УДК 622.002.5-192:678

Дырда В.И., Шолин М.К., Твердохлеб Т.Е.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЗИНОВЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ МАШИН ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Розглядається алгоритм оцінки показників надійності гумовометалевих деталей машин, які працюють при тривалих циклічних навантаженнях.

PREDICTION OF RELIABILITY OF METAL-RUBBER VIBROINSULATORS OF MACHINES AT LONG-LIVED CYCLIC LOADINGS

The algorithm of an estimation of exponents of reliability of rubber-metal details of machines is considered which work at durating cyclic loadings.

1 Общие сведения

Проблемы надежности и долговечности являются основными проблемами практически для всех отраслей промышленности. Для современных горных машин характерны такие направления их развития как увеличение степени автоматизации, увеличение нагрузок, скоростей, температур, стремление к уменьшению габаритов и массы, повышение требований к точности функционирования, к эффективности их работы и т.д.

Усложнение машин и усиление требований к ним привели к необходимости повышения требований к их надежности и долговечности. Каждая остановка машины из-за повреждений отдельных ее элементов или снижения их технических характеристик ниже допустимого уровня препятствует эффективному функционированию машины, делает ее ненадежной, влечет за собой материальные убытки, а иногда имеет катастрофические последствия. В настоящее время в горных машинах, работающих при длительных циклических нагрузках (вибрационные машины — грохоты, питатели, мельницы; смесители, вентиляторы, окомкователи, дробилки и т.д.) одним из основных звеньев, определяющих их режим работы, долговечность и надежность, являются резиновые и резинометаллические детали. Благодаря их использованию удалось резко снизить вибрации и шум, повысить долговечность и надежность машин и уменьшить их вредное влияние на операторов.

Как всякая прикладная отрасль знаний наука о надежности базируется на фундаментальных математических и естественных науках, на тех их разделах и теоретических разработках, которые способствуют решению поставленных задач.

Особое значение для науки о надежности, при этом, как и для любой науки, имеет вопрос о применении математического аппарата. В последние годы возросли объем и уровень исследований, посвященных вероятностным методам расчета конструкций на надежность и долговечность, разработаны основы общей теории надежности конструкций, основанной на теории случайных функций, даны различные примеры расчетов надежности конструкций [1-42].

Для анализа различных вариантов потери машиной или отдельной системой, конструкцией, элементом работоспособности необходимо представить вначале математическую модель этого процесса.

Математическая модель должна быть результатом формализации описания процесса и учитывать, насколько это возможно, все основные закономерности процесса. Построение математической модели складывается обычно из следующих последовательных этапов [4]: описание процесса, формализационная схема процесса, математическая модель.

Описание процесса концентрирует сведения о физической природе протекающих процессов старения, условиях эксплуатации изделия, количественных характеристиках элементарных явлений, результатах наблюдений за работоспособностью изделия при эксплуатации и испытаниях.

Формализованная схема процесса — это промежуточный этап к построению математической модели. Она полностью использует данные экспериментального исследования процесса. В схеме процесса, как правило, графически или в виде таблиц представляются основные зависимости и выясняются все вопросы, связанные с интерполяцией и экстраполяцией экспериментального материала.

Математическая модель представляет собой систему соотношений, связывающих характеристики процесса и исходные показатели изделия с его выходными параметрами.

В общем виде процесс потери объектом работоспособности может быть представлен в виде траектории случайной функции $x(t)$ в n — мерном фазовом пространстве. Рассматривая модель надежности изделия, как эволюцию системы во времени в фазовом пространстве, Гнеденко [5] для оценки в общем виде показателей надежности использует понятие функционала Φ.

Считается, что функционал Φ определен на процессе, если каждой траектории $x(t)$ ставится в соответствие некоторое число $\Phi[x(t)]$. Это число характеризует роль данной траектории (реализации процесса) в потере изделием работоспособности. Тот или иной показатель надежности φ определяется как математическое ожидание функционала, т.е.

$$\varphi = M[\Phi[x(t)]\}.$$

Так, если функционал Φ равен длительности работы изделия до попадания в область отказов $G_{от}$, то $\Phi = T$ случайная величина, равная сроку службы данного изделия, а математическое ожидание будет представлять собой среднее время безотказной работы изделия $\varphi = T_{ср}$. Если же функционал Φ принимаем равным единице при нахождении траектории процесса в области G_1 и равным нулю при попадании в область отказов $G_{от}$, то математическое ожидание данного функционала будет равно вероятности безотказной работы $P(t)$ в интервале $[0;\ t]$, т.е. $\varphi = P(t)$. Возможны и другие подходы к определению в общем виде показателей надежности через функционал случайного процесса [5].

При постановке большинства задач показатели надежности элементов считают заданными. Для невосстанавливаемых элементов обычно ищут подходящие аналитические зависимости аппроксимации либо для вероятности безотказной работы $P(t)$, либо для интенсивности отказов $\lambda(t)$, которая связана с функцией надежности $P(t)$ формулой

$$\lambda(t) = -P'(t)/P(t)$$

Основная задача при расчете надежности состоит в выявлении и математическом описании такого закона распределения $F(t)$, который бы с высокой степенью достоверности отражал объективную действительность. Наиболее простой и широко распространенный путь для решения этой задачи заключается в непосредственном выборе закона распределения, который, по мнению исследователя, отражает действительную картину. Закон распределения времени работы изделия до отказа, выраженный в дифференциальной форме в виде плотности вероятности $f(t)$ или в интегральной форме в виде функции распределения $F(t)$ является полной характеристикой надежности изделия или его элемента. Он позволяет определить вероятность безотказной работы $P(t) = 1\text{-}F(t)$, математическое ожидание (средний срок службы или средняя наработка до отказа)

$$T = \int_0^\infty f(t) \cdot t \cdot dt = \int_0^\infty P(t) dt ;$$

дисперсию D или среднеквадратическое отклонение $\sigma = \sqrt{D}$

$$D = \int_0^\infty \left(T_{cp} - t\right)^2 f(t) dt$$

и другие численные характеристики, которые дают оценку того, как будет в среднем протекать процесс потери изделием работоспособности. Представление процесса потери работоспособности изделия в общем виде как траектории в n-мерном фазовом пространстве позволяет перейти к более простым частным моделям надежности изделия.

К моделям отказов, нашедшим наиболее широкое применение, относятся модели наиболее слабого звена, модели последовательного накопления повреждений, модели пропорционального накопления повреждений, модели Марковского типа, модели Пуассоновского типа. Вид расчетной схемы, способ описания свойств нагрузок, характер назначаемых ограничений на состояние объекта и другие факторы существенно определяют математическую структуру модели отказов. В зависимости от множества значений аргумента различают модели с дискретным временем (случайные последовательности) и модели с непрерывным временем. В зависимости от размерности пространства качества различают модели одномерные, двухмерные и т.д.

Наряду с моделями, элементами которых служат некоторые случайные процессы, рассматриваются континуальные модели, элементами которых служат случайные поля [10]. Классификация моделей производится также на основе свойства зависимости (независимости) процесса от предыстории. Рассматриваются модели внезапных и постепенных отказов, а также модели их одновременного проявления.

Характерным примером модели слабейшего звена является модель Вейбулла [7, 8]. Применение распределения Вейбулла для оценки результатов испытаний на усталостную прочность обосновано с помощью критерия разрушения Гриффитса при допущениях [9].

Функция распределения плотности вероятности закона Вейбулла задается в следующем виде

$$f(t)=\frac{b}{a}\cdot\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}\exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right], \tag{1}$$

где b – параметр формы закона;

a – параметр масштаба.

Функция (1) позволяет описать довольно широкий класс распределений, так, при $b = 1$ закон Вейбулла с достаточной точностью аппроксимирует распространенное в теории надежности экспоненциальное распределение, при $b = 2$ оно совпадает с распределением Релея, а при $b < 3$ – с нормальным. Любое реальное распределение приближается распределением вида (1) лучше, чем показательным.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ с учетом (1) равна интегралу от $f(t)$ на отрезке $[t, \infty)$

$$P(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right].$$

В модели последовательного накопления составляющих повреждений предполагается, что образец состоит из многих структурных элементов и не разрушится до тех пор, пока не разрушатся последовательно все составляющие его элементы. Подобная схема разрушения соответствует отказам резервированной системы элементов в теории надежности; функция распределения прочности такой системы при большом количестве элементов и довольно общих предположениях о частоте разрушения элементов в пределе имеет гамма-распределение [10, 11]

$$f(t) = \frac{a^b}{\Gamma(b)} t^{b-1} \exp(-at),$$

где a и b – параметры распределения;

$\Gamma(b)$ – гамма-функция параметра b.

Распределения Вейбулла, гамма-распределения обладают большой гибкостью и могут отражать разнообразные причины отказов.

В модели пропорционального накопления повреждений предполагается, что в материале имеется исходная нарушенность (трещины, поры и т.д.), которая в процессе нагружения развивается и последовательно увеличивает свои параметры [9]. Когда суммарная нарушенность материала достигает своего критического значения, образец разрушается. Нарушенность изменяется по экспоненте, поэтому критическое значение нарушенности можно представить в виде произведения независимых случайных процессов. Полагая, что разрушающее напряжение связано линейно с критической разрушенностью, для прочности получают логарифмически нормальное распределение, плотность вероятности которого имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - a}{\sigma}\right)^2\right],$$

где a и σ – параметры распределения.

