиях концентрации напряжений при повышенных температурах.....	16
Павлов В.Ф., <b>Бордаков С.А.</b> , Сургутанова Ю.Н., Хибник Т.А., Денискина Е.А., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости по трещинообразованию с использованием принципов механики остаточных напряжений .....	22
Піняк І.С. Оцінка стану конструкційного елемента в умовах пружно-пластичного деформування .....	28
Писаренко Г.Г., Васинюк И.М., Войналович А.В., Голованев Ю.М. Измерительный комплекс для локализации приповерхностных дефектов в металлоконструкциях .....	34
Придорожный Р.П., Шереметьев А.В., Якушев Ю.В. Возможность повышения усталостной прочности и ресурса охлаждаемых рабочих лопаток турбины расчетным методом .....	38
Семенов Я.С., Лебедев М.П. Модельная оптимизация параметров микроструктуры стали трубопроводов .....	45
Скальський В.Р., Коваль П.М., Лотоцький Ю.Л., Сулим Р.І. Акустична емісія утворення та розвитку мікро- та макротріщин у залізобетонній балці .....	54
Скальський В.Р., Сергієнко О.М., Плахтій Р.М., Сулим Р.І. Оцінка сигналів акустичної емісії викликаних утворенням дископодібної тріщини у в'язкопружному тілі .....	60
Скрипченко В.И., Земцов М.П. Прочность и деформативность мультифиламентных систем при динамическом нагружении .....	67
Сосновский Л.А., Костюченко А.А., Воробьев В.В. Коррозионно-механическая усталость: критерий предельного состояния материалов и его апробация .....	74
Стрижало В.А. Об особенностях влияния криогенных температур на закономерности деформирования и прочность конструкционных сплавов .....	81
Ткачук Д.В., Богданович П.Н., Никитюк Ю.В. Тепловое состояние и разрушение поверхностных слоев неорганических материалов при трении и абразивной обработке .....	100
Трощенко В.Т., Ющенко К.А., Грязнов Б.А., Савченко В.С., Налимов Ю.С., Червякова Л.В. Циклическая прочность рабочих лопаток 1 ступени ТВД из сплава ЭИ893, восстановленных электросваркой .....	107
Хамаза Л.А. Прогнозирование долговечности конструктивных элементов при двухчастотном нагружении с учетом асимметрии и концентрации напряжений .....	113
Харченко В.В., Кондряков Е.А., Жмака В.Н., Бабуцкий А.А. Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности .....	121

<i>Чаусов Н.Г., Пилипенко А.П.</i> Влияние динамических перегрузок на кинетику разрушения конструкционных материалов .....	131
<i>Чаусов М.Г., Ясній П.В., Гладьо В.Б., Недосека С.А., Пилипенко А.П.</i> Металофізичні аспекти руйнування реакторної сталі з врахуванням динамічних перевантажень .....	138
<i>Чернобрывко М.В.</i> Нестационарное термоупругопластическое деформирование многослойной составной оболочки .....	145
<i>Чиликов С.М., Кирпичников В.Г., Кравченко С.А.</i> Универсальные испытательные машины нового поколения МИУ-К .....	153
<i>Шестаков С.И., Кущ В.И.</i> Критерий предельного состояния структурно-неоднородных материалов, работающих в условиях циклического нагружения и объемного напряженного состояния .....	160
<i>Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Мележик И.И.</i> Методика оценки трещиностойкости неоднородных стареющих элементов конструкций .....	167
<i>Шульженко Н.Г., Зайцев Б.Ф., Асаенок А.В.</i> Оценка прочности сварной диафрагмы паровой турбины в трехмерной постановке .....	174
<i>Ющенко К.А., Грязнов Б.А., Савченко В.С., Налимов Ю.С., Червякова Л.В., Гонкало А.П., Наконечный А.А., Звегинцева А.В., Рабинович А.А.</i> Ремонт сваркой плавлением рабочих лопаток ГТД из никелевого сплава ЭП359ЛМ .....	181
<i>Яковleva T.YU.</i> Модель эволюции состояния металлического материала в условиях циклического нагружения .....	187
<i>Кожар С., Варфоломеев И.</i> Проверка решения предельного пластического нагружения для цилиндров и пластин с поверхностной трещиной (англ. яз) .....	199

