

УДК 539.3:629.3.027.52

А.А. ЛАРИН, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ».

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН С УЧЕТОМ СТАРЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Работа посвящена созданию подхода к прогнозированию усталостного ресурса и процесса накопления нелокализованной повреждаемости в пневматических шинах, который учитывает случайную вариацию частоты цикла нагружения шины и естественные деградационные процессы в ее материалах (старение).

Ключевые слова: пневматическая шина, надежность, ресурс, усталость, старение резиноподобных материалов, эластомеры.

Введение. Безотказная работа пневматических шин является одним из определяющих показателей в надежности всего транспортного средства. Достоверный прогноз ресурса шин позволяет предотвратить их отказы в эксплуатации и, таким образом, повысить безопасность движения транспорта и уменьшить экономические затраты. Среди основных типов отказов пневматических шин следует отметить отказы которые реализуются в результате механических повреждений, износа элементов протектора и развития усталостных внутренних дефектов [1-3]. Последние являются постепенными отказами, формируются во время эксплуатации и являются не восстанавливаемыми.

Надежность шин определяется их конструкцией, физико-механическими характеристиками материалов и условиями эксплуатации [4-5]. В данной работе проведено изучение надежности пневматических шин по критериям усталости. Постепенные отказы (износ и усталость) формируются под влиянием напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов пневматической шины, которое реализуется в процессе ее работы. Таким образом, важными аспектами при моделировании работы шин и прогнозировании их безотказной работы является корректный учет нагрузок, действующих на шину в эксплуатации, и достоверное определение ее НДС.

Изучение закономерностей формирования НДС в элементах шин представляет сложную научно-практическую проблему вследствие целого ряда особенностей [6-8]: трехмерная геометрия, многослойная структура, большие прогибы при деформации, наличие контактного взаимодействия с дорожным покрытием, а также наличие криволинейной ортотропии свойств.

Отдельной проблемой в вопросах построения математических моделей шин и проведения на их основе расчетов является проблема учета неоднородной структуры ее отдельных слоев [8, 9]. Так, в шине присутствуют композиционные слои, а именно, каркас и брекер, которые в своём составе имеют металлический и текстильный корды.

Для корректного учета перечисленных особенностей в работе применяются подробные трёхмерные конечно-элементные (КЭ) модели.

Естественно, что определение НДС зависит не только от математического модели описывающей свойства и особенностей исследуемого объекта, но и от корректности моделирования нагрузок и других внешних факторов, которые действуют на шину. При этом следует отметить, что в процессе эксплуатации изменение параметров нагрузок носит случайный характер.

© А. А. Ларин, 2014

Кроме этого следует отметить, что резино-подобные материалы, которые лежат в основе структуры пневматической шины имеют достаточно незначительный срок активации процессов старения [10-11]. Так, прочностные свойства шинных материалов снижаются более чем в 3 раза за 4 года эксплуатации. Естественно, данное явление должно учитываться при анализе усталостной надежности и прогнозах ресурса.

Цель работы. Таким образом, разработка подхода к прогнозированию надежности пневматических шин на основе детальных КЭ моделей с учетом случайного изменения параметров нагружения, а также процесса деградации прочностных свойств резино-подобных материалов является актуальной научно-практической проблемой, определяющей цель данной статьи.

Постановка задачи. В данной работе рассматривается прогнозирование ресурса в результате отказов много-циклового усталости. Ресурс определяется по степени накопления нелокализованной повреждаемости. Применяется классический степенной закон кинетики накопления усталостной повреждаемости [12, 13] в рамках концепции эффективных напряжений Работнова-Качанова [13,14]:

$$\tilde{\sigma}_a = \frac{\sigma_a}{1-D}, \quad (1)$$

где σ_a – амплитудные напряжения цикла, $D(t)$ – функция меры повреждаемости

Таким образом, кинетика роста повреждаемости описывается уравнением [12-15, 20,21]:

$$\frac{d}{dt}D = B(\tilde{\sigma}_a)^c = B\left(\frac{\sigma_a}{1-D}\right)^c, \quad (2)$$

где t – время, B и c – константы кинетического уравнения, которые определяются экспериментально и в общем случае зависят от усталостных свойств материала и могут быть выражены через параметры кривой Веллера [15]. При этом, уравнение (2) может быть выписано в виде

$$\frac{d}{dt}D = \left(\frac{\sigma_a}{1-D}\right)^m \cdot \frac{\omega}{N_0 \cdot \sigma_{-1}^m \cdot (m+1)}, \quad (3)$$

где ω – частота цикла изменения напряжений (деформаций) во время работы шины, N_0 – базовое число циклов до разрушения, m – параметр кривой Веллера, σ_{-1} – предел усталости.