На практике обычным аналогом схемы применения логарифмически-нормального закона считают модель постепенного накопления взаимосвязанных единичных повреждений, а также отказы элементов из-за усталости материала [11, 12].

Особое место при решении задач надежности занимает нормальное распределение с плотностью распределения

$$f(t)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}\right],$$

где T и σ – соответственно среднее значение и дисперсия наработок на отказ.

Нормальный закон используют в тех случаях, когда отказы носят постепенный характер, являются следствием направленных физико-химических изменений в элементе. Важность нормального закона распределения определяется тем, что к нему обычно приводят задачи, связанные с распределением сумм большого числа случайных величин.

Методы определения параметров известного закона распределения достаточно широко разработаны в теории вероятностей. Основанием для использования того или иного закона распределения и оценки его параметров служат обычные опытные данные, полученные при испытаниях изделий или образцов, сведений об аналогах, эксплуатационные наблюдения или теоретические предпосылки. При этом должны применяться методы проверки статистических гипотез о правомерности применения данного закона распределения.

Модели случайных потоков отказов находят широкое применение для описания отказов высоконадежных систем. Наиболее подходящей моделью для описания таких отказов является модель пуассоновского потока отказов, который служит удобным аппаратом для описания отказов в условиях технического обслуживания и восстановления.

Важную роль в надежности играют модели дискретных марковских процессов и, в частности, процессы «гибели и размножения» [13-17], описываемые уравнениями Колмогорова-Фккера-Планка. Такие модели достаточно точно описывают случайные процессы отказов и восстановлений в различных технических системах, состоящих из очень большого числа однотипных восстанавливаемых элементов.

Так, если эволюционный вектор качества V(t) представляет собой диффузионный марковский процесс в пространстве V, то переходная плотность вероятности $\rho(V,\ t/V_0,\ t_0)$ значении этого процесса будет удовлетворять уравнению, Колмогорова (в физике его часто называют уравнением Фоккера-Планка)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\sum_{j=1}^{n} \frac{\partial}{\partial V_j}\left(x_j \rho\right) + \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} \frac{\partial^2}{\partial V_j \partial V_k}\left(x_{jk}\rho\right) \qquad (2)$$

с начальным условием $\rho = \delta\ (V\text{-}V_0)$ при t = t0,

где x_j и x_{jk} – интенсивности процесса;

x_j – коэффициент сноса, характеризующий в среднем скорость перемещения процесса;

x_{jk} – коэффициент диффузии, соответствующий дисперсии этой скорости.

Находя решение уравнения (2), вычисляют различные характеристики надежности системы, в частности, вероятность безотказной работы на заданном отрезке времени и математическое ожидание времени достижения предельной поверхности при заданном распределении начальных значений вектора качества.

Формирование отказов элементов конструкций и машин связано с постепенным накоплением повреждений: усталостных, износа, старения и т.д. Математическим отражением такого факта служат модели отказов, которые описывают квазимонотонное ухудшение параметров качества объекта, происходящее в процессе его эксплуатации [3, 18], это так называемые модели постепенных отказов. Общий подход к решению задачи оценки и прогнозирования надежности в этом случае состоит в установлении выходного показателя (показателей), определяющего работоспособность изделия, оценку рассеяния начального значения этого показателя и изменения его величины во времени вплоть до отказа. Возникновение отказа в процессе изменения выходного параметра связано со степенью удаленности параметра от его предельного состояния. Отказ возникает при достижении выходным параметром $X(t)$ своего предельно допустимого (критического) значения X_{max}, что происходит через некоторый случайный промежуток времени t = Т, определяющий срок службы (наработку) изделия до отказа. Вероятность безотказной работы $P(t)$ изделия на наработку t = Т при таких отказах определится законом распределения $f(X)$, как вероятность не выхода параметра X за границу X_{max}, т.е.

$$P(t = T) = P(X \leq X_{\max}).$$

Закон изменения выходного параметры $X(t)$ в основном соответствует определяющей его временной зависимости для степени повреждения $U(t)$, так как между ними существует функциональная зависимость. В общем случае временная зависимость выходного параметра имеет квазидетерминированный вид

$$X = f(U) = f[U(t)], \tag{3}$$

где $U(t)$ – обычно случайная функция степени повреждения;

$f(...)$ – описывает детерминированную зависимость, рассматривается функция случайного аргумента.

Обычно предполагается, что функция (3) линейна по U и $U(t)$ имеет некоторое распределение $f(U)$, тогда задача оценки надежности сводится к нахождению плотности распределения функции $f_X(x)$ по закону распределения вероятностей ее аргумента $f(U)$. Общий метод решения таких задач рассматривается в курсах теории вероятностей [10, 19].

Основная трудность, связанная с некорректностью постановки задачи прогнозирования надежности, проявляется в этом случае в обоснованном выборе зависимости (3).

Таким образом, знание временных зависимостей, описывающих процесс повреждения, и применение показателей, оценивающих степень повреждения материала изделия, являются необходимыми условиями оценки надежности.

Наиболее перспективны аналитические зависимости, базирующиеся на физике явлений и оценивающие влияние основных факторов на скорость процесса.

Наиболее распространенный случай – изменение выходного параметра изделия $X(t)$ подчиняется линейному закону

$$X = \gamma \cdot t \tag{4}$$

где γ – это скорость протекания процесса – случайная величина, зависящая от большого числа случайных факторов – нагрузки, скорости, температуры, условия эксплуатации и т.д.

В случае, если случайная величина γ будет иметь нормальное распределение

$$f(\gamma) = \frac{1}{\sigma_\gamma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\gamma_x - \gamma_{cp})^2}{2\sigma_\gamma^2} \right],$$

где $f(\gamma)$ – плотность вероятности;

σ_γ – среднеквадратическое отклонение скорости процесса;

γ_x – скорость изменения выходного параметра;

γ_{cp} – ее среднее значение,

то и параметр $X(t)$ при данном $t = T$, будет иметь нормальное распределение $f(x)$ с параметрами [3]:

математическое ожидание

$$M(X) = X_{cp} = \gamma_{cp} T;$$

среднеквадратическое отклонение

$$\sigma(X) = \sigma_\gamma \cdot T.$$

Вероятность безотказной работы $P(t = T)$ будет численно равна площади кривой плотности распределения $f(x)$, заключенной в промежутке от $-\infty$ до X_{max}

$$P(t = T) = \frac{1}{\sigma(x)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{X_{\max}} \exp\left[-\frac{(x - x_{cp})^2}{2\sigma^2(x)} \right] dx = \\ = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{X_{\max} - X_{cp}}{\sigma(x)} \right] = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{X_{\max} - \gamma_{cp} \cdot T}{\sigma_\gamma \cdot T} \right] \tag{5}$$

где $\Phi(...)$ нормированная функция Лапласа.

Данная модель формирования постепенного отказа является упрощенной, так как не учитывает рассеивание начальных параметров изделия.

В общем случае уравнение (4) будет иметь вид

$$X = a + \gamma \cdot t,$$

где a – начальный параметр изделия, который также является случайной величиной, подчиняющейся некоторому закону распределения.

Наработка на отказ t = Т в этом случае является функцией двух независимых случайных аргументов a и γ

$$T = \frac{X_{\max} - a}{\gamma}.$$

Для отыскания закона распределения $f(t)$ функции двух случайных переменных можно воспользоваться формулами [19], которые имеют довольно громоздкий вид.

Для случайных аргументов a и γ, распределенных по нормальному закону, выходной параметр $X(t)$ будет иметь то же распределение при каждом значении $t = T$ с параметрами:
математическое ожидание

$$M(X) = X_{cp} = a_0 + \gamma_{cp} T;$$

среднее квадратичное отклонение

$$\sigma(x) = \sqrt{\sigma_a^2 + T^2 \sigma_\gamma^2},$$

где $a0$ и σ_a – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайного параметра a.

Аналогично с (5) вероятность безотказной работы определится следующим образом:

$$P(t = T) = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{X_{\max} - a_0 - \gamma_{cp} T}{\sqrt{\sigma_a^2 + T^2 \sigma_\gamma^2}}\right].$$

Эта формула может быть применена и при нелинейном протекании процесса изменения параметра, т.е. когда γ_{cp} и σ_γ являются функциями времени $\gamma_{cp}(t)$ и $\sigma_\gamma(t)$.

В этом случае

$$P(t = T) = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{X_{\max} - a_0 - \gamma_{cp}(T) \cdot T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\gamma^2(T) \cdot T^2}}\right]$$

Данный методический подход можно использовать и при других законах распределения параметров a и γ. Однако при более сложных или эмпирических законах распределения бывает трудно получить аналитическое выражение для функций $f(T)$ или $P(T)$. В этом случае может быть применен метод статистического моделирования (метод Монте-Карло).

Основные виды случайных функций изменения возрастающих выходных параметров изделий, их графики и формулы для расчета основных показателей надежности приведены в [20].

