

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ БЛОКОВ И ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ

¹ Капуста П.П.

¹ Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Постановка задачи. Большинство конструкций и деталей машин, в т.ч. - мобильных, в эксплуатации испытывает случайное нагружение (Рисунок 1).

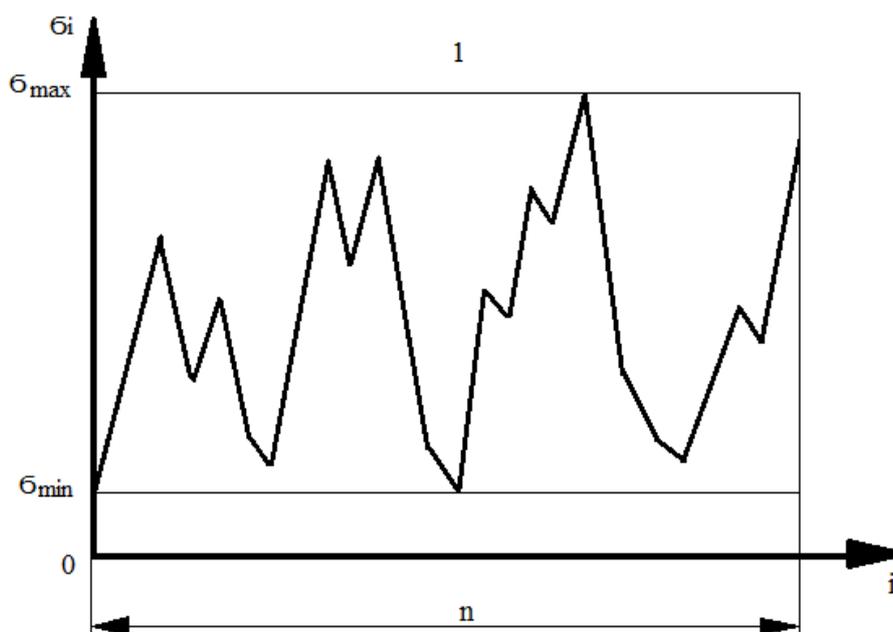


Рис. 1. Схема случайного нагружения

При вероятностных расчетах на долговечность актуальным является вопрос учета всех повреждающих напряжений эксплуатационного нагружения в процессе снижения предела выносливости с выработкой ресурса. Накопление повреждений в расчетах долговечности, при подключении все более низких напряжений нагрузочного блока, учитывают с помощью гипотез суммирования усталостных повреждений [1...11]. Однако, не выясненными остаются вопросы методики формирования нагрузочного блока и перехода между режимами разной степени тяжести нагружения, как в случае одного материала и конструкции детали, так и при их проектном изменении, в.ч. – при использовании степенного уравнения кривой усталости, наиболее приемлемого для проектных расчетов ресурса [2...3].

Методика исследования. Системный анализ эксплуатационной и аналитической динамики различных классов машин, процессов случайного нагружения их несущих систем, агрегатов, узлов, конструкций и деталей. Обоснование принципов универсального способа формирования нагрузочных блоков, назначения их основных характеристик на стадиях проектирования и “прочностной доводки” машин и методических оснований проектных расчетов усталостного ресурса с учетом степени тяжести процессов случайного нагружения. Алгоритмизация и программирование расчетов характеристик формируемых нагрузочных блоков и усталостного ресурса

деталей машин и конструкций. Верификация разработанных методов на результатах натурных и вычислительных компьютерных экспериментов.

Результаты исследований и их обсуждение.

Приводятся принципы, методика и методы формирования и аппроксимации нагрузочных блоков и расчета усталостного ресурса, при использовании степенного уравнения кривой усталости, наиболее приемлемого на стадии проектирования деталей машин и элементов конструкций при случайном нагружении в зависимости от эксплуатационных условий их функционирования.

1. Методы анализа эксплуатационной нагруженности и приведения асимметричных циклов напряжений к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным или отнулевым [5...8].