Критерием отказа в рамках данного рассмотрения будет условие равенства единице параметра повреждаемости $D(t)$. Исходя из выражения (1) достижение граничного значения будет означать нарушение сплошности материала, т.е. возникновение макро трещины. Соответственно, ресурс в данной работе трактуется как время до зарождения в конструкции макроскопической усталостной трещины.

Характеристики нагружения. Уравнение (3) описывает накопление усталостной повреждаемости во времени при циклическом изменении напряжений.

Таким образом, важной составляющей в решении задачи определения ресурса шины, является определение параметров цикла изменения напряжений в конструкции шины, которые определяются: амплитудой напряжений (σ_a) и частотой цикла (ω), формирующимися под действием эксплуатационных нагрузок.

Основной циклической нагрузкой на колесо является цикл изменения напряжений при обороте колеса во время движения, т.е. это напряжения возникающие при входе/выходе сечения шины в контакт с дорогой. Амплитуды этого цикла безусловно имеют некоторую вариацию, связанную с колебаниями и наездами на различные неровности дороги, тем не менее данная вариация на много меньше основного цикла связанного с деформированием шины при входе в контакт и определяющегося статическим уровнем обжатия шины вертикальной силой вызванной влиянием веса снаряженного автомобиля.

Частота цикла, естественно, зависит от скорости движения транспортного средства, и как следствие не может быть четко задана так как носит случайный характер. Будем предполагать, что скорость движения транспортного средства есть стационарный случайный процесс, т.е. вероятностные характеристики этого процесса не зависят от начала отсчета времени (от начала наблюдения за данным процессом). Вероятностные характеристики такого процесса следует определять из данных статистики по эксплуатации данной конструкции или ее прототипа. При этом необходимо знать математическое ожидание, дисперсию и корреляционную функцию частоты.

На рис. 1 приведено реализацию изменения скорости движения легкового транспортного средства, совершающего движение в городском цикле (город с миллионным населением) в течении 3х часов (данные в рамках европейского проекта FP5[16]). Статистические данные по исследованиям приведены в табл. 1

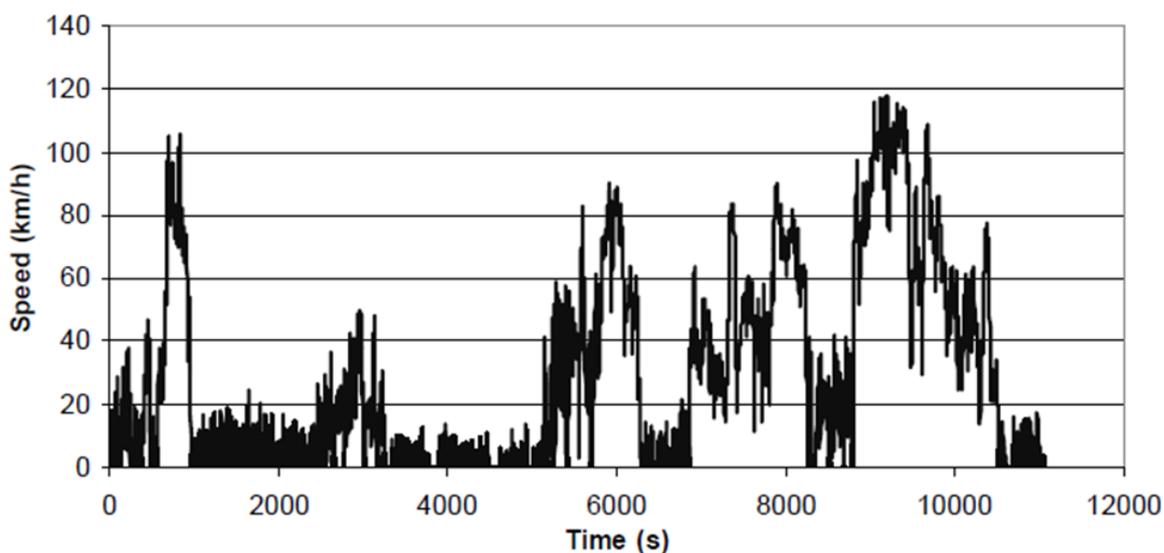


Рисунок 1 –Типичная реализация изменения скорости движения легкового транспортного средства в городском цикле (европейский город с миллионным населением)

Таблица 1 – Статистические данные по реализации изменения скорости движения легкового транспортного средства в городском цикле (европейский город с миллионным населением)

Статистический показатель	Значение
Пройденный путь	87270.37 км
Время в течении которого проводилось измерение	11061 с
Средняя скорость	28.4км/ч
Количество остановок	161
Среднее время движения между остановками	38.7 с
Средняя продолжительность остановки	12.67 с
Средняя скорость движения	34.83км/ч
Средне квадратичное отклонение скорости движения	30.72 км/ч
Среднее положительное ускорение	0.4 м/с ²

Задание скорости движения транспортного средства, а затем и частоты изменения цикла напряжений в шине, как случайного стационарного процесса требует определения корреляционной функции. Достоверное определение последней достаточно затруднено поэтому на практике имеет смысл априорно постулировать вид корреляционной функции, и определять только ее параметры.