Выходные параметры изделий имеют, как правило, монотонные реализации, которые совершают только одно (первое) пересечение с одной из границ области, т.е. реализация процесса один раз покинув допустимую область, далее возвратиться в нее не может.

Рассмотренные выше модели постепенных отказов характерны для систем, обладающих определенной степенью безотказности работы.

Для высоконадежных систем характерна модель, для которой значения выходного параметра $X(t)$ значительно ниже допустимых значений X_{max}. Это возможно, если процесс $X(t)$ является стационарным или скорость изменения параметра незначительна и обеспечивается условие $X << X_{\max}$. В этом случае изделие имеет запас надежности, и отказ практически не возникает.

Если в процессе формирования отказа основную роль играет возникновение (зарождение) процесса, а затем интенсивность его значительно возрастает $(X(t) \to \infty)$, – это модель внезапного отказа.

Основным признаком внезапного отказа является независимость вероятности его возникновения от изменения состояния изделия и времени его предыдущей работы.

Поэтому модель внезапного отказа должна включать полную характеристику всего комплекса причин, которые могут привести к отказу. Такой характеристикой может быть интенсивность отказов λ – вероятность возникновения отказа в единицу времени, при условии, что до этого момента времени отказ не возникал.

Основной математической моделью внезапных отказов является экспоненциальное распределение ресурса работоспособности

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda \cdot t),$$

где λ – интенсивность отказов.

Средний срок службы изделия до отказа в этом случае будет равен $T_{cp} = 1/\lambda$, а дисперсия соответственно $\sigma^2 = 1/\lambda^2$. Среднеквадратическое отклонение σ в случае экспоненциального распределения равно математическому ожиданию $\sigma = 1/\lambda = T_{cp}$. Этот факт можно использовать для статистической проверки гипотезы о показательном распределении времени наработки на отказ; равенство $\sigma = T_{cp}$ является для этого необходимым и достаточным условием. Вероятность безотказной работы определится как

$$P(t) = \exp\left[-t / T_{cp}\right].$$

Это распределение применимо, когда основная часть деталей работает безотказно до момента замены узла или машины и лишь незначительное их количество выходит из строя в начальный период эксплуатации еще до начала усталостного разрушения по случайным причинам или неблагоприятным их сочетаниям (скрытые дефекты, механические повреждения, нарушение технологии изготовления или норм эксплуатации, возникновение внезапной концентрации нагрузок, превышающих запас прочности изделия и т.д.).

В нашем случае, если некоторая часть имеет технологические дефекты – «слабые места», а основная масса выходит со строя по причине износа (старения) изделий, то общей математической моделью распределения времени безотказной работы является суперпозиция двух распределений: экспоненциального для дефектных экземпляров и распределения, отвечающего характеру износа (старения), для остальных [11]. Так, если износовые отказы подчиняются нормальному закону (5), а внезапные – экспоненциальному, то плотность распределения будет задана как

$$f(t = T) = C_1 \lambda \exp(-\lambda T) + (1 - C_1) \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(T - T_{cp})^2}{2\sigma^2}\right]$$

где C_1 – доля внезапных отказов.

Вероятность безотказной работы в случае независимости этих отказов может быть определена по теореме умножения вероятностей [19]

$$P(t) = P_u(t) \cdot P_b(t),$$

где $P_u(t)$ – безотказность от износовых повреждений;

$P_b(t)$ – безотказность от внезапного выхода из строя.

В этом случае вероятность безотказной работы определится по формуле [3]

$$P(t = T) = \left[0{,}5 + \Phi\left(\frac{X_{\max} - a_0 - \gamma_{cp} \cdot T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right) \right] \cdot e^{-\lambda t}.$$

В общем случае при использовании суперпозиции нескольких законов распределения формулы для определения показателей надежности записываются в виде:

плотность распределения наработки на отказ

$$f(t) = C_1 f_1(t) + C_2 f_2(t) + \cdots + C_n f_n(t);$$

вероятность безотказной работы

$$P(t) = C_1 P_1(t) + C_2 P_2(t) + \cdots + C_n P_n(t),$$

где C_i – постоянные, удовлетворяющие условию

$C_1 + C_2 + \cdots + C_n = 1$

По соотношению коэффициентов C_i можно судить о своего рода весомости одного из сравнимых или взятых для композиции законов распределения [21].

Перечисленные выше математические модели надежности, а они далеко не исчерпывают все имеющиеся, получили в настоящее время широкое развитие и распространение; в общем случае они представляют и мощный аппарат для решения разнообразных задач практики. Но эффективность применения этого аппарата зависит, прежде всего, от степени соответствия его возможностей природе изучаемого явления, поставленной задаче.

В этой связи второй теоретической основой науки о надежности являются результаты исследований естественных наук, изучающих физико-химические процессы разрушения, старения и изменения свойств материалов, из которых изготовлены машины, их элементы, или которые необходимы для их функционирования. Сюда относятся науки, изучающие виды механических разрушений материалов (сопротивление материалов, ползучесть и т.д.), изменения, происходящие в материалах и их поверхностных слоях (физико-химическая механика, триботехника), химические процессы разрушения в материалах (коррозия металлов, старение полимеров) и др.

С позиций теории надежности результаты этих наук концентрируются в области, получившей название «физика отказов» [3].

Физика отказов изучает необратимые процессы, приводящие к потере материалом начальных свойств при эксплуатации изделий. Основной особенностью этих исследований является рассмотрение всех явлений во времени. Временные закономерности физики отказов являются базой для решения основных задач надежности. Изменение начальных свойств и состояния материалов, из которых выполнено изделие, является первопричиной потери им работоспособности, так как эти изменения могут привести к повреждению изделия и к опасности возникновения отказа.

Чем глубже изучены закономерности, описывающие процессы изменения свойств и состояние материалов, тем достовернее можно предсказать поведение изделия в данных условиях эксплуатации и обеспечить сохранение показателей надежности в требуемых пределах.

В основе потери изделием или машиной, любым объектом работоспособности всегда лежат физические закономерности, которые в силу разнообразия и переменности действующих факторов приобретают вероятностный характер. Действительно, при работе, эксплуатации происходят непредвиденные изменения и колебания нагрузок, скоростей, температур, степени загрязнения поверхностей. Более того, сами детали машины могут быть выполнены с различными допусками на технические параметры (точность, однородность материала и др.).

Знание физической закономерности процесса в корне изменяет возможности по оценке хода процесса по сравнению со случаем, когда этот процесс оценивается только на основе статистических наблюдений.

Функциональная зависимость, хотя и абстрагирует действительность и лишь с известной степенью приближения отражает физическую сущность процесса, позволяет представить возможный ход процесса при различных ситуациях. Как отмечалось выше, для инженерных задач надежности необходимо знать закономерности изменения выходных параметров машины и ее элементов во времени. Необходимо оценить деформацию деталей, износ их поверхностей, изменение несущей способности из-за релаксации напряжений или процесса усталости, повреждение поверхности из-за коррозии и т.д., т.е. необходимо рассмотреть макрокартину явлений, происходящих при эксплуатации машин. Для объяснения физической сущности происходящих явлений и для получения таких закономерностей, которые в наиболее общей форме отражают объективную действительность, необходимо также проникнуть в микромир явлений.

Поэтому современная наука изучает закономерности изменения свойств и состояния материалов на следующих уровнях.

Субмикроскопический уровень – на основании рассмотрения строения атомов и молекул и образования из них кристаллических решеток твердых тел или иных структур выявляются закономерности, которые служат базой для объяснения свойств и поведения материалов в различных условиях. Эти закономерности, как правило, являются основой для дальнейших исследований и разработок частных зависимостей.

Этот уровень исследований позволил развить фундаментальные представления о несовершенстве в кристаллах и особенно в дислокациях, их взаимодействиях и движении, о силах упругости с точки зрения квантовой механики, о диффузии атомов в твердых телах и т.д., которые являются физической основой для решения основных задач прочности и долговечности материалов.

Микроскопический уровень рассмотрения свойств материалов исходит из анализа процессов, происходящих в небольшой области. Полученные при этом закономерности в дальнейшем распространяются на весь объем тела. Классическим примером в этом отношении может служить теория напряжений и деформаций в идеальном однородном теле, когда в точке тела выделяется бесконечно малый элемент в виде параллелепипеда и рассматривается его напряженное состояние. Связь между деформациями и напряжениями описывает закон Гука. Развитие этого подхода с учетом возникновения пластических деформаций позволяет найти зависимости между напряжениями и деформациями и за пределами упругости [43].

Изучение влияния совместного действия силовых и физико-химических факторов на поведение твердых тел в процессе их эксплуатации привело к появлению нового направления – физико-химической механики материалов [44]. Здесь делается попытка привлечения физики твердого тела, физической химии, химии твердых состояний и неравновесной термодинамики для изучения деформации и разрушения твердых тел, работающих в условиях одновременного действия нагрузок, температур, коррозионно-агрессивных сред и ядерных облучений.

Рассмотрение закономерностей на уровне микрокартины явлений -необходимый этап для дальнейшего распространения полученных зависимостей на весь объем твердого тела, т.е. на всю деталь или ее поверхность.