При анализе случайного нерегулярного нагружения, которое характеризуется переменным коэффициентом асимметрии цикла $R = \left(\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \right)$, для построения

нагрузочных блоков и расчета ресурса несущих систем, конструкций и деталей машин требуется приведение циклов с переменным коэффициентом асимметрии к эквивалентным по повреждению циклам с постоянным коэффициентом асимметрии. Предпочтительным, но не обязательным, является приведение к симметричным циклам, но рассматриваемый ниже подход может быть использован для приведения циклов с переменным коэффициентом асимметрии к циклам с постоянным коэффициентом асимметрии в диапазоне $-1 \leq R < +1$, например, к отнулевым циклам при $R=0$. Необходимость приведения к отнулевым циклам возникает, например, в случаях конструкций, работающих в условиях пульсирующего давления, где симметричные циклы не реальны. Для целей приведения к эквивалентным циклам используют различные уравнения кривых усталости [1, 3, 5, 7].

При проектных расчетах распространение получило степенное уравнение [4, 5, 6, 8 ... 11]. Запишем его следующим образом:

$$N = N_G \cdot \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_R} \right)^{-m}, \quad (1)$$

где N - число циклов до предельного повреждения; N_G - число циклов до нижнего перелома кривой усталости; σ_R - предел выносливости при коэффициенте асимметрии R ; m - показатель наклона левой ветви кривой усталости в логарифмической системе координат; σ_{\max} - максимальное напряжение цикла.

В уравнении (1) - отношение $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_R}$ - степень перегрузки.

Если число циклов N_G и показатель степени m не зависят от асимметрии нагружения, то принцип приведения асимметричных циклов к эквивалентным по повреждению симметричным σ_{E-1} формулируется как равенство степенной нагрузки

$$\frac{\sigma_{E-1}}{\sigma_{-1}} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_R}. \quad (2)$$

Из последнего уравнения

$$\sigma_{E-1} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_R} \cdot \sigma_{\max}. \quad (3)$$

Или, с учетом уравнения (2),

$$\sigma_{E_{-1}} = \frac{\sigma_{-1}}{a_{E_{-1}} \cdot \sigma_{-1}} \cdot \sigma_{\max} = \frac{1}{a_{E_{-1}}} \cdot \sigma_{\max}, \quad (4)$$

где: $a_{E_{-1}}$ – коэффициент приведения асимметричных циклов к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным, определяемый по формуле (5)

$$a_{E_{-1}} = \frac{2}{[2 - (1 - \psi) \cdot (1 + R)]}, \quad (5)$$

a_{E_0} – коэффициент приведения асимметричных циклов к эквивалентным по повреждающему воздействию отнулевым, определяемый по формуле (6)

$$a_{E_0} = \frac{(1 + \psi)}{[2 - (1 - \psi) \cdot (1 + R)]} \quad (6)$$

После подстановок и несложных преобразований получено уравнение (7) приведения асимметричных циклов к эквивалентным по повреждению симметричным:

$$\sigma_{E_{-1}} = \sigma_{\max} \cdot \left[1 - \frac{(1 - \psi) \cdot (1 + R)}{2} \right]. \quad (7)$$

Аналогично получено уравнение (8) приведения асимметричных циклов к эквивалентным по повреждению отнулевым:

$$\sigma_{E_0} = \sigma_{\max} \cdot \left[\frac{2 - (1 - \psi) \cdot (1 + R)}{1 + \psi} \right]. \quad (8)$$

Отметим, что в уравнениях (7) и (8), по сравнению с уравнениями используемыми ранее [1 ... 3], эквивалентные напряжения не зависят от величины пределов выносливости, что является существенным преимуществом при накоплении банка данных о нагруженности конструкций.

В качестве примера выполнены расчеты эквивалентных напряжений для образцов стали 10ХСНД: $\sigma_{-1} = 221$ МПа; $\psi = 0,44$ (испытания проведены Почтенным Е.К. с учениками) с использованием уравнений (7) и (8) при $\sigma_{\max} = 500$ МПа со значениями коэффициента асимметрии R равными: $-0,5$; 0 ; $+0,5$, а результаты сведем в таблицу 1.

Таблица 1 – Приведенные эквивалентные напряжения σ_{E_R} при различных коэффициентах асимметрии циклов напряжений R

R	0,5	0	+0,5
σ_{E_R}	430	360	280

В заключение отметим, что уравнения (7) и (8) рекомендуется использовать при приведении асимметричных циклов к эквивалентным по повреждению симметричным или отнулевым, если расчет ресурса ведется как по результатам натурных усталостных испытаний конструкций, так и при проектных расчетах в случае описания кривой

усталости степенной функцией, что обеспечивает наиболее приемлемые сопоставимые оценки характеристик нагруженности и усталостного ресурса.