В данной работе предлагается воспользоваться в качестве такой аппроксимации экспоненциальным законом [15,17], параметрами которого являются дисперсия (σ_ω^2) и интенсивность (λ_ω) частоты возникновения опасного режима

$$K_\omega(t_1, t_2) = \sigma_\omega^2 \cdot \exp(-\lambda_\omega \cdot |t_2 - t_1|). \quad (4)$$

Параметр интенсивности определяется исходя из времени корреляции, т.е. промежутка времени за который предполагается исчезающим статистическое влияние частоты возникновения опасного режима имевшей место к моменту времени t_1 на частоту возникновения этого режима к моменту времени t_2 . Таким образом, время корреляции может быть задано исходя из особенностей эксплуатации конструкции или для стационарного случайного процесса вычислено по формуле [17]:

$$\tau_{ок} = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \int_0^\infty K(\tau) d\tau, \quad \tau = t_2 - t_1. \quad (5)$$

Таким образом, задавшись временем корреляции для частоты возникновения опасного режима и учитывая принятый вид корреляционной функции, можно определить интенсивность частоты возникновения опасного режима:

$$\lambda_\omega = 1/\tau_{ок}. \quad (6)$$

В данной работе при вычислениях время корреляции определялось как среднее значение времени между остановками транспортного средства, т.е. считается что статистическая связь (статистическое влияние) скорости движения исчезает после остановки транспортного средства (на пример на светофоре).

Построение трехмерной КЭ модели шины и расчет ее НДС. Для определения значений амплитуд напряжений цикла предлагается в данной работе воспользоваться КЭ моделированием. Построение модели проводилось в соответствии с методикой проектирования шин предложенной в работе [18]. При этом было построено плоский профиль шины (модель 215/55R16), которая учитывает ее внутреннюю структуру (слоя каркаса, брекера и боковины; бортовую зону; протектор и т.д.) и позволяет задавать различные свойства материалов для каждого структурного элемента. После чего было проведено «вытягивание» профиля шины вокруг оси, что привело к формированию трехмерной объемной КЭ модели. Геометрически данная модель является осесимметричной, что подразумевает некоторые упрощения в представлении протектора. Однако основное внимания в данной работе уделяется определению НДС во внутренних слоях шины и поэтому соответствующие упрощения являются вполне приемлемыми. Созданная математическая модель приведена на рис. 2. Модель построена на основе трехмерных изопараметрических 8-ми узловых КЭ преимущественно гексагональной формы.

Кроме элементов шины в модели также присутствуют диск и дорожное полотно. Данные элементы промоделированы упрощенно, так как их рассмотрение необходимо лишь в интегральном смысле: учета влияния на деформирование шины. Диск и шина предполагаются соединенными абсолютно жестко, а взаимодействие шины с дорогой реализовано, как контактное с учетом сил сухого трения, заданных по закону Кулона.

В качестве основных эксплуатационных нагрузок, действующих на шину принимаются: внутреннее давление (0,22 МПа) и вертикальная сила (5 кН) приложенная в центр диска колеса и моделирующая основную нагрузку от веса снаряженного автомобиля.

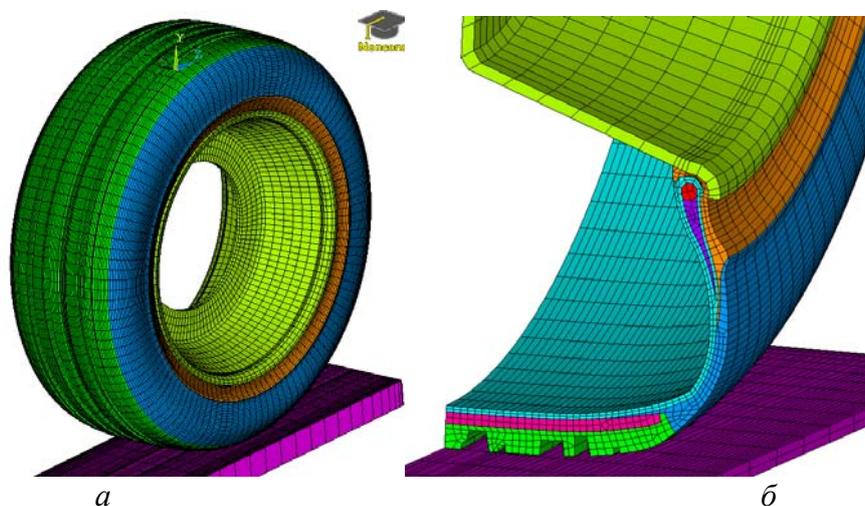


Рисунок 2– КЭ модель шины 215/55R16
а – общий вид 3d модели; б – увеличенный сектор

Задача решалась в упругой постановке. Материал считался физически линейным, но модель предполагала наличие больших прогибов, т.е. постановка была геометрически нелинейной [6]. Свойства шинных материалов задавались в соответствии с обобщенным законом Гука и по рекомендациям [8,9].