Макроскопический уровень рассматривает изменение начальных свойств или состояния материала всего тела (детали изделия). Так, теория упругости на основе закона Гука рассматривает деформации и напряжения в системах и деталях различной конфигурации, работающих на растяжение, кручение, изгиб и другие виды деформации.

Проблема перенесения на макрообъект исходных закономерностей, отнесенных к элементарному объему, потребовало разработки специальных, иногда довольно сложных методов инженерных расчетов. Типичным построением инженерных методов расчета деталей машин на прочность и деформацию, на износ, на ползучесть и т.д. следует считать такое, при котором на основе физической картины на микроучастке рассматриваемого объема исследуются процессы с учетом размеров, конфигурации и условий работы всей детали.

Таким образом, при решении вопросов надежности могут быть использованы разнообразные закономерности и методы расчетов, применяемые при конструировании изделий и машин, полученные общие физические законы и частные зависимости. И так как при этом главной задачей является оценка изменения свойств, и состояния материалов в функции времени, необходимо выявить, какие физические закономерности могут быть использованы и как проявляется фактор времени при оценке работоспособности изделия.

Законы старения, оценивающие степень повреждения материала в функции времени, являются основой для решения задач надежности. Они позволяют прогнозировать ход процесса старения, оценивать возможные его реализации и выявлять существенные факторы, влияющие на интенсивность процесса. Законы старения являются основным объектом рассмотрения в «физике отказов».

Любой процесс старения возникает и развивается лишь при определенных внешних условиях для оценки возможных видов повреждения материалов деталей машин необходимо установить область существования процесса старения и в первую очередь условия его возникновения. Для возникновения процесса обычно должен быть превзойден определенный уровень нагрузок, скоростей, температур или других параметров, определяющих его протекание. Этот начальный уровень или порог чувствительности особенно важно знать для быстропротекающих процессов старения, когда после возникновения процесса идет его интенсивное лавинообразное развитие. Часто порог чувствительности связывают с некоторым энергетическим уровнем, который определяет начало данного процесса.

Особую роль для протекания большинства процессов старения и разрушения материалов играют строение поверхностного слоя твердых тел и происходящие в нем явления. Состояние поверхностного слоя определяет процессы, возникающие при взаимодействии с другим телом или с окружающей средой, например, при износе, контактной деформации, усталости, коррозии и др. Поэтому большинство отказов машин и их элементов связано с процессами, протекающими в поверхностных слоях, и их природа не может быть объяснена без анализа тех изменений, которые претерпевают характеристики поверхностного слоя при эксплуатации изделий.

В заключение отметим, что изучение закономерностей процесса разрушения материала изделия – это тоже один из этапов инженерных расчетов на надежность. Кроме этого, должны быть разработаны методы расчета на долговечность и безотказность различных элементов машины с учетом специфики их эксплуатации. При этом должна быть учтена вероятностная природа протекающих процессов разрушения. Все, что говорилось выше, относится практически к любым элементам, изделиям, объектам и отражает общий подход к проблемам надежности в целом.

Для эластомерных и, в частности, резиновых элементов конструкций проблема надежности является такой же актуальной. Надежность – способность выполнять свои функции при сохранении значений эксплуатационных показателей в заданных пределах [3] является основным показателем качества резиновых изделий. При этом задача обеспечения надежности решается на всех стадиях: проектирования, производства, эксплуатации эластомерных элементов конструкций.

Ниже остановимся подробнее на вопросах надежности применительно к резиновым элементам конструкций. При этом отметим, что указанные выше подходы (физика отказов, математический аппарат) применительно к резиновым элементам конструкций практически не развиты: значительное место при решении проблем надежности занимает достоверная информация.

Для сбора и обработки информации о надежности резиновых технических изделий проводят их испытания в различных условиях эксплуатации с фиксацией наработки и характера отказа каждого изделия.

При этом обеспечивается достоверность, однородность и непрерывность информации о надежности изделий; возможность сравнения их надежности по годам выпуска, качества однотипных изделий; изыскания наиболее эффективных путей повышения их качества. Такую систему сбора и обработки информации широко используют при определении надежности резиновых деталей наиболее массовых отечественных автомобилей, отдельных тракторов и сельхозмашин, а также некоторых других видов резиновых технических изделий (конвейерных лент, приводных и вариаторных ремней и т.д.).

В большинстве случаев эксплуатационные испытания изделий проводят в межведомственном порядке, результаты этих испытаний рассматривают совместно с потребителями, согласуя выводы и предложения, что, безусловно, способствует повышению их объективности и облегчает внедрение, как при создании резиновых технических изделий, так и при проектировании, изготовлении и эксплуатации машины в целом. При этом существенным дополнением к полученной таким путем информации служит сбор, обобщение и анализ данных оценки работоспособности и долговечности резиновых технических изделий, в том числе зарубежного производства, организациями, изготавливающими и использующими технику.

В связи со сказанным выше одним из путей исследования надежности и долговечности резиновых элементов является изучение превалирующего характера отказа резиновых технических изделий в типичных условиях эксплуатации. Это дает возможность оперативно проанализировать их (отказы) и определить наиболее эффективные пути повышения качества массовых групп изделий. Так, например, на протяжении ряда лет основные работы по совершенствованию конвейерных лент общего назначения были направлены на улучшение свойств обкладочных резин, клиновых ремней – на повышение качества оберточной ткани, резины слоя сжатия и снижение удлинения ремня. Далее, в результате систематических, длительных (более 15 лет) наблюдений было установлено [45], что в реальных условиях эксплуатации большинство резиновых деталей автомобилей и тракторов обеспечивает надежную работу машин до ремонта или списания и соответствует нормативно-техническим требованиям по надежности. Были выявлены резиновые технические детали (3-10 % от общего числа), не удовлетворяющие по надежности требованиям потребителя, и разработаны мероприятия по повышению их надежности до оптимального уровня.

Оценка надежности резиновых изделий путем проведения эксплуатационных испытаний наряду с очевидными преимуществами имеет рад недостатков, два основных из которых — необходимость испытания большого числа изделий и длительность эксплуатационных испытаний, составляющая обычно годы. Более того, в ряде случаев эксплуатационные и форсированные испытания затруднены или даже невозможны.

В этой связи на первый план выдвигается задача разработки методов ускоренных (сокращенных и форсированных) испытаний на надежность и методов расчета надежности изделий на стадии проектирования. При этом используются математическое моделирование процесса работы изделия до отказа или принципы научно-технического прогнозирования [5].

При расчете показателей надежности изделия на стадии проектирования могут использоваться приведенные выше методы описания постепенных отказов.

Условие работоспособности изделия при этом имеет вид

$$S(\tau) \geq [S],$$

где $S(\tau)$ — абсолютное значение показателя, определяющего работоспособность изделия в момент времени τ;

$[S]$ — критическая величина показателя.

Во многих случаях (при абразивном износе, накоплении остаточной деформации и т.д.) временная зависимость показателя, ответственного за долговечность изделия, описывается уравнением

$$S(\tau) = S_0 + \beta\tau^{\upsilon},$$

где S_0 — начальное значение показателя;

β и υ — коэффициенты.

Если величины S_0 и β распределены по нормальному закону, то вероятность безотказной работы изделия можно рассчитать по выражению

$$P(\tau) = F\left[\frac{[S] - S_0 - \beta\tau^{\upsilon}}{D(S_0) + D(\beta)\tau^{2\upsilon}}\right],$$

где $D(S_0)$ и $D(\beta)$ – дисперсии значений показателей.

С использованием этих принципов созданы методики расчета уплотнительных и некоторых других резиновых технических изделий, позволяющие установить время (или наработку), в течение которого с высокой степенью вероятности (свыше 0,99) сохраняется работоспособность изделия [46]. Подобная оценка работоспособности изделий особенно перспективна при предъявлении высоких требований к их надежности и для изделий, выпускаемых в малых количествах.

Таким образом, можно считать, что для решения задач оперативного и достоверного расчета и оценки надежности резиновых технических изделий наиболее перспективными до настоящего времени являлись направления:

- разработка общих принципов и рабочих методик расчета надежности изделий на стадии проектирования;
- расширение объема форсированных испытаний изделий в режимах, обеспечивающих подобие результатов стендовых и эксплуатационных испытаний;
- совершенствование системы сбора и обработки информации о надежности изделий в реальных условиях эксплуатации для изучения динамики качества наиболее массовой продукции заводов РТИ, а также отечественной и зарубежной продукции;
- анализ фактических условий работы недостаточно надежных изделий для выяснения причин их отказов в эксплуатации.

Решение этих задач позволило в ряде случаев исключить (или снизить вероятность) выпуска резиновых изделий с малой степенью надежности и оперативно принимать меры по повышению надежности отдельных изделий.

Одним из самых распространенных путей повышения долговечности и надежности резиновых элементов является резервирование. Резервирование резиновых деталей [47] состоит в том, что к основному элементу присоединяют один или несколько резервных элементов. Эти элементы по мере возникновения отказов последовательно заменяют основной элемент [47].

Существует три вида резерва элементов:

1) нагруженный («горячий») резерв. Резервные элементы находятся в том же режиме, что и основной элемент, их надежность не зависит от того, в какой момент они заменили основной элемент;

2) ненагруженный резерв. Резервные элементы не включены в работу;

3) облегченный резерв. У резервных элементов облегченный режим работы до момента замены основного элемента.

