

*На правах рукописи*

ПОДВОЙСКИЙ Александр Олегович



**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА НЕСУЩИХ СИСТЕМ  
ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ  
НАГРУЖЕНИИ С УЧЕТОМ ИСЧЕРПАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО  
«Саратовский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Боровских Валентин Ефимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Савкин Алексей Николаевич

доктор технических наук, профессор  
Ивашенцев Геннадий Алексеевич

Ведущая организация: ОАО «НИИ Стали», г. Москва

Защита состоится «29» мая 2011 в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.242.06 при ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет» по адресу: 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, корп. 1, ауд. 319.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет».

Автореферат размещен на сайте ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет» [www.sstu.ru](http://www.sstu.ru) «25» августа 2011 г.

Автореферат разослан «25» августа 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Попов В.С.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одной из основных задач современного машиностроения является задача повышения надежности прогностических оценок ресурса проектируемых объектов. Эта задача имеет огромное значение в аспекте не только экономической эффективности, но и эксплуатационной безопасности.

Суть проблемной ситуации заключается в том, что существующие подходы к решению прямой задачи прогнозирования оценок ресурса (относительно общего случая стохастического процесса нагружения), как правило, не обеспечивают требуемой надежности *моделей эксплуатационного нагружения объекта*: дело в том, что подходы ориентированы главным образом на класс *стационарных гауссовских узкополосных* или *широкополосных* стохастических процессов нагружения, между тем, как показывается в работах X. Yin, V.J. Virchis, J.D. Robson и др., стохастические процессы, регистрируемые в эксперименте, как правило, обнаруживают различные формы *нестационарности*, влияние которых необходимо учитывать в расчетах на усталостную долговечность (причем, согласно D. Benasciutti, R. Tovo, I. Rychlik и др., в некоторых важных для практики случаях плотность распределения ординат стохастического процесса нагружения может быть *негауссовской*).

Это обстоятельство может вызвать существенные искажения прогностической оценки ресурса (по той причине, что ресурс технического объекта в значительной степени определяется уровнем действующих напряжений, полнотой и качеством моделирования условий эксплуатации) и, как следствие, увеличить размер экономических потерь, а также снизить уровень эксплуатационной безопасности объекта.

Кроме того, прогнозирование ресурса осложняется еще и тем, что:

- математические модели, как правило, игнорируют изменчивость прочностных свойств объекта во времени (в частности, исчерпание предела выносливости) по мере накопления рассеянных повреждений, что может привести к появлению неконсервативных оценок ресурса;
- довольно часто идентификация материальных параметров прогностических моделей возможна только на основе результатов дополнительных экспериментальных исследований, что ограничивает применение такого рода моделей на этапе проектирования;
- прямая задача прогнозирования оценок ресурса, как правило, решается безотносительно к напряжениям, меньшим предела выносливости (однако даже относительно малые напряжения могут вызывать отказ по усталости).

Необходимость сокращения сроков проектирования и доводки новой техники, а также высокие затраты на проведение экспериментальных исследований отводят особую роль расчетным методам и предъявляют по-



вышенные требования к надежности результатов этих методов относительно реальных условий эксплуатации.

Таким образом, развитие методов прогнозирования оценок ресурса применительно к общему случаю стохастических процессов нагружения (с учетом прочностной изменчивости объекта во времени) представляется актуальной задачей для науки и практики.

Целью диссертационной работы является разработка метода прогнозирования оценок ресурса (применительно к стохастическим процессам произвольных вероятностных свойств), позволяющего расчетным способом осуществлять обоснование проектного ресурса с учетом кинетики исчерпания прочностных характеристик опасных областей машинностроительных конструкций.

Цель исследования достигается последовательным решением следующих задач:

- провести критический анализ существующих методов решения прямой задачи прогнозирования оценок ресурса при воздействии стохастических процессов нагружения;
- разработать подход к решению прямой задачи прогнозирования оценок ресурса с учетом исчерпания прочностных характеристик объекта во времени и произвольности вероятностных свойств стохастического процесса нагружения;
- разработать и обосновать феноменологическую модель исчерпания прочностных характеристик объекта для случая детерминистического и стохастического нагружений, а также разработать алгоритм и порядок идентификации материальных параметров, не требующий привлечения дополнительных экспериментальных данных;
- провести сравнительный анализ и качественную интерпретацию результатов (показателей) вероятностного моделирования путем сопоставления расчетных оценок ресурса с имеющимися экспериментальными оценками, а также с опубликованными данными экспериментальных исследований при бигармоническом и стохастическом нагружениях;
- разработать возможные пути развития предлагаемого подхода для случаев: 1) двухстадийной модели накопления усталостных повреждений и 2) прогнозирования оценок индивидуального остаточного ресурса по критерию текущего значения предела выносливости; изучить возможность обобщения методики расчета эквивалентного, по А.С. Гусеву, напряжения (в рамках концепции исчерпания) на случай мультносовой усталости;
- разработать программный модуль (на основе концепции исчерпания прочностных характеристик объекта), выполняющий прогнозирование оценок ресурса на стадиях проектирования и эксплуатации (в том числе по оцифрованным осциллографическим записям напряжений).

**Методы исследований:** вероятностное моделирование выполнялось с привлечением методов теории стохастических процессов, континуальной механики повреждаемости сплошных сред, математической статистики, экспериментальной механики и программирования.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается: корректностью постановки решаемых задач исследования, использованием результатов ранее проведенных экспериментальных исследований, а также непротиворечивостью полученных результатов известным решениям для аналогичных задач; тщательной отладкой и тестированием программ.