2. Разработка методических принципов прогнозирующего расчета усталостного ресурса деталей машин и элементов конструкций в зависимости от проектируемых условий их эксплуатационной нагруженности.

Для обеспечения требуемой надежности на стадии проектирования деталей машин и элементов конструкций, испытывающих нерегулярное нагружение, необходима методика прогнозирующего вероятностного расчета долговечности в зависимости от проектируемых условий нагружения, т.е. режимов, которые будут испытывать реальные детали в эксплуатации.

На основании проведенных исследований, методические принципы расчета можно представить по следующей схеме: определение характеристик сопротивления усталости в вероятностном аспекте [4, 9 ... 10]; схематизация и приведение рядов напряжений со случайными значениями коэффициентами асимметрии к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным или отнулевым циклам [5]; вероятностная проектная оценка нагруженности [6]; вычисление долговечности с учетом суммирования усталостных повреждений в процессе снижения предела выносливости [10, 11]. При этом, на всех стадиях расчета будем считать справедливыми гипотезы о постоянстве числа циклов до точки нижнего перелома кривой усталости N_G и показателя наклона левой ветви кривой усталости m [9 ... 11].

Для экспериментальной проверки разрабатываемой методики использованы результаты экспериментов по испытанию локальных моделей рам тракторных прицепов при регулярном нагружении [2, 3], характеристики сопротивления усталости которых, в случае описания кривой усталости степенной функцией, определены ранее [9 ... 10]: $\bar{\sigma}_{R_{p=0,5}} = 63,84 \text{ МПа}$; $N_G = 3,2 \cdot 10^6$ циклов; $m = 4,09$. Характеристики эксплуатационной нагруженности, полученные путем тензометрирования опасных с точки зрения усталости локальных элементов рам тракторных прицепов [2, 3] в виде параметров распределения Вейбулла приведены в таблице 2. При этом на основании указанных экспериментов, размер блока нагружения для двух приведенных в таблице 1 эксплуатационных нагрузочных режимов принят $n = 10^4$ циклов, а количество циклов напряжений приходящихся на 1 км пробега равнялось $l = 250$ циклов/км.

Таблица 2 - Характеристики эксплуатационной нагруженности рам прицепов

Эксплуатационный режим нагружения	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	σ_w , МПа	$\frac{\sigma_w}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}$	w
1. Движение по спрофилированной грунтовой дороге с грузом	118,00	24,00	23,00	0,2447	1,58
2. Движение по бездорожью с грузом	170,00	21,00	40,00	0,2685	1,68

3. Основные положения методики расчета усталостного ресурса деталей машин и конструкций.

Основные положения методики расчета на долговечность деталей машин при нерегулярном нагружении, в т.ч. – с применением степенного уравнения кривой

усталости, разработанные автором, опубликованы в [10, 11] и др. – более ранних работах.

Исходными данными для расчета деталей и элементов конструкций, подверженных в эксплуатации нерегулярному нагружению, являются: начальное значение предела выносливости $\overline{\sigma}_R$ (или σ_{RP} - начальное значение предела выносливости, соответствующее заданной вероятности неразрушения P); показатель наклона левой ветви кривой усталости m ; значение максимального напряжения нагруженного блока σ_{\max} ; значение минимального напряжения нагруженного блока σ_{\min} ; значения параметров σ_w и w ; значение числа циклов до точки нижнего перелома кривой усталости N_G при регулярном нагружении.