Вероятность на отказ в резерве меньше, чем вероятность отказа основного элемента.

Считается [48], что для резиновых деталей пригоден либо нагруженный, либо облегченный резерв. Это связано с тем, что надежность их снижается в результате естественного старения материала до включения в работу. Однако в ряде случаев при экстремальных условиях нагружения и при быстром выходе элементов из строя имеет смысл ненагруженное резервирование резиновых деталей. Это относится к массивным резиновым элементам горных, горно-металлургических, транспортных и транспортно-технологических машин.

Из резиновых деталей, комплектующих изделия машиностроения, относительно легко могут быть зарезервированы уплотнительные детали типа колец, прокладок, армированных манжет и клиновые ремни. Так, если потребителе требуются уплотнительные кольца круглого сечения для работы в узле, надежность уплотнения которого в период времени t должна быть не ниже $P(t) = 0,9999$, необходимо установить два кольца с надежностью $P(t) = 0,99$ [47].

Применение в некоторых клиноременных передачах автомобильных двигателей двух ремней узкого сечения вместо одного нормального сечения, т.е. создание резерва, близкого к облегченному, повышает вероятность безотказной работы передачи при пробеге автомобиля 60 тыс. км с $P(t) = 0,65$ до $P(t) = 0,998$ в результате распределения нагрузки на 2 элемента. Резервирование деталей позволяет более чем в 100 раз уменьшить объем контрольных испытаний и получить значительный экономический эффект.

Из приведенного выше обзора следует, что сведения, касающиеся надежности резиновых элементов в машиностроении, весьма малочисленны и относятся в основном к резиновым уплотнителям подвижных и неподвижных соединений, лентам и ремням для транспортирования твердых тел и передачи вращающего момента.

Практически не существует методов расчета и прогнозирования надежности силовых и виброизолирующих резиновых элементов, широко использующихся в таких машинах, как горные вибрационные. Это связано с наличием значительных трудностей при проведении стендовых и промышленных испытаний, практической бесполезностью их резервирования и т.д.

В этой связи один из путей повышения качества резиновых деталей, определения их надежности является совершенствование методов их расчета на жесткость, прочность, долговечность. При этом теоретической основой для прогнозирования ресурса служит механика разрушения.

2 Оценка показателей надежности резиновых деталей по эксплуатационным данным наработок на отказ

Оценка параметров распределения Вейбулла. Приняв распределение наработок на отказ в виде (1), необходимо получить оценки параметров a и b этого закона распределения, входящих в расчетные формулы определяемых показателей надежности.

Основными показателями надежности резиновых деталей в соответствии с [49], где приведена классификация и номенклатура основных показателей надежности, будут: средний срок службы (ресурс) $t_{ср}$. (среднее арифметическое значение наработок на отказ); гамма-процентный ресурс $t_\gamma\%$ (минимальное значение ресурса каждого изделия, в течение которого обеспечивается его работоспособное состояние с некоторой вероятностью $\gamma\%$) и вероятность безотказной работы $P(t)$ на наработку $t = T$. При известных оценках $\widehat{a}$ и $\widehat{b}$ распределение Вейбулла (1) эти показатели надежности определяют по формулам:

средний срок службы

$$T_{cp} = \widehat{a}\Gamma\left(1 + 1/\widehat{b}\right); \tag{6}$$

гамма-процентный срок службы

$$t_{\gamma\%} = a\left(-\ln\frac{\gamma}{100}\right)^{1/\widehat{b}}; \tag{7}$$

вероятность безотказной работы на наработку $t = T$

$$P(t = T) = \exp\left[-\left(\frac{T}{\widehat{a}}\right)^{\widehat{b}}\right]. \tag{8}$$

Исходными данными для оценки показателей надежности являются полученные по результатам эксплуатационных испытаний резиновых деталей так называемые смешанные или цензурированные выборки вида

$$t_1, t_2, \tau_1, t_3, \ldots, t_r, \ldots, \tau_r, \ldots, t_n, \tag{9}$$

где t_i – значение наработок до отказа;

τ_j – значения наработок до цензурирования.

Основными причинами цензурирования, имеющими место при эксплуатации резиновых деталей, являются: снятие из эксплуатации (наблюдений) остальных элементов узла из-за отказа одного из них; необходимость оценки показателей надежности до наступления отказов всех испытываемых элементов; разновременность начала и (или) окончания эксплуатации.

На первом этапе оценки показателей надежности резинометаллических элементов рассматриваются однократно цензурированные выборки, в которых значения всех наработок до цензурирования равны между собой и не меньше наибольшей наработки на отказ. Оценки показателей надежности по таким выборкам регламентированы в [49] в зависимости от плана наблюдений. В случае испытаний на надежность резиновых деталей таким планом является [N, R, T], план испытаний, согласно которому одновременно начинают испытания N элементов, отказавшие во время испытаний элементы заменяют новыми (буква R в обозначении плана), испытания прекращают при истечении времени испытаний или наработки T, для каждого из N элементов.

На основании указанных выше причин цензурирования, имеющих место при эксплуатации резиновых деталей, необходимо рассматривать многократно цензурированные выборки. Методы оценки показателей надежности для этого случая регламентированы [49].

Оценка неизвестных параметров $\hat{a}$ и $\hat{b}$ распределения (1) наработок на отказ для выборок большого объема (30-50) может быть осуществлена методом максимального правдоподобия [50]. Для смешанной выборки (9) функция максимального правдоподобия в случае многократного цензурирования будет [51]

$$\ln L = \sum_{i=1}^{r} \ln f(t_i, a, b) + \sum_{j=1}^{N-r} \ln\left[1 - F(\tau_j, a, b)\right] \qquad (10)$$

или в случае однократного цензурирования

$$\ln L = \sum_{i=1}^{r} \ln f(t_i, a, b) + (N - r)\ln\left[1 - F(t_r, a, b)\right],$$

где r – количество отказов;

$f(t_i, a, b)$ – плотность распределения наработок на отказ;

t_i – наработка на отказ;

t_r – максимальная наработка на отказ;

τ_j – наработки неотказавших элементов, наработки до цензурирования;

N – количество элементов, поставленных на испытание;

$F(\tau_j, a, b)$ – интегральная функция распределения безотказных наработок.

Для распределения Вейбулла функция правдоподобия будет следующей

$$\ln L = r\ln b - rb\ln a + (b-1)\sum_{i=1}^{r} \ln t_i - \frac{1}{a^b}\left(\sum_{i=1}^{r} t_i^b + \sum_{j=1}^{N-r} \tau_j^b\right). \qquad (11)$$

Дифференцируя выражение (11) по неизвестным параметрам a и b

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \ln L}{\partial a} = 0, \\ \dfrac{\partial \ln L}{\partial b} = 0 \end{cases}$$

и приравнивая нулю производные, получают для их определения систему уравнений

$$\begin{cases} a^b - \dfrac{1}{r}\left(\sum\limits_{i=1}^{r} t_i^b + \sum\limits_{j=1}^{N-r} \tau_j^b \right) = 0, \\ \left(\dfrac{r}{b} + \sum\limits_{i=1}^{r} \ln t_i \right) \cdot \left(\sum\limits_{i=1}^{r} \ln t_i^b + \sum\limits_{j=1}^{N-r} \tau_j^b \right) - r \left(\sum\limits_{i=1}^{r} t_i^b \ln t_i + \sum\limits_{j=1}^{N-r} \tau_j^b \ln \tau_j \right) = 0. \end{cases} \qquad (12)$$

Второе уравнение системы (12) можно переписать в виде

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r} \ln t_i - \frac{\sum\limits_{i=1}^{r} t_i^b \ln t_i + \sum\limits_{j=1}^{N-r} \tau_j^b \ln \tau_j}{\sum\limits_{i=1}^{r} \ln t_i^b + \sum\limits_{j=1}^{N-r} \tau_j^b} = 0. \qquad (13)$$

Добиваясь выполнения условия (13) с наперед заданной точностью ε, оценку параметра $\widehat{b}$ получают методом последовательных приближений в следующей последовательности:
вычисляют коэффициент

$$A = \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r} \ln t_i;$$

вычисляют начальное приближение

$$\widehat{b}_{k+1} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{r} t_i^{\widehat{b}_k} \ln t_i + \sum\limits_{j=1}^{N-r} \tau_j^{\widehat{b}_k} \ln \tau_j}{\sum\limits_{i=1}^{r} t_i^{\widehat{b}_k} + \sum\limits_{j=1}^{N-r} \tau_j^{\widehat{b}_k}}.$$

Процесс нахождения приближений прекращают при выполнении условия

$$\left| \frac{\widehat{b}_{k+1} - \widehat{b}_k}{\widehat{b}_k} \right| < \varepsilon, \qquad (14)$$

где ε — точность решения уравнения (13).

В качестве оценки параметра $\widehat{b}$ следует принять значение $\widehat{b}_{k+1}$, при котором выполняется условие (14). Точность решения ε обычно выбирают из ряда 0,001; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20.