**Научная новизна диссертации** заключается в:

- разработанном подходе к решению прямой задачи прогнозирования оценок ресурса применительно к общему случаю стохастического процесса нагружения произвольных вероятностных свойств (с учетом кинетики исчерпания прочностных характеристик объекта); особенность предлагаемого подхода заключается в том, что последний оперирует непосредственно *реализацией* стохастического процесса нагружения, что позволяет оценку ресурса вычислять безотносительно к задаче построения модели эксплуатационного нагружения объекта (в этом случае методические ошибки, связанные с несовершенством математического аппарата теории, естественным образом устраняются);
- разработанных феноменологических моделях исчерпания прочностных характеристик объекта для случая детерминистического и стохастического нагружений, а также методике идентификации материальных параметров (для идентификации достаточно располагать лишь параметрами кривой усталости, которые можно либо найти в специальной литературе, либо вычислить, например, по рекомендациям В.П. Когаева);
- разработанных направлениях развития предлагаемого подхода для случаев: 1) двухстадийной модели накопления усталостных повреждений и 2) прогнозирования индивидуальных оценок остаточного ресурса по критерию текущего значения предела выносливости;
- разработанном для автоматизации расчетов по предлагаемому методу программном модуле, выполняющем прогнозирование оценок ресурса на стадиях *проектирования и эксплуатации*.

**На защиту выносятся:**

- подход к решению прямой задачи прогнозирования оценок ресурса применительно к общему случаю стохастического процесса нагружения произвольных вероятностных свойств (с учетом кинетики исчерпания прочностных характеристик объекта), позволяющий устранить методические ошибки на стадии построения модели эксплуатационного нагружения объекта, и, как следствие, повысить надежность прогностической оценки ресурса;

- феноменологические модели исчерпания прочностных характеристик объекта, алгоритмы и порядок идентификации материальных параметров, не требующие проведения дополнительных экспериментальных исследований;
- результаты сравнительного анализа и качественной интерпретации показателей вероятностного моделирования, полученные путем сопоставления расчетных оценок ресурса с имеющимися экспериментальными оценками; результаты указали на то, что разработанные феноменологические модели корректно отражают основные экспериментально наблюдаемые эффекты при моно-, бигармоническом и стохастическом нагружении;
- направления развития предлагаемого подхода для случаев: 1) двухстадийной модели накопления усталостных повреждений и 2) прогнозирования индивидуальных оценок остаточного ресурса по критерию текущего значения предела выносливости;
- программный модуль, выполняющий (на основе концепции исчерпания прочностных характеристик объекта) прогнозирование оценок ресурса на стадиях *проектирования и эксплуатации*.

**Практическая значимость работы:**

- разработанный подход к решению прямой задачи прогнозирования оценок ресурса может быть положен в основу инженерных расчетов на прочность по критерию многоциклового усталости при воздействии стохастических процессов произвольных вероятностных свойств как на этапе разработки технического проекта с привлечением современных программных комплексов типа ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, «Универсальный механизм» и т.д., так и на этапе эксплуатации (испытания и доводка машиностроительных конструкций) с привлечением методов экспериментальной механики (таких как, например, метод натурной тензометрии); предлагаемый подход может использоваться в задачах сравнительного анализа повреждающих способностей процессов нагружения;
- разработанный метод и алгоритмы реализованы в виде программного модуля для прогнозирования оценок ресурса в наиболее нагруженных областях элементов машиностроительных конструкций.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры ТММ СГТУ (2011), Международной молодежной научной конференции «XVII Туловские чтения» (Казань, 2009), IV Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (Санкт-Петербург, 2009), Всероссийской научно-технической конференции «Совершенствование техники, технологий и управления в машино-

строении» (Саратов, 2009), IX Сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов» (Санкт-Петербург, 2009), III Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: реальность и будущее» (Невинномысск, 2010), Юбилейной международной научно-технической конференции «Наука и образование – 2010» (Мурманск, 2010), I Международном симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки (Непрякино Челябинской обл., 2010), Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновации и актуальные проблемы техники и технологий – 2010» (Саратов, 2010).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы и результаты исследований опубликованы в 9 научных статьях, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы. Работа содержит 185 страниц наборного текста, 43 рисунка и 19 таблиц. Список использованной литературы включает 235 источников.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы; формулируются цель диссертационной работы, методы исследования, научная новизна, практическая значимость; кратко излагается содержание диссертации, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор существующих методов прогнозирования усталостной долговечности для случая *стохастического* нагружения. Обсуждаются недостатки методов и рассматриваются некоторые вопросы моделирования *нестационарных* стохастических процессов нагружения, описывающих кинематическое возбуждение динамических систем.

Отмечается, что теория прогнозирования оценок ресурса получила развитие в работах А.А. Абызова, И.Я. Березина, Д.И. Березова, В.В. Болотина, Ю.С. Борисова, В.Е. Боровских, В.Г. Бурдуковского, Р.Д. Вагапова, М.С. Высоцкого, А.С. Гусева, С.С. Дмитриченко, В.А. Жовдак, В.С. Ивановой, В.П. Когаева, В.Л. Колмогорова, В.А. Колокольцева, В.И. Миронова, А.В. Питухина, Б.Н. Полякова, Е.К. Почтенного, В.Л. Райхера, О.А. Русанова, А.Н. Савкина, В.А. Светлицкого, С.В. Серенсена, И.Н. Сильверстова, Л.А. Сосновского, В.Н. Сызранцева, В.Ф. Терентьева, В.Т. Трошенко, Л.А. Шефера, S. Abdullah, M. Barbato, D. Benasciutti, A. Bengtsson, S. Calvo, T. Dirlik, M. Freitas, T.T. Fu, Z. Gao, S. Lambert, Y. Liu, Y.M. Low, M. Olagnon, F. Pakandam, D. Rozumek, I. Rychlik, S. Sakai, M. Shariyat, L. Susmel, R. Tovo, A. Varvani-Farahani, W. Zhao.

Проблемам вероятностного моделирования деградационных процессов посвящены работы А.Ф. Бермана, С.А. Добрынина, Л.В. Ефремова, Г.А. Маковкина, О.А. Николайчука, И.С. Тарасова и других специалистов по теории управления ресурсом.