Расчет включает в себя:

- определение (уточнение) размера нагруженного блока по формуле

$$n = \exp \left[\left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_w} \right)^w \right]; \quad (9)$$

- вычисление всех значений σ_i – х напряжений нагруженного блока размером n (i изменяется от 1 до n) по формуле

$$\sigma_i = \sigma_{\min} + \sigma_w \cdot \left[\ln \left(\frac{n}{i} \right)^{\frac{1}{w}} \right]; \quad (10)$$

- вычисление относительной доли каждого σ_i – го напряжения n_i в нагруженном блоке по формуле

$$\beta_i = \frac{n_i}{n} = \text{const}; \quad (11)$$

- вычисление конечного (минимального) значения предела выносливости, соответствующего моменту долома

$$\sigma_{RK} = \sigma_{Rj=k} = \sigma_{\max} \cdot \left(\frac{1}{N_G} \right)^{\frac{1}{m}}; \quad (12)$$

- вычисление долговечности (суммарного числа циклов до разрушения) с использованием метода линейного суммирования Почтенного Е.К., развитого в более ранних совместных [4, 5, 8 и др.] и персональных работах автора статьи, применительно к уравнению степенной функции кривой усталости (1) в записи (13), используемой в [9 ... 11] и др. более ранних работах,

$$N = N_G \cdot \left(\frac{\sigma_R}{\sigma} \right)^m, \quad (13)$$

где σ_R - предел выносливости при заданном коэффициенте асимметрии циклов напряжений R [9 ... 11], МПа;

σ - напряжение (в МПа), соответствующее долговечности N (в циклах).

Суммарное число циклов, необходимое для снижения предела выносливости от начального значения σ_{RH} до конечного σ_{RK} , соответствующего моменту долома, определяется по формуле

$$N_{\Sigma} = \sum_{j=1}^k \Delta N_{\Sigma_j}, \quad (14)$$

где ΔN_{Σ_j} - суммарное число циклов, необходимое для снижения предела выносливости на величину $\Delta\sigma_R$, определяемое по формуле (15)

$$\Delta N_{\Sigma_j} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{\Delta N_{Ti}} \right)^{-1}, \quad (15)$$

где β_i - относительная продолжительность действия σ_i - го напряжения блока, равная

$$\beta_i = \frac{N_i}{n}, \quad (16)$$

где N_i - число циклов в блоке n действия σ_i -го напряжения;

n - число циклов всех напряжений, действующих в данном нагрузочном блоке.

Число циклов ΔN_{Ti} , необходимое для снижения предела выносливости на величину $\Delta\sigma_R = \sigma_{Rj} - \sigma_{R(j+1)}$, определяется по уравнению (17)

$$\Delta N_{Ti} = N_G \cdot \left[\left(\frac{\sigma_{Rj}}{\sigma_i} \right)^m - \left(\frac{\sigma_{R(j+1)}}{\sigma_{(i+1)}} \right)^m \right]. \quad (17)$$

Выходными данными расчета являются: размер нагрузочного блока n , σ_{RK} и долговечность (суммарное число циклов до разрушения) N_{Σ} .

Разработаны схема алгоритма и программа расчета долговечности по предлагаемой методике. В результате расчета, средневероятная при ($P = 0,5$) долговечность рам в условиях движения по бездорожью с грузом (режим 2 по таблице 2), при $\bar{\sigma}_{RP=0,5} = 63,84$ МПа, $m=4,09$ и $N_G = 3,2 \cdot 10^6$ циклов, составила $N_{\Sigma} = 2480562$ цикла. При этом, в расчете учитывался каждый цикл напряжений нагрузочного блока с общим количеством экстремумов в блоке равным $n = 10^4$. Очевидно, что такой подход дает наибольшую точность суммирования. Ошибка может быть обусловлена лишь погрешностью аппроксимации реального убывающего ряда напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_i > \dots > \sigma_n$ с помощью распределения Вейбулла.

Следует отметить, однако, большую длительность расчета на ПЭВМ IBM386DX-40МГц. Общее время расчета составило около 25 часов, что, естественно, затруднит использование метода в КБ и САПР при использовании более мощных компьютеров.

В связи с изложенным, встает вопрос разработки методики формирования нагрузочного блока и выбора шага напряжений $\Delta\sigma$ при суммировании повреждений, обеспечивающих уменьшение времени счета с сохранением достаточной точности определения N_{Σ} .

4. Методика формирования нагрузочного блока.

На начальной стадии исследований, предложены 2 варианта формирования нагрузочного блока и определения приемлемого с точки зрения точности значения долговечности N_{Σ} . Схемы предложенных вариантов приведены на рисунке 2.