По первому уравнению системы (12) получают оценку параметра $\widehat{a}$

$$\widehat{a} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{r} t_i^{\widehat{b}} + \sum_{j=1}^{N-r} \tau_j^{\widehat{b}}}{r} \right)^{1/\widehat{b}} .$$

Получив оценки параметров $\widehat{a}$ и $\widehat{b}$, показатели надежности определяют по формулам (6)-(8).

Следует отметить, что в случае однократного цензурирования начальное приближение $\widehat{b}_0$ к корню уравнения (13) может быть получено методом моментов (по значениям эмпирического коэффициента вариации для заданных значений $\widehat{b}$ по таблицам в [49]).

Определение же параметра $\widehat{b}$ осуществляют путем решения уравнения правдоподобия относительно $\widehat{b}$ методом Ньютона-Рафсона [49]

$$\widehat{b}_{k+1} = \widehat{b}_k - \frac{f(\widehat{b}_k)}{f'(\widehat{b}_k)}, \tag{15}$$

где $\widehat{b}_k$ – k-ое приближение к корню уравнения $f(b)$=0.

В соответствии с (15) определение параметра производится по рекуррентной формуле

$$\widehat{b}_{k+1} = \widehat{b}_k + \frac{\frac{1}{\widehat{b}_k} + \frac{S_1}{r} - \frac{S_3^{(k)}}{S_2^{(k)}}}{\frac{1}{\widehat{b}_k} + \frac{S_2^{(k)} \cdot S_4^{(k)} - \left(S_3^{(k)}\right)^2}{\left(S_2^{(k)}\right)^2}} , \tag{16}$$

где

$$S_1 = \sum_{i=1}^{r} t_i ;$$

$$S_2^{(k)} = \sum_{i=1}^{r} t_i^{\widehat{b}_k} + (N-r) t_r^{\widehat{b}_k};$$

$$S_3^{(k)} = \sum_{i=1}^{r} t_i^{\widehat{b}_k} \ln t_i + (N-r) t_r^{\widehat{b}_k} \ln t_r;$$

$$S_4^{(k)} = \sum_{i=1}^{r} t_i^{\widehat{b}_k} \ln^2 t_i + (N-r) t_r^{\widehat{b}_k} \ln^2 t_r,$$

t_r — максимальная наработка на отказ.

Практическое значение имеют не только оценки показателей надежности, но и определение возможных наиболее вероятных пределов их изменения. Соотношения для расчета доверительных границ показателей надежности получают по функции правдоподобия (10) в соответствии с [49, 50]

$$t_{\gamma,B,H} = t_\gamma \pm z_\beta \sqrt{D(t_\gamma)};$$

$$P(t)_{B,H} = P(t) \pm z_\beta \sqrt{D[P(t)]};$$

$$D(t_\gamma) = \left(\frac{t_\gamma}{\widehat{b}}\right)^2 \left[\left(\frac{\widehat{b}}{\widehat{a}}\right)^2 D(\widehat{a}) + \ln^2 \frac{t_\gamma}{a} D(\widehat{b}) - 2\frac{\widehat{b}}{\widehat{a}} \ln \frac{t_\gamma}{\widehat{a}} \operatorname{cov}(\widehat{a}, \widehat{b})\right];$$

$$D[P(t)] = \left(\frac{t}{\widehat{a}}\right)^{2\widehat{b}} \exp\left[-2\left(\frac{t}{\widehat{a}}\right)^{\widehat{b}}\right] \left[\left(\frac{\widehat{b}}{\widehat{a}}\right)^2 D(\widehat{a}) + \ln^2 \frac{t}{\widehat{a}} D(\widehat{b}) - 2\frac{\widehat{b}}{\widehat{a}} \ln \frac{t}{\widehat{a}} \operatorname{cov}(\widehat{a}, \widehat{b})\right];$$

$$D(\widehat{a}) = -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \widehat{b}^2} \Big/ DetA;$$

$$D(\widehat{b}) = \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \widehat{a}^2} \Big/ DetA;$$

$$\operatorname{cov}(\widehat{a}, \widehat{b}) = \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \widehat{a} \partial \widehat{b}} \Big/ DetA;$$

$$DetA = \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \widehat{b}^2} \cdot \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \widehat{a}^2} - \left(\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \widehat{a} \cdot \partial \widehat{b}}\right)^2,$$

где $t_{\gamma,B,H}$ — верхняя и нижняя границы гамма-процентного ресурса;

$P(t)_{B,H}$ — верхняя и нижняя границы вероятности безотказной работы; $D(t_\gamma)$, $D[P(t)]$, $D(a)$, $D(b)$ — соответственно дисперсии гамма-процентного ресурса, вероятности безотказной работы и параметров $\hat{a}$ и $\hat{b}$ распределения (1).

При уровне значимости $\gamma = 90$ % по таблицам [49] определяют z_β

$$z_\beta = 1{,}645, \quad \left(\beta = \frac{1+\gamma}{2}\right).$$

Проверка статистической гипотезы о согласии выбранного распределения с опытными данными. Проверку статистической гипотезы согласия выбранного распределения Вейбулла экспериментальным данным наработок на отказ резиновых деталей проводят в следующей последовательности [49].

1) По смешанной выборке (9) определяют оценки параметров $\hat{a}$ и $\hat{b}$ закона распределения в указанном выше порядке.

2) По исходным данным строят вариационный ряд, т.е. наработки до отказа и наработки до цензурирования выстраивают в порядке неубывания. Если отдельные значения наработки на отказ равны некоторым значениям наработки до цензурирования, то в вариационном ряду сначала указывают наработки до отказа, затем наработки до цензурирования.

3) По вариационному ряду подсчитывают величины m, r_i и n_i ($i = 1, 2,\ldots m$), где m — число интервалов наблюдения (интервал наблюдения — отрезок вариационного ряда, состоящий только из наработок до отказа, первой из которых предшествует, а за последней из которых следует наработка до цензурирования); r_i — количество наработок до отказа в i-том интервале наблюдения; n_i — количество наработок до цензурирования, лежащих между (i-1) и i-тым интервалами наблюдений.

Если вариационный ряд начинается с наработки до отказа, то $n_0 = 0$, а если заканчивается наработкой до отказа, то $n_m = 0$. Совокупность этих значений должна удовлетворять условиям:

$$\sum_{i=1}^{m} n_i = n, \quad \sum_{i=1}^{m} r_i = r,$$

где r — общее число наработок до отказа;

n — общее число наработок до цензурирования.

4) Исходный вариационный ряд заменяют преобразованным вариационным рядом, полученным заменой каждого члена t_i в исходном ряду членом вида

$$x_i = F\left(t_i, \hat{a}, \hat{b}\right), \quad (i = 1,2 \ldots N).$$

5) Для каждого i-го интервала наблюдения вычисляют

$$z_1^{(i)} = \frac{1}{2}\left(x_{\rho_i} + x_{\rho_{i+1}}\right);$$

$$z_1^{(i)} = \frac{1}{2}\left(x_{q_i} + x_{q_{i+1}}\right),$$

где $\rho_i = n_0 + \sum_{j=1}^{i-1}\left(n_j + r_j\right); \quad q_i = \rho_i + r_i.$

Если $\rho_i = 0$, то $z_1^{(1)} = 0$; и если $q_{ni} = N$, то $z_2^{(m)} = x_N$.

6) Вычисляют величину $T_{N,m,r}$

$$T_{N,m,r} = \sum_{i=1}^{m}\left\{\frac{1}{r_i\left(z_2^{(i)} - z_1^{(i)}\right)}\left[\sum_{j=\rho_i+1}^{j=q_i} x_j - r_i z_1^{(i)}\right]\right\},$$

где $x_0 = 0$.

7) Вычисляют величину

$$W_z = \left|\frac{T_{N,m,r} - r/2}{\sqrt{12r}}\right|.$$

8) Гипотезу о согласии выбранного закона распределения с опытными данными на уровне значимости α принимают, если полученная величина W_z меньше z_β, где z_β, — квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности $\beta = 1 - \dfrac{\alpha}{2}$.

3 Прогнозирование надежности резиновых деталей по изменению жесткостных параметров

В соответствии со сформулированными выше (см. статью в настоящем сборнике) критериями отказов в качестве основного параметра, ответственного за работоспособность резиновых деталей, может быть использован коэффициент их жесткости. Наблюдаемые изменения во времени жесткостных параметров резиновых деталей, составляющие для средне- и сильнонаполненных резин до 50-60 %, требуют своевременного прогнозирования механических свойств элементов, особенно при их использовании в резонансных машинах.

Критерием отказа при этом считается выход жесткостных параметров за пределы допустимых – для заданных условий эксплуатации увеличить формат

$$c(t) \le c_{\max},$$

где $c(t)$ – значение жесткости в момент времени t;

c_{max} – критическое значение жесткости.

На основе анализа экспериментальных данных об изменении жесткости во времени принимаем ее временную зависимость в виде [20]

$$c(t) = m + ht, \tag{17}$$

где m – начальный разброс значений жесткости, случайная величина с нормальным законом распределения;

$\overline{m}$, σ_m – параметры распределения;

h – скорость изменения жесткости, случайная величина с нормальным распределением;

h, σ_h – параметры распределения.