Как указывалось ранее, стохастические процессы нагружения, совершающиеся в элементах машиностроительных конструкций, довольно часто обнаруживают различные формы *нестационарности*, такие как аддитивность, мультипликативность или более сложные формы, что следует рассматривать как проявление физики процесса, играющей ключевую роль в расчетах на прочность по критерию многоциклового усталости.

Решение прямой задачи прогнозирования оценок ресурса должно основываться на результатах идентификации классификационных характеристик процесса (т.е. необходимо выявить класс процесса, вид нестационарности и т.д.), однако в инженерной практике гипотеза о стационарности принимается, как правило, на основе субъективных допущений. Как отмечается в работах X. Yin, гипотеза о стационарности значительно упрощает анализ и обработку нагружения, однако прежде чем использовать эту гипотезу, необходимо провести обстоятельные исследования, подтверждающие возможность такого упрощения.

Согласно исследованиям Н. Honda, С. J. Dodds, J. D. Robson и др., стохастические процессы, возбуждаемые движущимся объектом (с постоянной скоростью) по поверхности дорожного покрытия, могут моделироваться как *стационарные* во временной области, однако (как показано в работах J. K. Hammond, L. J. Zhang и др.), если объект движется с *переменной скоростью*, то стохастические процессы, поступающие на «вход» объекта, вообще говоря, *нестационарные*: реализации нестационарных стохастических процессов, описывающих кинематическое возмущение, можно получить (с помощью, так называемой техники эквивалентной ковариации) по уравнениям, предложенным в работе X. Yin:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_f(t) + \dot{s}_c \Omega_c \xi_f(t) &= n_0 \sqrt{s_g(n_0) \dot{s}_c} W_0(t), \\ \dot{\xi}_r(t) &= (-2\dot{s}_c l_c^{-1}) \xi_r(t) - \dot{\xi}_f(t) + (2\dot{s}_c l_c^{-1}) \xi_f(t), \quad \Omega_c = 2\pi l_0^{-1}, \quad n_0 = (2\pi)^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\xi_f(t), \xi_r(t)$  – нестационарные стохастические процессы в передних и задних пневмоколесах соответственно;  $\dot{s}_c$  – скорость объекта, зависящая от временной координаты  $t$ ;  $\Omega_c$  – дорожная частота;  $s_g(n)$  – дорожная спектральная плотность при  $n = n_0$ ;  $W_0(t)$  – стационарный белый шум;  $l_c$  – расстояние между передней и задней осями;  $l_0$  – длина неровности.

Зная жесткость пневмоколес и воспользовавшись методикой А.А. Абызова, можно получить законы изменения компонент тензора напряжений (истории напряжений) в наиболее нагруженных областях объекта.

Как показал анализ результатов численного моделирования, если истории напряжений представлены *нестационарными* стохастическими про-



цессами, то построение прогностической оценки ресурса в рамках *гипотезы о стационарности* может привести к методическим ошибкам, вызванным несовершенством математического аппарата теории моделирования эксплуатационного нагружения объекта, и, как следствие, исказить прогностическую оценку ресурса, снизив надежность последней. Кроме того, как указывалось выше, прогнозирование надежных оценок ресурса усложняется еще и тем, что: а) модели прогнозирования для идентификации материальных параметров требуют привлечения дополнительных экспериментальных данных, что во многих случаях крайне затруднительно; б) напряжения меньше предела выносливости не принимаются в расчет на прочность, что может исказить повреждающую способность процесса нагружения и привести к неконсервативным оценкам ресурса; в) прямое экспериментальное построение динамической кривой исчерпания предела выносливости связано со значительными техническими трудностями.

Таким образом, приходим к необходимости разработки (надежного в смысле модели эксплуатационного нагружения) метода прогнозирования оценок ресурса, свободного от рассмотренных выше недостатков.

В заключение главы на основе литературного анализа формулируются задачи диссертационного исследования и выводы.

Во второй главе излагаются основные положения предлагаемого подхода к решению прямой задачи прогнозирования оценок ресурса для случая детерминистического нагружения. Обосновывается концепция порога чувствительности в задачах прогностики ресурса. Разрабатывается феноменологическая модель исчерпания прочностных характеристик объекта для случая моногармонического нагружения и предлагается методика идентификации материальных параметров. Отмечается, что частотные кривые и кривые усталости, построенные по предлагаемой концепции исчерпания прочностных характеристик объекта, достаточно корректно отражают характер зависимости оценок ресурса от параметров моногармонического процесса нагружения.

Выработка ресурса машин и конструкций связана главным образом с накоплением необратимых повреждений структуры материала. Многие виды повреждений носят смешанный характер, однако, несмотря на многообразие явлений, их можно описать в рамках одной феноменологической теории, связывающей скорость накопления усталостных повреждений с действующими нагрузками и условиями окружающей среды.

Важно заметить, что единственное назначение феноменологических моделей заключается в том, чтобы дать средства для расчета, обладающие максимальной простотой и использующие в качестве исходной информации минимальное число экспериментальных данных.

К сожалению, правильность той или иной феноменологической модели повреждаемости проверить невозможно, можно только сказать, насколько хорошо модель приближает некоторый набор экспериментальных

данных. Конкретный вид функции в правой части кинетического уравнения выбирается исключительно из соображений наилучшего описания результатов экспериментальных исследований при помощи определяющих параметров: нагрузки, температуры, параметра повреждаемости и т.д.

Для описания эксплуатационной нагруженности объекта введем в рассмотрение процесс  $\sigma_x(t)$ .

Пренебрегая последствием, примем, что приращение скалярной меры усталостных повреждений в единицу времени зависит лишь от состояния объекта и уровня напряжений в этот момент времени.

Тогда текущая дискретная мера усталостных повреждений  $\{v_k^d\}_{k=1}^q$  будет удовлетворять кинетическому уравнению вида

$$dv_k^d = f[v_k^d, \sigma_x(t)] dt_{k=1}^q, \quad (2)$$

где  $q$  – число ступеней на траектории деградационного процесса (рис.1).