### Ресурс машин и конструкций

<i>Бараненко В.И., Олейник С.Г., Кумов А.В., Беляков О.А., Корниенко К.А., Березанин А.А.</i> Опыт разработки нормативной документации по управлению сроком эксплуатации трубопроводов АЭС, подверженных эрозионно-коррозионному износу .....	209
<i>Богомаз Г.И., Горобец В.Л., Ключко В.А.</i> Методы оценки ресурса машин и испытательное оборудование для стендовых испытаний .....	214
<i>Григорьев В.А., Юрченко С.П., Уланов В.В., Шубин А.А., Пиминов В.А., Трегубов И.О., Портнов Б.Б., Четвериков А.Е., Бергункер В.Д.</i> Метод обоснования возможности уменьшения давления и увеличения периода гидроиспытаний первого контура для энергоблоков АЭС с ВВЭР .....	224
<i>Деркач Б.А., Бойко А.Ф.</i> Выбор вида и режима испытаний при определении остаточного ресурса подвижного состава .....	232
<i>Дмитриченко С.С., Русанов О.А.</i> Опыт создания сварных конструкций мобильных машин с требуемыми показателями ресурса и металлоёмкости .....	239
<i>Европин С.В., Сизарев В.Д., Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я.</i> Вибрационный мониторинг и диагностика подвижного отражателя для исследовательского реактора ИБР-2 .....	253

Балтийский испытательный центр, Рига, Латвия

## ВЫБОР ВИДА И РЕЖИМА ИСПЫТАНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*Выполнена оценка остаточного срока службы подвижного состава в соответствии с выбранным числом испытательных образцов и вероятностью отказов.*

**Ключевые слова:** вероятность отказов, остаточный срок службы, испытания, подвижной состав.

В создавшейся экономической ситуации широко ведутся работы по продлению срока службы подвижного состава. Так как речь идет о подвижном составе и составляющих его частях, срок службы которых истек, то имеется информация об отказах в эксплуатации, их характере и количестве. Зная характер и количество отказов в эксплуатации можно определить режимы нагружения, приводящие к возникновению основной массы отказов, установить виды, схемы и режимы испытаний, при которых возникают аналогичные повреждения, оценить остаточный ресурс. Решение высказанных предположений проиллюстрируем на примере продления срока службы для рам моторных тележек электропоездов, эксплуатирующихся на Латвийской железной дороге.

В настоящее время продление срока службы производится для вагонов, созданных в 70 - 80-х годах. В те годы оценку сопротивления усталости деталей ходовых частей проводили по формуле [1]

$$\frac{[\sigma_{-1k}]}{\sigma_{np}} = [n], \quad (1)$$

где  $[\sigma_{-1k}]$  – минимальный предел выносливости детали, соответствующий достоверности 95%;  $\sigma_{np}$  – приведенное напряжение установившегося режима, эквивалентного эксплуатационному по повреждающему действию,

$$\sigma_{np} = 1,4 \sqrt[m]{\frac{T\tau}{N_0} f_0 \Gamma(\frac{m+2}{2}) \sum_{v=0}^{v=v_k} \left( \frac{S_{v_i}}{\varphi} \right)^m p_{v_i}}, \quad (2)$$

$T$  – расчетный срок службы в годах, для деталей тележки электропоезда 28 лет;  $\tau$  – время эксплуатации за год в секундах. Оно определяется как отношение среднегодового пробега  $L$  к средней скорости движения поезда в эксплуатации  $V_{cp}$ . При  $L = 150000$  км и  $V_{cp} = 15.5$  м/с,  $\tau = 9677420$  сек;  $m$  – показатель степени кривой усталости;  $N_0$  – базовое число циклов, равное 10000000;  $f_0$  – эффективная частота изменения динамических нагрузок в эксплуатации;  $p_{v_i}$  – доля времени эксплуатации со скоростью  $v_i$ ;  $S_{v_i}$  – среднеквадратическое отклонение динамических нагрузок;  $\Gamma(\dots)$  – гамма функция;  $\varphi$  – коэффициент перехода от асимметричного цикла нагружения к симметричному;  $[n] = 2$  – допускаемый коэффициент запаса.

Данные условий эксплуатации электропоездов для Латвийской железной дороги показаны на рис. 1 - 7.



Рис. 1. Среднегодовые пробеги моторных тележек электропоездов.