Результаты расчетов приведены на рис. 3. Максимальные деформации наблюдаются в области бортовой зоны и достигают 19%. Отдельно следует отметить

наличие существенных уровней интенсивности деформации в плечевой области шины (15%). Аналогичным образом распределяются и эквивалентные напряжения.

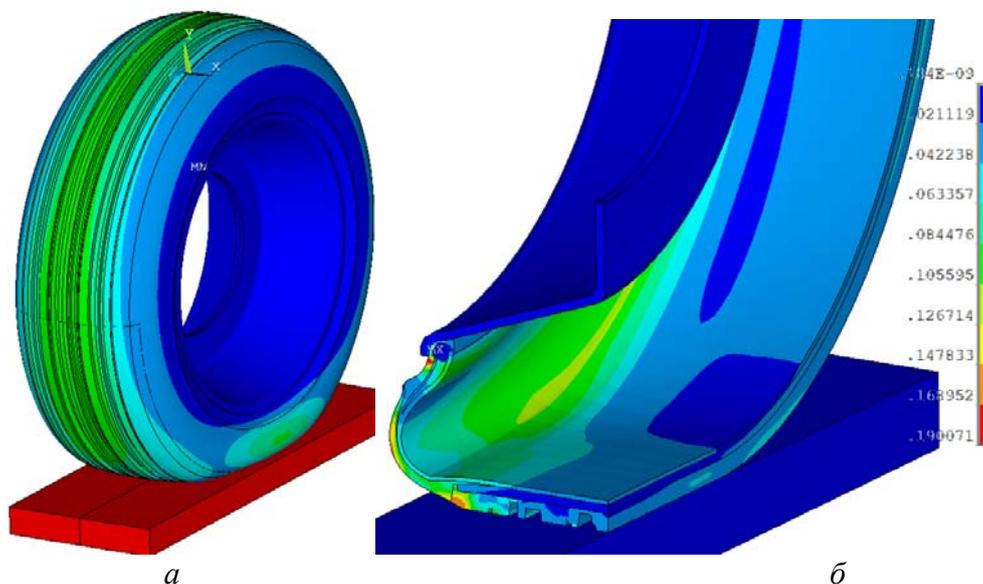


Рисунок 3 – Деформирование шины в контакте с дорогой
а – общий вид прогиба; б – распределение интенсивности деформаций по слоям

Моделювання деградації свойств матеріала в результаті старіння резини. Прямое применение формулы (3) для средних значений частоты цикла и амплитуд напряжений приводит к завышенному по сравнению с имеющимися на практике статистическими данными значению ресурса. Последнее обстоятельство связано с не учетом процессов естественного старения резино-подобных материалов. Так, известно, что естественное старение резины в течении 4 лет приводит к уменьшению ее статической и усталостной прочности более чем в 3 раза [10, 11]. В литературе предлагается применять экспоненциальную или гиперболическую зависимость процесса снижения прочности. Отталкиваясь от экспериментальных данных приведенных в [10] в данной работе предлагается использовать зависимость вида:

$$\sigma_{-1}(t) = \sigma_{-1}^* \cdot \varphi(t), \quad \varphi(t) = \left[\frac{1}{1 + \beta \cdot t} \right] \quad (7)$$

где β – параметр аппроксимации, σ_{-1}^* – предел усталостной прочности для не деградированного материала. График изменения предела усталости во времени представлен на рис. 4,а.

Следует отметить необходимость учета разброса в значениях предела усталости. Очевидно, что в процессе старения материала данная неопределенность сохраняется или даже увеличивается. Поэтому будем полагать, что предел усталости представляет собой произведение нормированной к единице функции времени, аппроксимирующей процесс деградации $\varphi(t)$ и значения предела усталости в начальный момент времени являющейся случайной величиной, которая предполагается (согласно рекомендациям

работ [15,19-21]) подчиняющейся логарифмически-нормальному закону распределения плотности вероятности:

$$f_1(\sigma_{-1}^*) = \frac{1}{\sigma_{-1}^* s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln(\sigma_{-1}^*) - \mu]^2}{2s^2}\right), \quad (8)$$

где s и μ – параметры распределения, которые определяются из значений математического ожидания и дисперсии или коэффициента вариации предела усталости

$$\langle \sigma_{-1}^* \rangle = \exp\left(\mu + \frac{s^2}{2}\right),$$

$$Var[\sigma_{-1}^*] = [\exp(s^2) - 1] \cdot \langle \sigma_{-1}^* \rangle^2, \quad V_{\sigma_{-1}^*} = \frac{\sqrt{Var[\sigma_{-1}^*]}}{\langle \sigma_{-1}^* \rangle} = [\exp(s^2) - 1]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

В формулах введено обозначения: $\langle \dots \rangle$ – оператор математического ожидания, $Var[\dots]$ – оператор взятия дисперсии, $V_{\sigma_{-1}^*}$ – коэффициент вариации.