Следуя работам Г.А. Маковкина, В.А. Жовдак и др., заметим, что функционирование объекта в условиях реальной эксплуатационной нагруженности сопровождается квазимонотонным истощением прочностных характеристик (в частности, предела выносливости); прямое экспериментальное выявление закономерности истощения предела выносливости по мере накопления усталостных повреждений для конкретных материалов и конструкций связано с почти непреодолимыми техническими трудностями, поэтому имеет смысл сначала задаться

некоторой гипотетической системой, а затем провести верификацию и коррекцию этой гипотетической системы с учетом представительной информации, полученной в эксперименте: теперь, учитывая порог чувствительности (напряжение отделяющее повреждающую часть спектра от неповреждающей), гипотезу А.С. Гусева о связи предела выносливости и скалярной меры усталостных повреждений, а также следствие континуальной механики повреждаемости сплошных сред (согласно которому в простейшем случае мера усталостных повреждений пропорциональна площади под кривой, описывающей процесс изменения амплитудных напряжений), примем гипотезу о наличии связи между  $\omega_k$ -параметром (см. рис.1) и приращением ординаты деградационного процесса  $\Delta\sigma_{-1}^{(k)}$  в виде

$$\omega_k \propto \exp[b \cdot \ln \Delta\sigma_{-1}^{(k)}]_{k=1}^q, \quad (3)$$

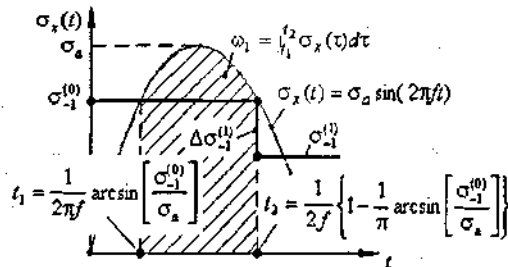


Рис.1. Пояснение к гипотезе о наличии связи между  $\omega_k$ -параметром и приращением ординаты деградационного процесса  $\Delta\sigma_{-1}^{(k)}$

где  $b$  – некоторая константа.

Теперь кинетическое уравнение (2) с учетом принятой гипотезы (правая часть кинетического уравнения составляется из условия наилучшего приближения экспериментальных данных при нагружении моногармоническими процессами, по аналогии с уравнением И.Н. Сильверстова) перепишем в виде

$$\frac{dv_k^d}{dt} = \beta \frac{2\pi f}{(ak_a)^{-1} \sigma_{-1}^{(k-1)}} \cdot \frac{\sigma_x(t)}{(1-v_k^d)^r}, \quad (4)$$

$$(4) \Rightarrow v_k^d = 1 - r + \sqrt{1 - \beta \frac{2\pi f (r+1)}{(ak_a)^{-1} \sigma_{-1}^{(k-1)}} \int_0^t \sigma_x(\tau) d\tau}, \quad (5)$$

где  $f$  – частота нагружения, Гц;  $a$  – коэффициент в корреляционной зависимости между пределом выносливости и пределом прочности по Эйхингеру;  $k_a$  – коэффициент порога чувствительности;  $\beta, r$  – материальные параметры модели.

Связь между текущим значением предела выносливости  $\sigma_{-1}^{(k)}$  и  $\omega_k$  – параметром для каждого деградационного цикла  $p = \overline{0, h}$  определим по модифицированной гипотезе А.С. Гусева о наличии связи между пределом выносливости  $\sigma_{-1}^{(k)}$  и скалярной мерой усталостных повреждений  $v_k^d$  (показатель степени  $\theta \xi_{k-1}^\lambda$  получен методом анализа размерностей)

$$\sigma_{-1}^{(k)} = \sigma_{-1}^{(k-1)} (1 - v_k^d)^{\theta \xi_{k-1}^\lambda}, \quad \xi_{k-1} = \frac{\sigma_{\max}^{(k)}}{\sigma_{-1}^{(k-1)}}, \quad \sigma_{-1}^{(0)} = k_a \sigma_{-1a}, \quad (6)$$

где  $\theta, \lambda$  – материальные параметры;  $\sigma_{\max}^{(k)}$  – максимальное значение ординаты процесса нагружения на  $k$ -й ступени.

$$(6) \Rightarrow \sigma_{-1}^{(k)} = \sigma_{-1}^{(k-1)} \left[ 1 - \beta \frac{2\pi f (r+1)}{(ak_a)^{-1} \sigma_{-1}^{(k-1)}} \int_0^t \sigma_x(\tau) d\tau \right]^{r+1} \xi_{k-1}^{\theta \lambda} \quad \text{или} \quad (7)$$

$$\sigma_{-1}^{(k)} = \sigma_{-1}^{(0)} \prod_{l=0}^k \left[ 1 - \beta \frac{2\pi f (r+1)}{(ak_a)^{-1} \sigma_{-1}^{(k-1)}} \int_0^t \sigma_x(\tau) d\tau \right]^{r+1} \xi_l^{\theta \lambda}, \quad \xi_l = \frac{\sigma_{\max}^{(l+1)}}{\sigma_{-1}^{(l)}}. \quad (8)$$

Для случая моногармонического процесса нагружения с амплитудой  $\sigma_a$  соотношение (7) (при  $r=1, a=0,5, k_a=0,5$ ) принимает вид

$$\sigma_{-1}^{(k)} = \sigma_{-1}^{(k-1)} \left[ 1 - \beta \sqrt{\xi_{k-1}^2 (\sigma_a) - 1} \right]^2 \xi_{k-1}^{\theta \lambda (\sigma_a)}, \quad \xi_{k-1}(\sigma_a) = \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}^{(k-1)}}. \quad (9)$$

Методика идентификации материальных параметров феноменологической модели исчерпания (9) сводится к следующему:

- задаемся законами распределения параметров кривой усталости ( $\sigma_{-1d}$ ,  $m$ ,  $N_0$ ) и методом статистического моделирования разыгрываем массив значений;
- затем задаемся значением параметра  $\lambda_i$  ( $i$ -я итерация) и методом последовательных приближений вычисляем значение показателя интенсивности деградиационного процесса  $\theta_{ij}$  из условия  $N(\theta_{ij} | \lambda_i) = N_0$ ; если при фиксированном  $\lambda_i$  и  $\theta_{ij}$ , число циклов до разрушения  $N(\theta_{ij} | \lambda_i)$  по предлагаемой феноменологической модели истощения прочностных характеристик объекта не равно абсциссе точки перегиба  $N_0$ , то задаемся новым значением  $\theta_{i2}$  и снова проверяем условие  $N(\theta_{i2} | \lambda_i) = N_0$ ;
- затем, зафиксировав  $\theta_{ij}$ , для разных уровней амплитудного напряжения  $\sigma_a$  строим левую ветвь кривой усталости (рис. 2);
- параметр  $\lambda_i$  определяется из условия равенства котангенса угла наклона

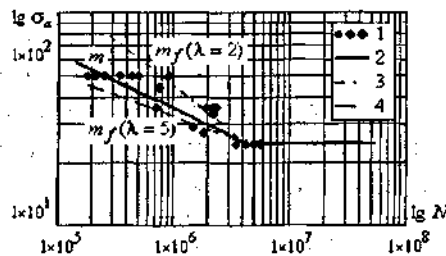


Рис. 2. Кривые усталости по результатам моногармонического нагружения (сталь 10):  
1 - экспериментальные данные В. Е. Боровских и др.; 2 - 50%-кривая усталости;  
3 - кривая усталости по модели (9) при  $\lambda = 2$ ;  
4 - кривая усталости по модели (9) при  $\lambda = 5$

эмпирической кривой усталости  $m$  и котангенса угла наклона кривой усталости, построенной с помощью модели (9),  $m_f$ ;

- если при фиксированных  $\lambda_i$  и  $\theta_{ij}$ , при выполнении условия  $N(\theta_{ij} | \lambda_i) = N_0$  другое условие  $m_f(\theta_{ij} | \lambda_i) = m$  не выполняется, то задаемся новым значением  $\lambda_i$  и повторяем цикл операций.

Для сокращения времени идентификации материальных параметров феноменологической модели (9), а также для устранения вычислительных трудностей имеет смысл, введя ряд упрощений (на основе результатов численного моделирования), разработать более простую методику отыскания  $\lambda_i$  и  $\theta_{ij}$ :

Итак, если принять, что приращение ординаты деградиационного процесса не изменяется по числу отсчетов, т.е.  $\Delta\sigma_{-1}^{(k)} = \Delta\sigma_{-1}^{(0)} \forall k$ , то с учетом соотношения  $q^{-1} = 1 - \exp\left\{\frac{\theta}{2} \xi_0^\lambda(\sigma_a) \ln[1 - \beta \sqrt{\xi_0^2(\sigma_a) - 1}]\right\}$ , вытекающего из условия равномерного распределения  $\Delta\sigma_{-1}^{(k)}$  в интервале  $[0; \sigma_{-1}^{(0)}]$ , можно получить простое приближение для кривой усталости, построенной в рамках предлагаемой концепции истощения (приближение строится для каждого деградиационного цикла  $p = 0, \bar{h}$ )

$$q(h, \theta, \sigma_a) = \sum_{p=0}^h \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{\theta}{2} \xi_0^\lambda(p, \sigma_a) \ln \Lambda(p, \sigma_a) \right] \right\}^{-1}, \quad \xi_0(p, \sigma_a) = \frac{\sigma_a}{k_a^p \sigma_{-1}^{(0)}}, \quad (10)$$

$$\Lambda(p, \sigma_a) = 1 - \beta \sqrt{\xi_0^2(p, \sigma_a) - 1}, \quad \frac{q(h, 0, \sigma_a)}{q(0, \theta, \sigma_a)} \approx \left[ 1 + \frac{2^{h(\lambda+1)} - 1}{2^{h(\lambda+1)} (2^{\lambda+1} - 1)} \right]_{\lambda \in [3,9]} \approx 1.$$

$$q(0, \theta, \sigma_a) = \frac{\sigma_{-1}^m N_0}{\sigma_a^m} \Rightarrow q \left( 0, \frac{2 \ln(1 - N_0^{-1})}{2^\lambda \ln(1 - \beta \sqrt{3})}, \sigma_a \right), \quad \theta \approx \frac{2 N_0^{-1}}{2^\lambda \beta \sqrt{3}}. \quad (11)$$

Теперь представим экспоненциальную часть в соотношении (10) в виде биномиального разложения, что допустимо, потому как второе слагаемое в  $\Lambda(p, \sigma_a)$  меньше единицы, и примем, что для амплитуд моногармонического процесса нагружения, удовлетворяющих условию  $\sigma_a > 2\sigma_{-1}^{(0)}$  имеет место приближение  $\sqrt{\xi_0^2(0, \sigma_a) - 1} \approx \sqrt{\xi_0^2(0, \sigma_a)}$ .

В результате, учитывая, что  $\xi_0(0, \sigma_a) = \xi_0(\sigma_a)$ , получим уравнение кривой усталости по концепции исчерпания прочностных характеристик объекта в более простой и удобной для анализа форме (рис. 3)

$$q \left( 0, \frac{2 N_0^{-1}}{2^{\lambda+1} \beta}, \sigma_a \right) = \left\{ \beta \frac{\theta}{2} \xi_0^{\lambda+1}(\sigma_a) \right\}^{-1} \vee \left\{ \frac{N_0^{-1}}{2^m} \xi_0^m(\sigma_a) \right\}^{-1}, \quad \text{так как } \lambda = m - 1. \quad (12)$$

Как видно из рис. 3 приближения (11) и (12) сохраняют общий характер зависимости  $q(\sigma_a)$  и потому могут использоваться для изучения вероятностных свойств модели (9), как более удобные аналоги.