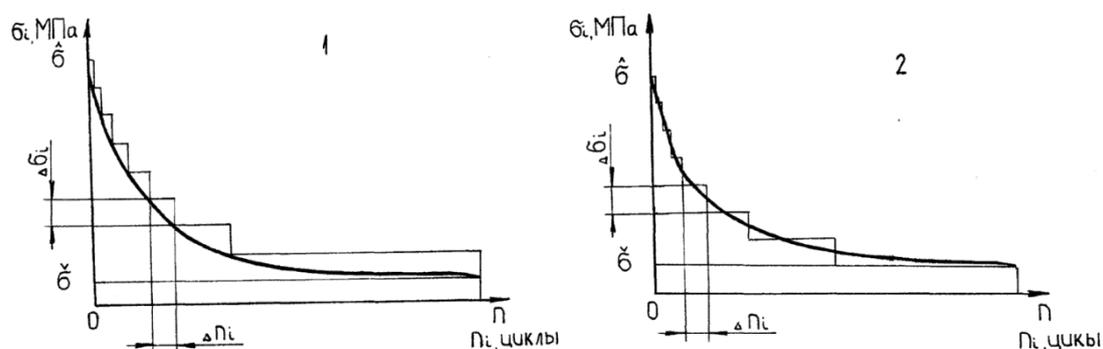


Рис. 2. Варианты формирования нагрузочных блоков

Как видно из рисунка 2, сущность формирования нагрузочных блоков заключается в определении требуемого с точки зрения точности расчета шага напряжений $\Delta\sigma_i$ в аппроксимированном распределении Вейбулла нагрузочном блоке. Очевидно, что при увеличении $\Delta\sigma_i$ от нуля и выше, мы пренебрегаем учетом каждого напряжения нагрузочного блока, уменьшая тем самым количество уровней напряжений, по которым осуществляется расчетное суммирование усталостных повреждений в процессе снижения предела выносливости.

Расчет в данном случае отличается от расчета с использованием ступеньчатых блоков, например - в [6, 11], тем, что после вычисления убывающего ряда σ_i -ых напряжений по формуле (10), последний разбивается на интервалы с одинаковым шагом $\Delta\sigma_i$. Далее подсчитывается количество экстремумов σ_i -ых напряжений Δn_i , приходящихся на каждый интервал $\Delta\sigma_i$. После этого определяется относительная доля каждого интервала напряжений в новом ступенчатом нагрузочном блоке по формуле (16).

Очевидно, что, при таком подходе, с ростом шага напряжений $\Delta\sigma_i$ скорость счета будет возрастать при одновременном снижении точности вычисления долговечности N_Σ .

Для двух предложенных на рисунке 1 вариантов формирования нагрузочных блоков (1 и 2) разработаны схемы алгоритма и программы определения долговечности на ПЭВМ. С целью определения приемлемого варианта проведен сравнительный машинный эксперимент по определению оптимального с точки зрения точности и времени счета шага напряжений для обоих вариантов. Результаты расчета приведены на рисунке 3.

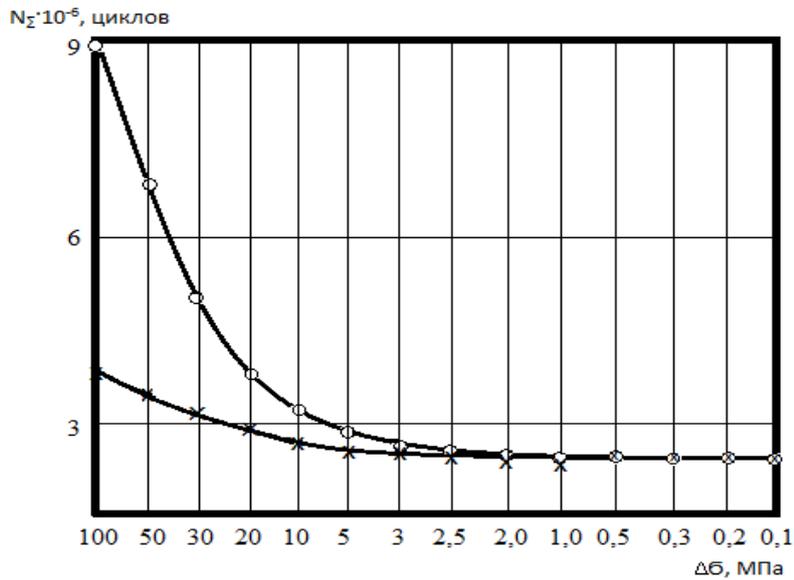


Рис. 3. Зависимость усталостного ресурса при нерегулярном нагружении рам от шага напряжений в нагрузочном блоке (по рис. 2: ○ - вариант 1; × - вариант 2)