Таким образом, изменение предела усталости представляет собой случайный нестационарный процесс. Одномерная плотность вероятности этого процесса представляется, как линейное функциональное преобразование (7) случайной величины σ_{-1} и имеет вид:

$$f(\sigma_{-1}, t) = \frac{1}{\sigma_{-1} s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left[\frac{\ln(\sigma_{-1}) - \mu - \ln \varphi(t)}{2s}\right]^2\right). \quad (10)$$

На рис.4,б графически представлена одномерная плотность вероятности случайного процесса падения предела усталостной прочности во времени.

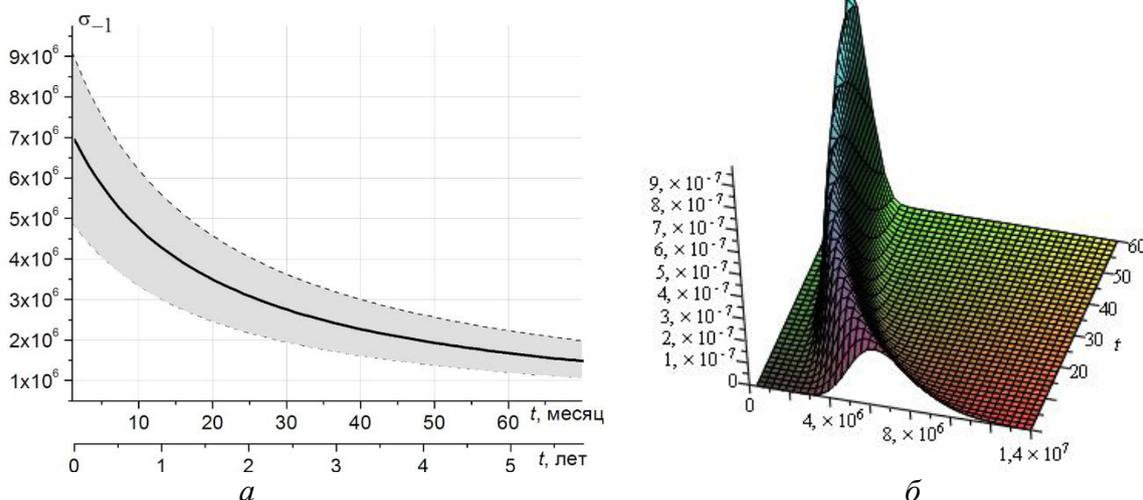


Рисунок 4 – Аппроксимации падения предела усталости в результате естественного старения (а) и график одномерной плотности вероятности предела усталости (б)

Прогнозирование надежности пневматических шин. Из выше отмеченного выходит, что процессы накопления усталостив пневматических шинах могут быть описаны уравнением (3) с учетом того, что частота цикла изменения напряжений и характеристики длительной прочности (предел усталости) изменяются во времени как случайные процессы. Таки образом, задача оценки ресурса сводится к проблеме определения вероятностных характеристик повреждаемости как случайной функции времени заданной дифференциальным уравнением со случайной правой частью:

$$\frac{d}{dt}D(t) = \left(\frac{\sigma_a}{1-D(t)} \right)^m \cdot \frac{\omega(t)}{N_0 \cdot \sigma_e^m(t) \cdot (m+1)}. \quad (11)$$

Решение данной математической задачи подробно описано в [15,21]. Результатом решения является одномерная плотность вероятности заданная как функция времени и повреждаемости следующим выражением

$$f_D(D,t) = \frac{(m+1)(1-D)^m}{\sqrt{2\pi Var[U(t)]}} \exp\left(-\frac{1-(1-D)^m - \langle U(t) \rangle}{Var[U(t)]}\right). \quad (12)$$

В котором присутствуют функции времени, являющиеся вероятностными характеристиками дополнительно введенной стационарной случайной функции $U(t)$: ее математическое ожидание $\langle U(t) \rangle$ и среднеквадратичное отклонение $Var[U(t)]$. Данные характеристики имеют квадратурные формулы полученные в [15,20,21].