Важно заметить, что зависимости  $\lg q(\sigma_a)$ , построенные по моделям (9) и (11), с достаточной для инженерной практики точностью могут считаться линейными, что, вопервых, указывает на корректность моделирования основных закономерностей, проявляющихся при моногармоническом нагружении, а во-вторых, на возможность использовать описанную ранее методику идентификации материальных параметров (дело в том, что если бы зависимость  $\lg q(\sigma_a)$  была нелинейной, то условие равенства котангенсов угла наклона расчетной и экспериментальной кривых усталости  $m_f(\theta_{ij} | \lambda_i) = m$  потеряло бы смысл). В случае кривой усталости в форме (12) линейность связи  $\lg q(\sigma_a)$  удастся показать аналитически

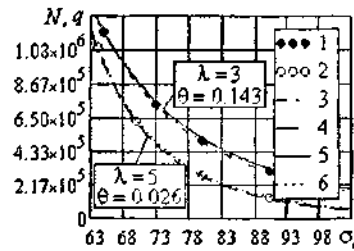


Рис. 3. Кривые усталости: 1, 2- кривые по модели (9); 3, 4- кривые по модели (11); 5, 6- кривые по модели (12)

$$(12) \Rightarrow \lg \sigma_a = -\frac{1}{m} \lg q + \left\{ \lg \sigma_{-1}^{(0)} - \frac{1}{m} \lg \left( \frac{N_0^{-1}}{2^m} \right) \right\}.$$

Следует отметить, что феноменологическая модель (9) и ее приближения (10), (11), (12) дают корректное описание и в случае *частотных кривых*, т.е. кривых, описывающих зависимость частоты нагружения моногармонического процесса от оценок долговечности.

В третьей главе развиваются отдельные положения концепции исчерпания прочностных характеристик объекта применительно к общему случаю стохастического процесса нагружения. Рассматриваются возможные направления развития предлагаемого подхода для случаев: 1) *двухстадийной модели накопления усталостных повреждений*: полное решение прямой задачи прогнозирования оценок ресурса *тел с трещинами* возможно только в рамках механики разрушения, однако простые приближения (основываясь на двухстадийных моделях А.С.Гусева) можно получить и в рамках предлагаемой *концепции исчерпания*; структуру модели исчерпания на стадии развития макроскопических усталостных трещин предлагается принять аналогичной структуре модели для случая стадии накопления рассеянных повреждений, с тем отличием, что на стадии накопления рассеянных повреждений исчерпывается предел выносливости, а на стадии развития макроскопических усталостных трещин – предел живучести; 2) *прогнозирования оценок индивидуального остаточного ресурса по критерию текущего значения предела выносливости*: как отмечается в работах В.В.Болотина, В.Н. Сызранцева и других исследователей, индивидуальное прогнозирование оценок остаточного ресурса не только позволяет предупредить возможные отказы и непредвиденные достижения предельных состояний, но и более правильно планировать режимы эксплуатации, профилактические мероприятия и снабжение запасными частями; идея, заложенная в алгоритм прогнозирования оценок индивидуального остаточного ресурса, основывается на результатах А.С.Гусева и состоит в том, чтобы *предел выносливости* (как интегральную характеристику материала, описывающую способность объекта сопротивляться усталостному разрушению) принять за оценку текущего состояния объекта (отличие прогнозирования оценок индивидуального остаточного ресурса от прогнозирования оценок усталостной долговечности заключается лишь в том, что кроме априорной информации используется также информация экспериментальная, «привязанная» к конкретному объекту).

Также на базе предлагаемой концепции исчерпания изучается возможность обобщения методики расчета эквивалентного, по А.С. Гусеву, напряжения на случай мультипосевой усталости (при нестационарном стохастическом нагружении).

Проводится сравнительный анализ (эксперимент при *моно-, бигармоническом и стохастическом нагружениях*) и качественная интерпретация

результатов вероятностного моделирования. Согласно экспериментальным данным И.Г. Завалич и Л.А. Шефера узкополосному стохастическому процессу (УСП) со среднеквадратическим отклонением (СКО)  $s_\sigma$  по сравнению с моногармоническим процессом (рис.4) при равных СКО отвечают меньшие значения оценок ресурса, что в рамках концепции истощения можно объяснить большими значениями  $\Delta\sigma_{-1}^{(k)}$ , т.е. траектория деградационного процесса (ТДП) в случае УСП лежит ниже траектории, отвечающей моногармоническому процессу (рис.5).

Если учесть, что плотность распределения амплитуд стационарного гауссовского УСП представляет собой закон Рэлея с характеристиками  $m_\sigma$  и  $s_\sigma^2$ , т.е.  $\sigma_a: Re(m_\sigma, s_\sigma^2)$ , то прогностическую оценку ресурса (вернее, статистические характеристики) можно вычислить по модели (9), заменив детерминистическую амплитуду  $\sigma_a$  случайной  $\sigma_a: Re$  и воспользовавшись методами математической статистики.

Количественный анализ расчетных оценок ресурса по модели (7), адаптированной к стохастическому нагружению и по модели Б.Н. Полякова (для случая УСП), показал, что отклонение прогностических оценок ресурса не превышало 14%.

Результаты численного моделирования показали, что разработанные феноменологические модели истощения корректно учитывают влияние структуры процесса нагружения на поведение оценок ресурса, а также основные экспериментально наблюдаемые эффекты при моно-, бигармоническом и стохастическом нагружениях (экспериментальные данные Т. Ymada, S. Kitagawa, L. Locoti, Г.З. Зайцева, Р.М. Фараджова и др.).