Как следует из приведенных данных, средние значения и разброс среднегодовых пробегов электропоездов за все годы практически не изменились, что свидетельствует о стабильности условий эксплуатации. Средние значения пробегов моторных тележек составляют 101350 км (по «Нормам....» – 150000 км).

Скорости движения электропоездов зависят от длины перегонов, которые поезда проходят в процессе эксплуатации. На рис. 2 приведена гистограмма распределения расстояний между остановками, построенная по расписанию движения электропоездов на Латвийской железной дороге в 2002 г.

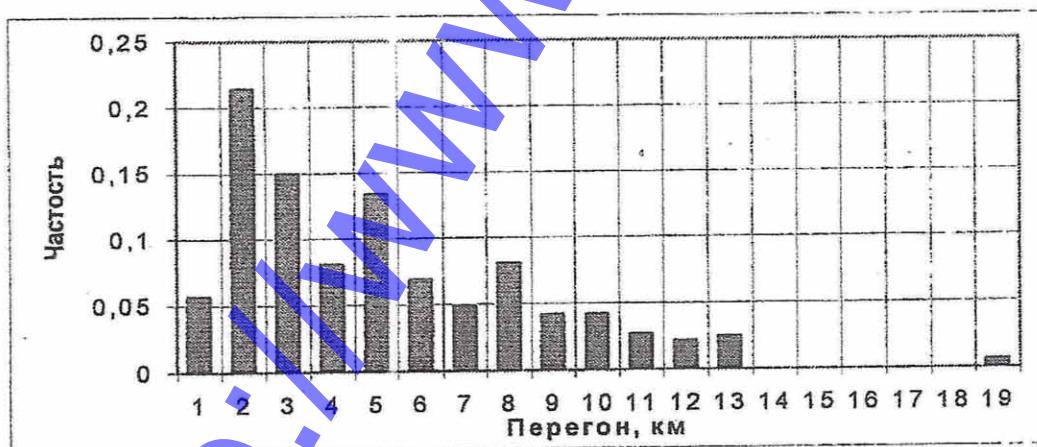


Рис. 2. Гистограмма распределения длин перегонов электропоездов.

Средняя длина перегона по данным эксплуатации электропоездов на Латвийской железной дороге равна 2,8 км, а максимальные скорости движения не превышают 100 км/ч, по «Нормам....» – 130 км/ч.

На рис. 3 приведены распределения скоростей движения электропоездов для перегонов различной длины на Латвийской железной дороге и распределение скоростей движения, заложенное в «Нормах....».

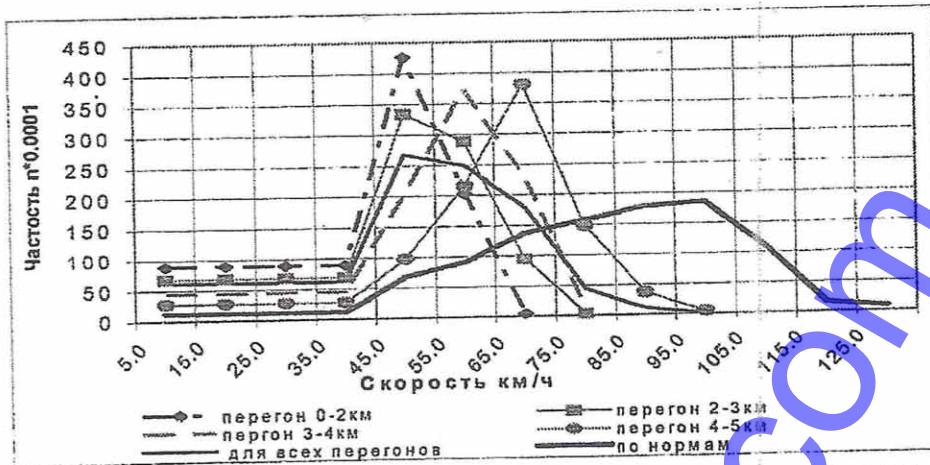


Рис. 3. Распределение скоростей движения электропоездов на Латвийской ж. д. и по Нормам.

На рис. 4 - 7 приведены диаграммы изменения основных динамических нагрузок, действующих на раму моторной тележки в эксплуатации: вертикальной от колебаний кузова, поперечной рамной, нагрузки от колебаний тягового двигателя и от тягового редуктора, действие которых приводит к усталостным повреждениям.