Так, среднее значение функции $U(t)$ определяется по формуле:

$$\langle U(t) \rangle = \psi \cdot \langle \omega \rangle \cdot \langle \chi^{-m} \rangle \cdot \int_0^t \varphi^{-m}(t') dt', \quad (13)$$

где $\langle \omega \rangle$ – средняя частота цикла изменения напряжений, ψ – детерминированный коэффициент, который определяется формулой (14), а χ – случайная величина, которая подчиняется логнормальному закону и задается выражением (15).

$$\psi = \frac{\sigma_a^m}{N_0(m+1)}. \quad (14)$$

$$\chi = \frac{\sigma_{-1}^*}{\langle \sigma_{-1}^* \rangle}. \quad (15)$$

Среднеквадратичное отклонение функции $U(t)$ определяется из ее корреляционной функции по определению корреляционной функции случайного процесса [17].

$$Var[U(t)] = K_U(t_1 = t, t_2 = t). \quad (16)$$

Подробности получения аналитического выражения для корреляционной функции от функции $U(t)$ так же приведено в работах [15, 20,21], поэтому, не

останавливаясь на математических подробностях, достаточно указать ее вид в квадратурах:

$$K_U(t_1, t_2) = \psi^2 \cdot \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} \frac{\langle \chi^{-2m} \rangle (K_\omega(t', t'') + \langle \omega \rangle^2) - \langle \omega \rangle^2 \langle \chi^{-m} \rangle^2}{\varphi^m(t') \cdot \varphi^m(t'')} dt' dt'' . \quad (17)$$

Используя известное из (12) выражение для плотности вероятности повреждаемости можно вычислить математическое ожидание и дисперсию повреждаемости как функций времени

$$\langle D(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} D \cdot f_D(D, t) dD, \quad Var[D(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} [D - \langle D(t) \rangle]^2 f_D(D, t) dD . \quad (18)$$

Полученные характеристики процесса накопления повреждаемости в шине для различных вариантов загруженности использования транспортного средства приведены на рис. 5. Результаты приведены для резины брекерной зоны шины. В качестве временной меры отмечены месяцы.

Проведено два расчета для оценки влияния характера использования (загрузки) транспортного средства на усталостный ресурс шины:

- транспортное средство используется частным лицом в некоммерческих целях (2 часа в день 6 дней в неделю)
- транспортное средство используется в коммерческих целях (8 часов 5 дней в неделю).

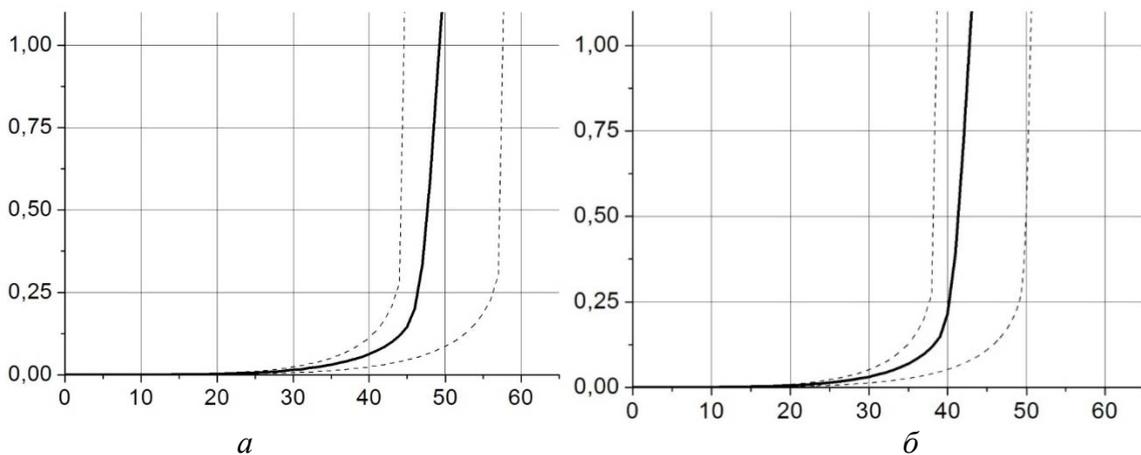


Рисунок 5 –Зависимости средней повреждаемости и ее доверительного интервала для брекерной зоны пневматической шины при малом (а) и загруженном (б) режимах использования транспортного

Выводы. Таким образом, в работе рассмотрен подход к прогнозированию усталостного ресурса и процесса накопления нелокализованной повреждаемости в пневматических шинах, который учитывает случайную вариацию частоты цикла нагружения шины и естественные деградационные процессы в материалах (старение).