В четвертой главе дается описание структуры и алгоритмов программного модуля; рассматриваются примеры практического использования моделей истощения прочностных характеристик объекта; приводятся результаты численного исследования разработанных феноменологических моделей, полученные путем сопоставления расчетных оценок ресурса с

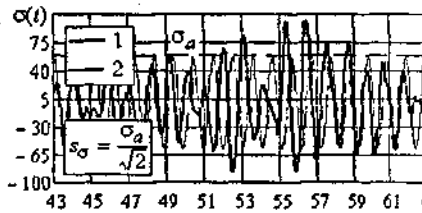


Рис.4. Реализации процессов нагружения: 1-УСП; 2- моногармонический процесс

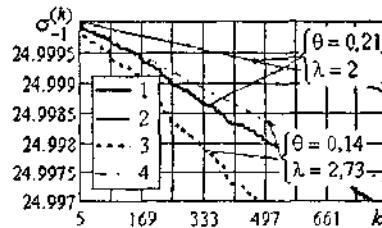


Рис.5. Траектории деградационных процессов: 1,3- для стационарного гауссовского УСП; 2,4- для моногармонического процесса

экспериментальными оценками (по наиболее напряженным областям рамы троллейбуса ЗиУ-9); изучаются некоторые вопросы коррекции феноменологической модели (7).

Верификация предлагаемого метода прогнозирования оценок ресурса выполнялась по найденным методам натурной тензометрии оцифрованными осциллографическим записям напряжений: ниже приводятся элементы численного анализа осциллографической записи по наиболее напряженной области лонжерона троллейбуса ЗиУ-9 (экспериментальные данные Боровских В.Е.) при движении с нагрузкой  $1,5 P_{ном}$  от номинальной  $P_{ном}$  по хорошему асфальту со скоростью  $V = 40$  км/ч и долей нагруженности  $c = 0,07$ . Материальные параметры феноменологической модели (7) идентифицировались по описанной выше методике с учетом априорной информации о прочностных свойствах конструкции (сталь 10:  $\sigma_{-1д} = 36,5$  МПа,  $m = 3,89$ ,  $N_0 = 4,3 \cdot 10^6$ ).

В таблице для различных долей нагруженности  $\{c_i\}_{i=1}^d$  приведены прогностические оценки ресурса (выборочные средние)  $Y_i$  и ошибка прогнозирования  $e_i$ , определяемая как отношение расчетной оценки ресурса (с учетом доли нагруженности по методике Е.К. Почтенного) к эксплуатационной оценке ресурса: выборочное среднее оценки ресурса (кумулятивная кривая была аппроксимирована законом Вейбулла) по наиболее нагруженной области лонжерона (правый задний свес) троллейбуса ЗиУ-9 согласно экспериментальным данным В.Е. Боровских составило  $Y^* = 319000$  км.

Как видно из таблицы, доле нагруженности  $c = 0,07$  отвечает ошибка прогнозирования  $e = 4,680$ , что, учитывая неопределенность и многообразие реальных условий эксплуатации, можно считать вполне удовлетворительным (осциллограмма получена при постоянной скорости движения объекта на определенном типе дорожного покрытия, между тем в действительности скорость движения может изменяться в довольно широких пределах, что неизбежно отразится на профиле осциллографической записи и, как следствие, на вероятностных характеристиках эксплуатационной оценки ресурса).

Важно обратить внимание на то, что в некоторых случаях феноменологическая модель исчерпания нуждается в коррекции. Так, например, в случае бигармонического процесса нагружения необходимо учитывать влияние амплитуд и частот высоко- и низкочастотной компонент процесса:

Прогностические оценки ресурса при движении с нагрузкой  $1,5 P_{ном}$  со скоростью 40 км/ч (хороший асфальт)

$\{c_i\}_{i=1}^d$	$c_i^{-1} Y_i$ , км	$e_i = Y_i (c_i Y^*)^{-1}$
0,05	2090067	6,552
0,07	1492905	4,680
0,10	1045033	3,276
0,15	696639	2,184



в этом случае показатель рекуррентного соотношения (7) можно переписать в виде

$$s_k = \frac{\theta}{r+1} \left[ \frac{\sigma_{\max}^{(k)}}{\sigma_{-1}^{(k-1)}} \right]^k \left[ \frac{f_v}{f_n} \left( \frac{\sigma_{ав}}{\sigma_{ан}} \right) + 1 \right], \quad (13)$$

где  $f_v, (f_n)$  – высшая и низшая частоты соответственно;  $\sigma_{ав}, (\sigma_{ан})$  – амплитуды высоко- и низкочастотных составляющих процесса соответственно.

Важно заметить, что когда  $\sigma_{ав} \rightarrow 0$  (т.е. когда бигармонический процесс «вырождается» в моногармонический), модель с показателем степени в форме (13) преобразуется в модель (9).

Для сравнения на рис. 6 изображены кривые по моделям вида

$$\frac{N_{рез}}{N(\sigma_c)} = F\left(\frac{f_v}{f_n}, q_{с0}\right), \quad q_{с0} = \frac{\sigma_{ан}}{\sigma_c}, \quad \sigma_c = \sigma_{ан} + \sigma_{ав}, \quad \lim_{\sigma_{ав} \rightarrow 0} \frac{N_{рез}}{N(\sigma_c)} \rightarrow 1, \quad (14)$$

где  $N_{рез}$  – число циклов до разрушения по низкочастотной компоненте бигармонического нагружения;  $N(\sigma_c)$  – число циклов до разрушения при эквивалентном моногармоническом нагружении с амплитудой  $\sigma_c$ ;  $F(\cdot)$  – некоторая функция.

Как показывает анализ оценок ресурса по модели (7) с учетом (13) (рис. 6), последняя достаточно корректно описывает основные экспериментально наблюдаемые эффекты, проявляющиеся в условиях бигармонического нагружения.

Таким образом, можно заключить, что предлагаемый подход к решению прямой задачи прогнозирования оценок ресурса (на основе континуальной механики повреждаемости сплошных сред и модифицированной гипотезы А.С. Гусева) может быть рекомендован к использованию в расчетах на прочность по критерию многоциклового усталости (с учетом кинетики исчерпания прочностных характеристик объекта) применительно к общему случаю стохастического процесса нагружения произвольных вероятностных свойств.

В заключении диссертации приводятся основные выводы и результаты.