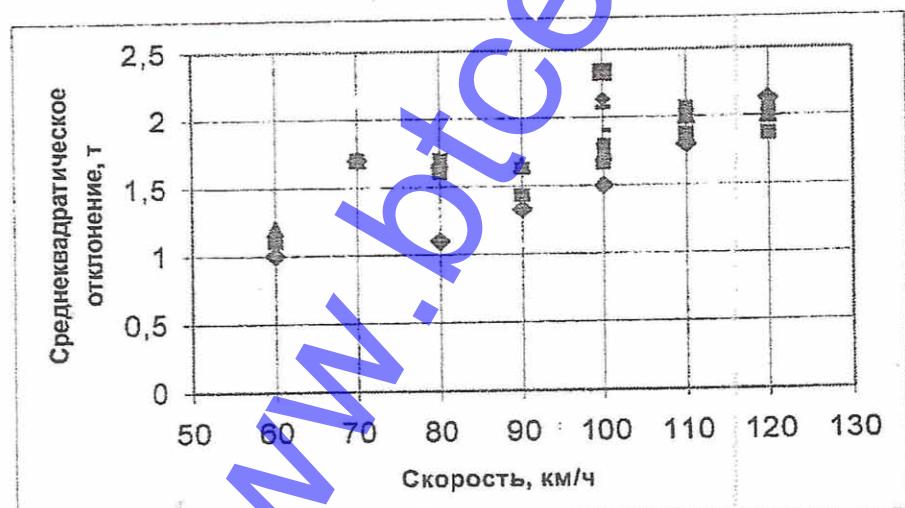


Рис. 4. Среднеквадратическое отклонение вертикальной динамической нагрузки (участок Рига - Дубулты).

Сравнивая комплекс факторов, действующих в эксплуатации, с заложенными в Нормах при проектировании, можно прийти к выводу, что накопленное рамой повреждение за годы эксплуатации в условиях Латвийской железной дороги ниже предельного и имеются предпосылки для продления срока службы.

По приведенной выше формуле (2) можно количественно оценить возможное увеличение срока службы. Обозначив через  $\nu$  отношение срока службы  $T_{\text{л}}$  в условиях Латвийской железной дороги к сроку службы  $T_H$ , рассчитанному по условиям, заложенным в Нормах, получим:

$$\nu = \frac{\sigma_{-1, \text{л}}^m T_{\text{л}} \sum_{v=0}^{v=\nu_k} S_{v, \text{л}}^m p_{v, \text{л}}}{\sigma_{-1, H}^m T_H \sum_{v=0}^{v=\nu_k} S_{v, H}^m p_{v, H}}. \quad (3)$$

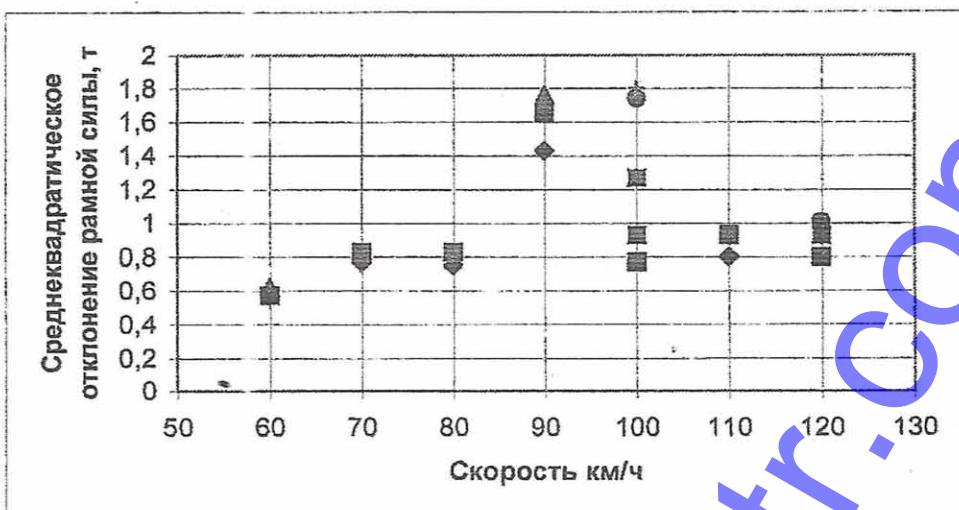


Рис. 5. Среднеквадратическое отклонение поперечной рамной силы (участок Рига - Дубулты).