Показатели надежности элементов в случае (17) определяют следующим образом:

вероятность безотказной работы на заданную наработку [19, 20]

$$\begin{aligned} P(t=T) = P(c \le c_{\max}) = \frac{1}{\sigma_c\sqrt{2\pi}} \int\limits_{-\infty}^{c_{\max}} \exp\left[-\frac{(c-c_{\max})^2}{2\sigma_c^2}\right] dc = \\ = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{c_{\max} - \overline{m} - \overline{h}T}{\sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_h^2 \cdot T^2}}\right]; \end{aligned} \tag{18}$$

гамма-процентный ресурс [20]

$$t_\gamma = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + Bc_0}}{B}, \qquad (19)$$

где $\overline{m}$, σ_m, $\overline{h}$, σ_h – средние и среднеквадратические значения случайных величин m и h соответственно;

Ф – табулированная функция интеграла вероятности;

$$A = \frac{c_{\max} - \overline{m}}{\overline{h}};$$

$$B = \frac{\chi_\gamma^2 \sigma_h^2}{\overline{h}^2} - 1;$$

$$c_0 = \chi_\gamma \sigma_m^2 - A^2,$$

χ – квантили нормального распределения, соответствующие вероятности γ, при $\gamma = 90$ %, $\chi_\gamma = 1{,}645$.

4 Примеры расчета показателей надежности резиновых деталей

Расчет показателей надежности резиновых деталей с использованием распределения Вейбулла. Оценка показателей надежности резинометаллических элементов проводилась по результатам незавершенных эксплуатационных испытаний на надежность элементов типа БРМ102, установленных на конвейерах типа КВ2Т. Появление магистральных (усталостных) трещин в резиновом массиве принималось за критерий отказа элемента. Под наблюдением находилось 120 элементов, установленных на трех машинах и эксплуатируемых при частоте нагружения 11 Гц и амплитуде 0,008 м; 16 из них вышло из строя. Оставшиеся элементы находились под контролем до наработки 21000 ч (цензурирование). Зафиксированный отказ при наработке 18410 ч одного элемента повлек за собой снятие из наблюдений еще трех элементов, эксплуатирующихся с ним в одном узле (количество элементов в одном узле равно 4). Из наблюдения исключены отказы элементов, наступившие до начала усталостного разрушения эластомера.

Вариационный ряд выработок на отказ и наработок до цензурирования в этом случае

3340; 6670; 9175; 9749; 10323; 10897; 13771;

$$14125;\ 15250;\ 16075;\ 17070;\ 18410;\ 18410^{*}\ (3);\ 19080;\ 19750;\ 20420;\ 21000^{*}\ (101) \quad (20)$$

где * обозначены наработки до цензурирования, а в скобках указано их количество.

Для полученного вариационного ряда наработок на отказ оценка показателей надежности проводилась в указанной выше последовательности по составленной программе для ЭВМ. Программой предусмотрен расчет показателей надежности как по смешанной выборке вида (20), так и по однократно цензурированной выборке.

Для полученного вариационного ряда (20) оценки параметров выбранного закона распределения составляют – параметр масштаба $\hat{a} = 53455$, параметр формы $\hat{b} = 2{,}0728$. Функция распределения плотности вероятности

$$f(t) = \frac{2{,}0728}{53455^{2{,}0728}} t^{1{,}0728} \exp\left[-\left(\frac{t}{53455}\right)^{2{,}0728}\right].$$

По полученным оценкам параметров $\hat{a}$ и $\hat{b}$ распределения проводилась проверка соответствия распределения Вейбулла экспериментальным данным (20) в следующей последовательности.

1. По вариационному ряду (20) в соответствии с [20] определяли количество интервалов наблюдения $m = 2$ и значения r_i и n_i для каждого интервала

$r_1 = 13$; $r_2 = 3$;

$n_0 = 0$; $n_1 = 3$; $n_2 = 101$;

$$\rho_i = n_0 + \sum_{j=1}^{i-1}(n_j + r_j); \quad \rho_1 = 0; \quad \rho_2 = 16;$$

$$q_i = \rho_i + r_i; \quad q_1 = 13; \quad q_2 = 19.$$

Выполняем проверку правильности расчета

$$r = \sum_{i=1}^{2} r_i = 16; \quad n = \sum_{i=1}^{2} n_i = 104; \quad N = r + n = 16 + 104 = 120.$$

2. Строится преобразованный вариационный ряд в соответствии с формулой

$$x_i = F\left(t_l, \hat{a}, \hat{b}\right) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t_i}{\hat{a}}\right)^{\hat{b}}\right].$$

3. Для каждого интервала наблюдений вычисляют величины

$$z_1^{(1)} = 0{,}0; \quad z_2^{(2)} = 0{,}1077;$$

$$z_2^{(1)} = 0{,}1039; \quad z_2^{(2)} = 0{,}1307.$$

4. Вычисляют величину $T_{N,m,r}$

$$T_{N,m,r} = 1{,}0221.$$

5. Вычисляют W_z

$$W_z = 0{,}504.$$

Так как $0{,}504 < z_{1}^{1-0{,}1/2} = 1{,}645$, то опытные данные не противоречат гипотезе о распределении Вейбулла наработок на отказ на уровне значимости $\alpha = 0{,}1$ ($\gamma = 90\%$).

С учетом полученных оценок параметров распределения Вейбулла показатели надежности БРМ имели следующие значения: средний ресурс наработки $t_{cp} = 47350$ ч; гамма-процентный ресурс $t_{\gamma=90\%} = 18051$ ч, его доверительный интервал [13635; 22467]; вероятность безотказной работы на наработку $T = 21000$ $P(t=21000) = 0{,}860$ и ее доверительный интервал [0,805; 0,927]. Полученные результаты хорошо согласуются с аналитическими расчетами долговечности БРМ102 [1,2]. Приведенное значение параметра формы $\hat{b}$ соответствует значению этого параметра для данного вида отказа [52]. В дальнейшем при накоплении информации об отказах оценки параметров распределения Вейбулла и показателей надежности будут уточняться, проводиться классификация по видам отказов в зависимости от расчетных значений параметра.

Пример расчета показателей надежности ВРМ. Оценку показателей надежности виброизоляторов выполним по результатам незавершенных эксплуатационных испытаний элементов типа ВРМ с размером резинового массива – диаметр 200 мм, высота 100 мм. Эти элементы использованы в виброизолирующих системах однобарабанных окомкователей, эксплуатирующихся в условиях аглофабрики Ждановского металлургического завода.

За критерий отказа виброизолятора принималось появление магистральных (усталостных) трещин в резиновом массиве элемента.

Под наблюдением находилось 56 элементов, установленных на двух машинах, и эксплуатируемых при частоте нагружения 16 Гц, 20 виброизоляторов вышли из строя. Оставшиеся элементы продолжали работать, и наработка каждого на настоящее время составила 54000 ч.

Вариационный ряд наработок на отказ и наработок до цензурирования получен следующий: 20000 (4), 20000*(4), 40000 (12), 54000* (36), где * обозначены наработки до цензурирования, а в скобках указано количество элементов.

Для полученного вариационного ряда оценки параметров распределения Вейбулла составляют – параметр формы $\widehat{b} = 2{,}4082$; параметр масштаба $\widehat{a} = 81060$. Гипотеза соответствия распределения Вейбулла полученному ряду наработок на отказ ВРМ не противоречива на уровне значимости $\alpha = 0{,}1$.

Вычисленные в соответствии с приведенными выше формулами показатели надежности имели следующие значения: девяностопроцентный ресурс $t_{\gamma=90\%} = 31840$ (более 4-х лет) и его доверительный интервал [22419; 41261]; вероятность безотказной работы на наработку $T = 29280$ (4 года) $P(t = 29280) = 0{,}918$. Полученные результаты хорошо согласуются с аналитическими расчетами долговечности ВРМ и исходным требованиям на разработку их параметрического ряда. Приведенное значение параметра формы $\widehat{b}$ соответствует значению этого параметра для данного вида отказа [53]. Однако полученные результаты, вследствие ограниченности выборки об отказах ВРМ, следует рассматривать как прикидочные, и, по мере накопления такой информации, оценки параметров распределения Вейбулла и показателей надежности необходимо уточнять в рамках данного подхода.

Прогнозирование надежности резиновых деталей по изменению их жесткостных параметров. Прогнозирование показателей надежности резиновых деталей по изменению их жесткости рассмотрим на примере изменения жесткости резинометаллических элементов типа БРМ102 из резины 51-1562, установленных в различных узлах виброконвейера КВ2Т. В таблице 1 приведены значения жесткостей $c1$, $c2$, $c3$, соответственно трем элементам.

Таблица 1 – Изменение жесткости элементов

10^{-3}, ч	$c1$, кН/м	$c2$, кН/м	$c3$, кН/м
0,0	197	250	249
1,5	221	277	256
3,0	235	286	270
4,5	238	297	273
6,0	239	300	274
9,0	239	300	275
12,0	239	300	275
15,0	239	300	275
18,0	239	300	275
21,0	239	300	275
24,0	239	300	275

Предельным значением жесткости элементов в соответствии с критерием разрушения взято ее увеличение на 20-25 %: c_{max} = 312,5 кН/м. Для числовых данных табл. 4 получаем следующие значения параметров: m = 254,98; σ_m = 13,44; $\bar{h}$ = 0,00096 и $\sigma_h = 0{,}212 \cdot 10^{-3}$.