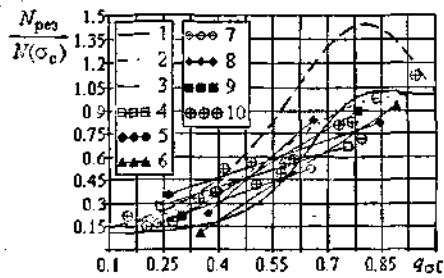


Рис. 6. Влияние  $q_{с0}$  на долговечность при бигармоническом нагружении:  
1-3 – кривые по модели вида (14);  
4-9 – парные точки для сравнительного анализа по модели (7) с учетом (13); 10 – данные Е.Г. Буглова и др.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

- проведен критический анализ существующих методов прогнозирования оценок ресурса при воздействии стохастических процессов нагружения, выявлены недостатки;
- предложен подход к прогнозированию оценок ресурса с учетом изменчивости прочностных характеристик объекта во времени и произвольности вероятностных свойств процесса нагружения;
- разработаны феноменологические модели исчерпания прочностных характеристик объекта для случая детерминистического и стохастического нагружений, а также алгоритм и порядок идентификации материальных параметров, не требующий привлечения дополнительных экспериментальных данных;
- проведены сравнительный анализ и качественная интерпретация результатов вероятностного моделирования путем сопоставления расчетных оценок ресурса с имеющимися экспериментальными оценками, а также с опубликованными данными экспериментальных исследований при бигармоническом и стохастическом нагружениях; результаты указали на то, что разработанные феноменологические модели корректно отражают основные экспериментально наблюдаемые эффекты при моно-, бигармоническом (с учетом коррекции) и стохастическом нагружениях; отклонение расчетных оценок ресурса по модели (7) от оценок по модели Б.Н. Полякова (при стационарном стохастическом нагружении) не превышало 14%; ошибка прогнозирования оценок ресурса для наиболее нагруженной области лонжерона (правый задний свес) троллейбуса ЗиУ-9 при  $c = 0,07$  составила  $e = 4,680$ , что, если принять во внимание многообразие реальных условий эксплуатации и некоторую неопределенность режимов нагружения, можно считать вполне удовлетворительным;
- предложены возможные пути развития концепции исчерпания для случаев: 1) двухстадийной модели накопления усталостных повреждений и 2) прогнозирования оценок индивидуального остаточного ресурса по критерию текущего значения предела выносливости; в рамках концепции исчерпания была изучена возможность обобщения методики расчета эквивалентного, по А.С. Гусеву, напряжения на случай мультносовой усталости; получены формулы для определения (в первой итерации) структуры эквивалентного процесса нагружения;
- для автоматизации расчетов по предлагаемому методу разработан программный модуль, выполняющий прогнозирование оценок ресурса на стадиях проектирования и эксплуатации;
- разработанный подход к прогнозированию оценок ресурса, основанный на континуальной механике повреждаемости сплошных сред и модифицированной гипотезе А.С. Гусева, может быть рекомендован к практическому использованию в расчетах на усталостную прочность (с уче-

том истощения прочностных характеристик объекта) при воздействии стохастических процессов произвольных вероятностных свойств.

### **ОСНОВНЫЕ ПЕЧАТНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Подвойский, А.О. Правило истощения предела выносливости объекта в условиях стохастической изменчивости поля напряжений / А.О. Подвойский, В.Е. Боровских // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – №3(41). – Вып. 2. – С.156-160.
2. Подвойский, А.О. Правило истощения предела выносливости объекта для случая аддитивно–мультипликативной модели нестационарного стохастического процесса / А.О. Подвойский, В.Е. Боровских // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – №2(45). – С. 83-89.
3. Подвойский, А.О. Метод прогнозирования усталостной долговечности в условиях квазимонотонной деградации физико-механических свойств объекта / В.Е. Боровских, А.О. Подвойский // Известия МГТУ «МАМИ». – 2010. – №2(10). – С. 121-130.
4. Подвойский, А.О. Прогнозирование оценки ресурса технического объекта по критерию текущего значения предела выносливости / А.О. Подвойский, В.Е. Боровских // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – №1(52). – Вып. 1. – С.84-88.

#### *Публикации в других изданиях:*

5. Подвойский, А.О. Модель деградации предела выносливости объекта в условиях нестационарного поля стохастических напряжений / А.О. Подвойский, В.Е. Боровских // Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов: сб. трудов Девятой сессии междунар. науч. школы. – СПб.: ИПМАШ РАН, 2009. – С. 90-92.
6. Подвойский, А.О. Реономная концепция динамики снижения предела выносливости / А.О. Подвойский, В.Е. Боровских // Наука и образование – 2010: материалы Юбилейной междунар. науч.-техн. конф. – Мурманск: МГТУ, 2010. – С. 95-98.
7. Подвойский, А.О. Метод прогнозирования усталостной долговечности объекта с учетом нестационарного компонента поля стохастических напряжений в условиях квазимонотонной деградации предела выносливости / А.О. Подвойский, В.Е. Боровских // Фундаментальные и прикладные проблемы науки: тр. I Междунар. симпозиума: в 2 т. – М.: РАН, 2010. Т.1. – С. 159-171.
8. Подвойский, А.О. Проблемы прогнозирования показателей усталостной долговечности / А.О. Подвойский, В.Е. Боровских, С.В. Ми-

11 - 6935

наев // Инновации и актуальные проблемы техники и технологий: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых: в 2 т. / Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2010. – Т.2. – С. 237-240.

9. Подвойский, А.О. Модуль расчета на прочность по критерию многоциклового усталости при стохастическом нагружении. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010613299 / А.О. Подвойский, С.В. Минаев, В.Е. Боровских, 2010.

2011 А  
16935

Подписано в печать 01.07.11

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 1,16 (1,25)

Формат 60x84 1/16

Тираж 100 экз.

Заказ 167

Уч.-изд. л. 1,0

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Тел.: 24-95-70; 99-87-39, e-mail: [izdat@ssu.ru](mailto:izdat@ssu.ru)