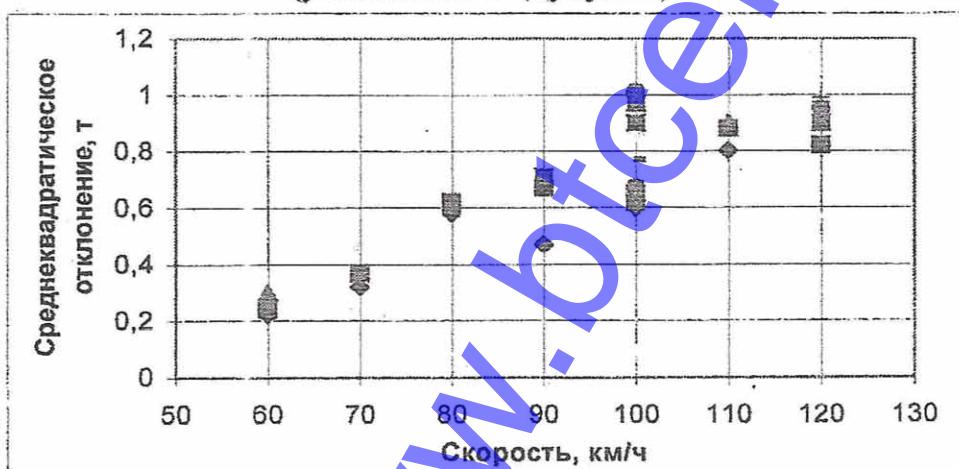


Рис. 6. Среднеквадратическое отклонение инерционной нагрузки на тяговый двигатель (участок Рига-Дубулты).

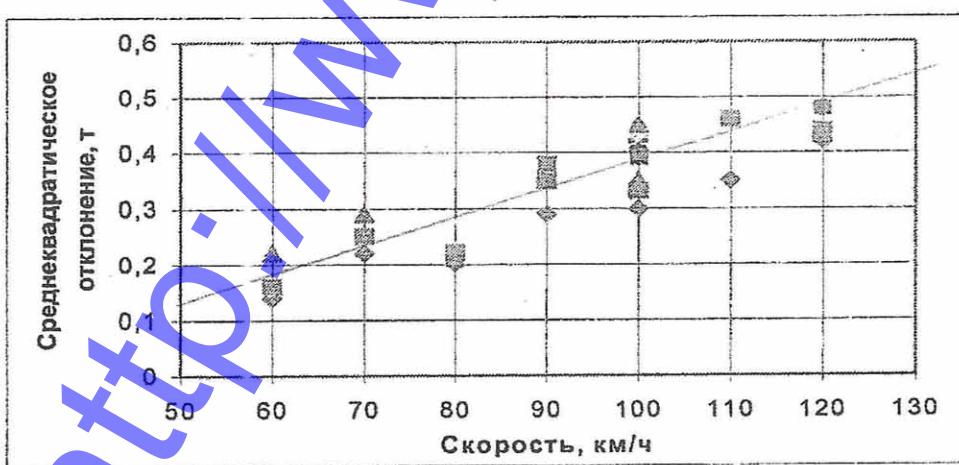


Рис. 7. Среднеквадратическое отклонение нагрузки на кронштейн редуктора (участок Рига-Дубулты).

Принимая, что за время эксплуатации динамические нагрузки могут увеличиться на 20% из-за ухудшения состояния пути и параметров подвешивания, а предел выносливости деталей снизится на 10% [2] из-за действия напряжений выше допускаемого предела, получим  $\nu \approx 2.5$ . То есть срок службы рамы тележки может быть увеличен в 2.5 раза в условиях эксплуатации Латвийской железной дороги. Для уточнения остаточного ресурса необходимо провести стендовые испытания.

Испытания целесообразно проводить отдельно для нагрузок, действующих в горизонтальной и вертикальной плоскостях [3], остаточный ресурс определяем по меньшему значению.