Список літератури: 1. Бухин Б.Л. Введение в механику пневматических шин / Б.Л. Бухин. – М.: Химмия, 1988. – 224с. 2. Сасов А.А. Прогнозирование выходных характеристик шин сверх низкого давления для автомобилей и тракторов. Дис... канд. техн. наук.- Днепропетровск, 2007.-210с. 3. Clark S.K. The pneumatic tire / S.K. Clark (Chairman of Editorial Board) et al // National Highway Traffic Safety Administration. USA Dep. Of Transportation, 2006, Pp. 707. 4. Жовдак В.А. Прогнозирование надежности механических систем / В.А. Жовдак, Л.Ф. Тарасова.– Харьков: НТУ ХПИ, 2007.– 108 с. 5. Ларин А.А. Прогнозирование и анализ надежности машиностроительных конструкций / А.А. Ларин. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011.–128 с. 6. Ларин О.О. Моделирование контактной взаимодействия пневматических шин с дорожной поверхностью с учетом геометрической та физической нелинейности их деформирования / А.А. Кондрикова, О.О. Ларин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наук. Праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин.– Харків: НТУ «ХПИ», 2011.– №52.– С. 94-101. 7. Pelc J. Towards realistic simulation of deformations and stresses in pneumatic tyres / J. Pelc // Applied Mathematical Modelling, 2007. – Vol 31. – Pp. 530–540. 8. Ларин О.О. Розробка багатошарової 3D комп'ютерної моделі пневматичної шини з урахуванням ортотропії її механічних властивостей / О.О. Ларин, Ю.В. Арефін, О.І. Субочев, О.М. Ларин // Вісник Севастопольського національного технічного університету, Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2011.– №121.– С. 102-105. 9. Larin O. Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres / Mateichyk V., Petrova Yu., Larin O. // Systems and means of motor transport. Selected problems.– Monographia N 4. Seria: Transport. – Rzeszow: Politechnika Pzeszowska Im. Ignacego Lukasiewicza, 2013. –Pp. 123-128. 10. Baldwin J.M. Rubber aging in tires. Part 1: Field results / John M. Baldwin, David R. Bauer, Kevin R. Ellwood // Polymer Degradation and Stability. – № 92, 2007. – Pp. 104-109. 11. Roland C.M. Aging of natural rubber in air and sea water / P. H. Mott, C. M. Roland // Rubber Chemistry and Technology. – Vol. 74, 2007. – Pp. 79-88. 12. Lvov G.I. Theoretical and experimental study of fatigue strength of plain woven / epoxy composite. / Lvov G.I., Movavgar A. // Strojniskivestnik – Journal of Mechanical Engineering 58(2012)3, 2012, pp. 175-182. 13. Lemaitre J. Engineering damage mechanics: ductile, creep, fatigue and brittle failure / Lemaitre J., Desmorat R.. – Springer, New York., 2005. 14. Murakami S. Continuum Damage Mechanics “A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture” / Murakami S.. – Springer, 2012. 15. Vodka O. O. The fatigue life-time propagation of the connection elements of long-term operated hydro turbines considering material degradation / O.O. Larin, O.I. Trubayev, O.O. Vodka // PNRPU Mechanics Bulletin. – Perm: Perm National Research Polytechnic University. – 2014.– №1. – С. 164–190. 16. Barlow T.J. A reference book of driven cycles for use in measurements of road vehicle emissions. Published project report PPR354 / T.J. Barlow, S. Latham, I.S. McCrae and P.G. Boulter. – TRL Limited, Ver. 3, 2009. 17. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций / Арам Арутюнович Свешников. – М. – Наука, 1968. – 464 с. 18. Baldwin J.M. Rubber aging in tires. Part 1: Field results / John M. Baldwin, David R. Bauer, Kevin R. Ellwood // Polymer Degradation and Stability. – № 92, 2007. – Pp. 104-109. 19. Ларин А.А. Компьютерное автоматизированное проектирование пневматических шин легковых автомобилей / А.А. Ларин, М.И. Лобас // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. - Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2011. – Вып. 50, 2011, 68-74 с. 20. Zako M. On stochastic evaluation of S-N data based on fatigue strength distribution / S. Hanaki, M. Yamashita, H. Uchida, M. Zako // International Journal of Fatigue, 2010; 32(3). 21. Vodka A. A. Прогнозирование ресурса конструкций при многоциклового усталости с учетом деградации свойств материала / А. А. Ларин, А. А. Водка // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2012. – №67. – С. 67–77. 22. Larin O. O. probability approach to the prediction of the high-cycle fatigue lifetime considering aging degradation of the material / O. Larin, O. Vodka // Proceedings of the Fourth International Conference «Nonlinear Dynamics – 2013» June 19-22, 2013, Sevastopol. – Kharkiv: Publ «Tochka», 2013. – P. 393-399.