Показатели надежности определяем по формулам (18), (19), и в этом случае они имеют следующие значения: гамма-процентный ресурс $t_{\gamma=90\%}$ = 43023 ч; – вероятность безотказной работы на наработку T = 20000 -$P(t = 20000)$ = 0,996.

Полученные результаты по оценке надежности БРМ свидетельствуют о высоком уровне ресурса, в течение которого с большой степенью вероятности сохраняется их работоспособность. По мере накопления информации об отказах и изменении во времени жесткостных параметров необходимо проводить корректировку оценок показателей надежности в рамках указанного методического подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ройтман А.В., Кулик В.П. Модели повышения надежности. (Обзор зарубеж-

ных исследований за 1968-1978 гг.) //Новое в зарубежном авиадвигателестроении. – М.: Изд-во ИИ АН, 1982. -№ 1. -С. 19-26.
2. Codier E.O. Reliability in third generation // Proc. Akur. Reliab and Maintain. – New York. –1971. –P. 129-134.
3. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. -492 с.
4. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. –М.: Наука, 1969.-576 с.
5. Гнеденко В.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. –М.: Наука, 1965. –524 с.
6. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
7. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. –М.: Машиностроение, 1964. –275 с.
8. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
9. Фрейденталь А.М. Статистический подход к хрупкому разрушению // Разрушение. –М.: Мир, 1975. –Т. 2. –С. 616-645.
10. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. –М.: Наука, 1965. –524 с.
11. Герцбах И.Б., Кордонский Х.В. Модели отказов. –М.: Советское радио, 1966. –166 с.
12. Кордонский Х.Б., Фридман Я.Ф. Некоторые вопросы вероятностного описания усталостной долговечности: обзор // Заводская лаборатория. –1976. –№ 7. – С. 829-847.
13. Гардинер К.В. Статистические методы в естественных науках. – М.: Мир, 1986. – 528 с.
14. Самаха М., Санкар Т.С. Динамические приемочные испытания станков, основанные на нелинейной стохастической модели // Груды американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. –М.: Мир, 1980. –Т. 102, № 1. –С. 41-51.
15. Sitzer Michael R. Stochastic damage model for non-linear visco-elastic material // Forschungim Ingenierwesen. –1984. –V. 50, № 5. –P. 148.
16. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др. –М.: Машиностроение, 1987. –Т. 2. Математические методы в теории надежности и эффективности / Под ред. Б.В. Гнеденко. –М.: Машиностроение, 1987. –280 с.
17. Ивлев В.В. Надежность систем из однотипных элементов. –М.: Радио и связь, 1986. –96 с.
18. Карбасов О.Г. Проблемы оценки и расчета надежности резиновых технических изделий // Каучук и резина. – 1980. –№ 4. –С. 23-25.
19. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
20. Временное практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению надежности машиностроительной продукции. –М.: ВНИИНМАШ, 1986. –65 с.
21. Воинов К.Н. Прогнозирование надежности механических систем. –Л.: Машиностроение, 1978. –208 с.
22. Машиностроение: Энциклопедия. Ред. совет: Фролов К.В. и др. –М.: Машиностроение. Надежность машин. –Т. IV-3 / Клюев В.В., Болотин В.В., Соснин Ф.Р. и др.; Под общ. ред. Клюева В.В. -1998. –592 с.
23. Болотин В.В. Введение в теорию и практику надежности//Конструирование машин. Справочно-методическое пособие / Под обшей ред. К.В. Фролова. -Т. 2. Под ред. А.П. Гусенкова, А.Ф. Крайнева. –М.: Машиностроение, 1992.

– С. 521-545.
24. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. –М.: Машиностроение, 1990. - 448 с.
25. Надежность в машиностроении: Справочник. Ред. Шашкин В.В., Карзов Г.П. – С.Пб.: Политехник, 1992. –719 с.
26. Надежность в технике. Научно-технические, экономические и правовые аспекты надежности, методическое пособие/Ред. Болотин В.В. –М.: МНТК «Надежность машин», 1993. –253 с.
27. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. -М.: Машиностроение. –Т. 1, 1986. –224 с.; т. 2, 1987. –280 с.; т. 3, 1988. –328 с.; т. 4, 1987. –280 с.; т. 5, 1988. –316 с.; т. 6, 1989. –280 с.; т. 7, 1990. –320 с.; т. 9, 1987. –352 с.; т. 10, 1990. –336 с.
28. Надежность машиностроительной продукции. Практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению. –М.: Изд-во стандартов, 1990. - 328 с.
29. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник в 4-х томах. т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики/Ред. Руденко Ю.Н. – М.: Энергоиздат, 1994. – 474 с.
30. Надежность технических систем. Справочник. –М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
31. Миллер Д., Суэйн А. Ошибки человека и его надежность: Человеческий фактор. –М.: Мир, 1991, т. 1. –С. 360-417.
32. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. - Київ: Держстандарт України, 1995. –33 с.
33. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Программа забезпечення надійності. Загальні вимоги. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 30 с.
34. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. -Київ: Держстандарт України, 1995. – 33 с.
35. Определение показателей надежности эластомерных элементов машин / Дырда В.И., Твердохлеб Т.Е., Монастырский В.Ф. и др.//Труды II Международного симпозиума по механике эластомеров, Днепропетровск, 23-25 июня 1997 г. – Днепропетровск: Полиграфист, 1998. – С. 235-295.
36. Переверзев Е.С. Модели накопления повреждений в задачах долговечности. – Киев: Нук. думка, 1995. – 358 с.
37. Переверзев Е.С., Даниев Ю.Ф. Испытания и надежность технических систем. –Днепропетровск: 1999. –217 с.
38. Пампуро В.И. Структурная информационная теория надежности систем. – Киев: Наук, думка, 1992. –238 с.
39. Тимашев С.А. Надежность больших механических систем. –М.: Наука, 1982. –184 с.
40. Труханов В.М. Надежность изделий машиностроения. Теория и практика. –М.: Машиностроение, 1996. –336 с.
41. Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984. –518с.
42. Probabilistic Safety Assessment. -New York: American Nuclear Society, 1993 –Vol. 1. -744 p.
43. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. –М.: Машиностроение, 1968. –400 с.
44. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер Г.А. Физико-химическая механика металлов. –М.: Изд-во АН СССР, 1962. –303 с.
45. Захарьев Г.А. Достижения в области конструирования резиновых технических

изделий // Каучук и резина. –1980. –№ 4. –С. 15-18.
46. Карбасов О.Г., Меняк В.Я. Прогнозирование среднего ресурса работоспособности клиновых ремней // Каучук и резина. –1970. –№ 1. –С. 37-38.
47. Проблемы оценки и расчета надежности резиновых технических изделий // Каучук и резина. –1980. –№ 4. –С. 30-34,
48. Ротенберг Р.В. Надежность машин и идеи резервирования//Вестник машиностроения. –1968. -№ 10. –С. 19-23.
49. РД 50-690-89. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. –Введ. 01.01.91 до 01.01.94. –М.: Изд-во стандартов, 1990. –131 с.
50. Ллойд Д.К., Липов М. Надежность: организация исследования, методы, математический аппарат. –М.: Советское радио, 1964. –688 с.
51. Айвязан С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. -М.: Финансы и статистика, 1989. –607.
52. Меняк В.Я., Горелик В.М., Карбасов О.Г. Влияние вида отказа резиновых деталей на параметры математической модели надежности // Каучук и резина. –1973. –№ 5. –С. 39-44.
53. Горелик В.М., Меняк В.Я., Шляхман А.А. Применение распределения Вейбулла при оценке надежности резинотехнических изделий // Производство шин, РТИ и АТИ. -М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1975. –№ 1. –С. 47-50.

УДК 678.021:678.7

Гоголев А.А., Смирнов А.Г., Дзюра Е.А.,
Науменко А.П., Закирова В.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ БРЕКЕРНЫХ РЕЗИН К ЛАТУНИРОВАННОМУ МЕТАЛЛОКОРДУ

Виконано дослідження нового адгезійного модифікатора ADE-10МБ у рецептурі брекерних сумішей, показано що він дозволить поліпшити міцність та адгезію гуми до металокорду, значно покращить санітарно-токсикологічні умови в робочій зоні.

INVESTIGATION OF PECULIARITIES OF MODIFYING SYSTEM FOR ADHERING OF BREAKER RUBBERS TO BRASS STEEL CORD

The examinations of the new adhesiveness modifier ADE-10MB in the formula of belt intermixtures are executed, is shown, that it will allow to improve strength and adhesion of gum to a steel cord, considerably refines sanitary-toxicological environment in a working area.

Непрерывно расширяющийся ассортимент грузовых шин радиальной конструкции, предназначенных для автомобилей марки МАЗ, КрАЗ, КамАЗ большой грузоподъемности, эксплуатирующихся при повышенных нагрузках и скоростях движения, обусловливает необходимость дальнейшего совершенствования комплекса