Объем выборки для испытаний соответствует минимуму функции затрат:

$$B = k * C_1 + N * C_2 * [R_1 - R_0], \quad (4)$$

где  $B$  – суммарные затраты на испытания и возможные потери в эксплуатации в связи с ограниченным объемом испытаний и неточностью оценки определяемых характеристик;  $k$  – количество образцов;  $C_1$  – стоимость испытаний одного образца;  $N$  – общее количество изделий;  $C_2$  – общие затраты, связанные с отказом детали в эксплуатации;  $R_1$  – математическое ожидание риска, соответствующего количеству испытанных образцов;  $R_0$  – допустимый риск.

Доля неправильно оцененных изделий из-за ограниченного объема выборки, стоящая в квадратных скобках, может быть определена по зависимостям, приведенным в [4] или по приближенной формуле [5]

$$[R_1 - R_0] = \frac{k^k}{(k+1)^{k+1}}. \quad (5)$$

Количество объектов для испытаний может быть уточнено после обследования их состояния и условий эксплуатации. Возможно также сокращение объемов испытаний за счет учета симметрии конструкции [6].

Режим нагружения образцов, изъятых из эксплуатации, при стендовых испытаниях выбираем как для новых образцов. Таким образом, если образец выдерживает десять миллионов циклов нагружений с амплитудой  $P_a$  на стенде, то можно утверждать с вероятностью не менее 95%, что в эксплуатации за весь срок службы от действия этой нагрузки отказов не будет:

$$P_a = P_{pp} * [n], \quad (6)$$

или с учетом приведенных выше данных

$$P_a \approx 6.27 \sqrt{f_0 \sum_{v=0}^{v=v_k} S_{v_i}^6 p_{v_i}}. \quad (7)$$

Один миллион циклов этой нагрузки, выдержанный образцом, соответствует 2.8 годам эксплуатации. Определенный таким образом ресурс распространяют на всю партию однотипных деталей.

Если для определения нагрузки  $P_a$  нет данных и испытания проводятся в соответствии с методикой, приведенной в РД 24.050.37.95 [7], с определением

математического ожидания пробега или срока службы, то необходимо оценить надежность деталей в процессе продленного срока эксплуатации.

Принимая во внимание, что распределение усталостной долговечности деталей ходовых частей является логарифмически нормальным с функцией распределения

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (8)$$

где  $u = \frac{\lg L - a}{\sigma}$ ;  $a, \sigma$  – параметры распределения, и зная математическое ожидание пробега, параметр « $a$ » можно определить из формулы

$$\overline{\lg L} = a \exp\left(\frac{\sigma^2}{2M^2}\right), \quad (9)$$

где  $M = 0.4343$ .

Параметр  $\sigma$  можно принять равным 0.4 [8].

#### Выводы

1. Возможность продления срока службы подвижного состава и его составных частей следует определять на основании анализа условий эксплуатации и на основании возникающих в эксплуатации отказов, их характера и причин.
2. Обоснованно виды и режимы испытаний могут быть назначены только на основании анализа количества, характера и причин отказов, возникающих в эксплуатации.
3. Если в эксплуатации не выявлен доминирующий вид отказов и режим нагружения, приводящий к ним, то для продления срока службы необходимо провести комплекс испытаний в объеме, который проводился при постановке на производство и обеспечил равномерный износ составляющих частей подвижного состава.

#### Summary

The paper presents a procedure of the remaining life assessment for the rolling stock with the use of the operation data and test results for the chosen number of samples and failure probability.

**Keywords:** probability of failure, remaining life, tests, rolling stock.

#### Резюме

Оцінено залишковий термін служби рухомого складу згідно з обраною кількістю іспитових зразків та імовірністю відмов.

**Ключові слова:** імовірність відмов, залишковий термін служби, випробування, рухомий склад.

1. Нормы (временные) для расчетов на прочность при проектировании механической части вагонов электропоездов. – М., 1970.
2. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975.
3. Деркач Б.А. К методике стендовых испытаний на прочность деталей и узлов ходовых частей. - Труды ВНИИВ. – М., 1988.
4. Соколова С. Исследование динамики и прочности вагонов. – М.: Машиностроение, 1976.
5. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. - М.: Наука, 1975.
6. Бирюкова И. Механическая часть тягового подвижного состава. – М.: Транспорт, 1992.
7. РД 24.050.37.95. Методы испытаний на прочность и ходовые качества.
8. Артамоновский В., Деркач Б.А. Оценка надежности модернизированных рам тележек электропоездов при отсутствии отказов в опытной партии. - Труды ВНИИВ. – М., 1978.