Bibliography (transliterated): 1. *Buhin B.L.* Introduction to mehanikupnevmaticheskikh tires / *B.L. Bukhin*. - M. Himimya, 1988. - 224s. 2. *Sasov A.A.* Prediction of the output characteristics of tires over nizkogo pressure for cars and tractors . Discand. tehn. nauk. - Dniprodzerzhyn'sk, 2007. - 210c. 3. *Clark S.K.* The pneumatic tire / *S.K. Clark* (Chairman of Editorial Board) et al // National Highway Traffic Safety Administration. USA Dep. Of Transportation, 2006, Pp. 707. 4. *Zhovdak V.A.* Reliability prediction of mechanical systems / *V.A. Zhovdak, L.F. Tarasova*. - Kharkiv: NTU KPI , 2007. - 108. 5. *Larin A.A.* Forecasting and analiz reliability engineering constructions / *A.A. Larin*. - Kharkov: NTU "KPI" , 2011.-128 with. 6. *Larin A.A.* Modelyuvannya kontaktnoi vzaemodii pnevmatichnih tires the way that s urahuvannyam geometrichnoi fizichnoi neliniynosti ih deformuvannya / *A.A. Kondrikova, A.A. Larin* // News Natsionalnogo tehnicnogo universitetu " Harkivsky politehnicny institut ." Zbirnik Sciences . Prace . Tematichee Preview Issue : Dinamika i mitsnist machines. - Kharkiv : NTU " KhPI ", 2011 . - № 52. - S. 94 -101. 7. *Pelc J.* Towards realistic simulation of deformations and stresses in pneumatic tyres / *J. Pelc* // Applied Mathematical Modelling, 2007. Vol 31. - Pp. 530-540 8. *Larin A.A.* Rozrobka bagato sharovoi 3D models komp'yuternoii pnevmatichnoi Shiney s urahuvannyam ortotropii ii mehanichnih vlastivostey / *A.A. Larin, Y. Arefin, O.I. Subochev, A.M. Larin* // News Sevastopol natsionalnogo tehnicnogo universitetu , sulfur : Mashinopriladobuduvannya that transport. - Sevastopol: SevNTU 2011. - № 121. - S. 102-105 9. *Larin A.A.* Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres / *Mateichyk V., Petrova Yu., Larin A.* // Systems and means of motortransport. Selected problems. - Monographia N 4 . Seria: Transport. - Rzeszow: Politechnika Pzeszowska Im. Ignacego Lukaszewicza, 2013 .-Pp. 123-128 10. *Baldwin J.M.* Rubberagingintires. Part 1 : Fieldresults / *John M. Baldwin, David R. Bauer, Kevin R. Ellwood* // Polymer Degradation and Stability. - № 92 , 2007 . - Pp. 104-109 11. *Roland C.M.* Aging of natural rubberin air and sea water / *P.H. Mott, C.M. Roland* // Rubber Chemistry and Technology. - Vol. 74 , 2007 . - Pp. 79-88 12. *Lvov G.I.* Theoretical and experimental study of fatigue strength of plain woven / epoxycomposite. / *Lvov G.I., Movavgar A.* // Strojnikivestnik - JournalofmechanicalEngineering 58 (2012) 3, 2012 , pp. 175-182. 13. *Lemaitre J.* Engine ering damage mechanics: ductile, creep, fatigue and brittle failure / *Lemaitre J., Desmorat R.* - Springer, NewYork., 2005 . 14. *Murakami S.* Continuum Damage Mechanics "A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture" / *Murakami S.* - Springer, 2012 . 15. *Vodka O.O.* The fatigue life-time propagation of the connection elements of long-term operated hydro turbines considering material degradation / *A.A. Larin, O.I. Trubayev, O.O. Vodka* // PNRPU Mechanics Bulletin. - Perm: Perm National Research Polytechnic University. - 2014. - № 1. - S. 164-190. 16. *Barlow T.J.* A reference book of driven cycles for use in measurements of road vehicle emissions. Published project report PPR354 / *T.J. Barlow, S. Latham, I.S. McCrae and P.G. Boulter*. - TRL Limited, Ver. 3, 2009 17. *Sveshnikov A.A.* Applied methods of the theory of random functions / *Aram H. Sveshnikov* . - M. - Science, 1968 . - 464 . 3 . *Baldwin J.M.* Rubberagingintires. Part 1 : Fieldresults / *John M. Baldwin, David R. Bauer, Kevin R. Ellwood* // Polymer Degradation and Stability. - № 92 , 2007 . - Pp. 104-109. 18. *Larin A.A.* Computer aided design of pneumatic passenger car tires / *A.A. Larin, M.I. Lobas* // public information and computer integrated technologies : Sat scientific . tr. - H.: Nat . Aerospace . Univ "HAI " 2011 . - Vol. 50, 2011 , 68-74 c. 19. *Zako M.* Onstochasticevaluationof SN data based on fatigue strength distribution / *S. Hanaki, M. Yamashita, H. Uchida, M. Zako* // International Journal of Fatigue, 2010 ; 32 (3) A. 20. *Vodka A.* Predicting resource structure with many cyclic fatigue taking into account the degradation of the material properties / *A. Larin, A.A. Vodka* // News Natsionalnogo tehnicnogo universitetu " Harkivsky politehnicny institut ." - Kharkiv : NTU " KhPI ." - 2012 . - № 67. - S. 67 77. 21. *Larin A.A.* probability approach to the prediction of the high-cycle fatigue lifetime considering aging degradation of the material / *A. Larin, O. Vodka* // Proceedings of the Fourth International Conference «Nonlinear Dynamics - 2013 » June 19-22, 2013 , Sevastopol. - Kharkiv: Publ «Tochka», 2013 . - P. 393-399.

Надійшла (received) 05.02.2013