Совместный анализ рисунков 2 и 3 позволяет сделать вывод о целесообразности использования в расчетной практике метода формирования нагрузочного блока 2 (по рисунку 2), т.к. в этом случае требуемая точность определения N_{Σ} до 100 циклов (соответствует точности измерений числа циклов до разрушения со счетчиков испытательных машин) достигается при шаге напряжений $\Delta\sigma \leq 0,2 \text{ МПа}$ и времени расчета около 4,5 мин. Аналогичная точность по методу 1 достигается при шаге напряжений $\Delta\sigma \approx 0,1 \text{ МПа}$ и времени счета около 14 часов.

Схема расчетного блока случайного нагружения приведена на рисунке 4.

Таким образом, в отличие от ранее принятой расчетной пратики, эксплуатационный ступенчатый блок заменен блоком, аппроксимированным по предложенной методике [6], что позволит при расчете долговечности учесть каждое напряжение блока, имея в арсенале средств автоматизации работы конструкторов и расчетчиков быстродействующие персональные компьютеры. Отметим, что в данном случае нагруженность задается в вероятностном аспекте, что весьма важно при вероятностных расчетах долговечности.

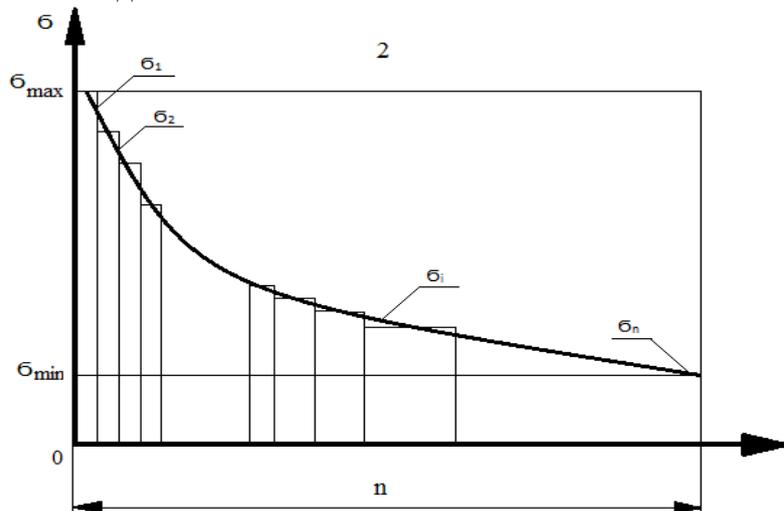


Рис.4. Схема расчетного блока случайного нагружения

С целью автоматизации разработанной методики анализа случайных процессов нагруженности и построения нагрузочных блоков разработаны схема алгоритма и программа для расчета усталостного ресурса деталей машин и конструкций с формированием нагрузочного блока по методу 2 (рисунок 4).

5. Заключение. На основании проведенных исследований разработаны: методы формирования и аппроксимации нагрузочных блоков и расчета усталостного ресурса, в.ч. – при использовании степенного уравнения кривой усталости, наиболее приемлемого на стадии проектирования деталей машин и элементов конструкций при случайном нагружении в зависимости от эксплуатационных условий их функционирования; схема алгоритма и программа для расчета усталостного ресурса деталей машин и конструкций с формированием нагрузочных блоков, в.ч. – обоснованием их основных характеристик (шага напряжений и др.). Выполнена верификация разработанных методов на результатах натуральных и вычислительных компьютерных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Почтенный Е.К. Упрощенный метод линейного суммирования усталостных повреждений с учетом снижения предела выносливости // Вестник машиностроения. - 1986. - №8. - С. 33 - 37.
2. Вероятностная оценка долговечности рам транспортных средств: оперативно-информационные материалы / Е.К. Почтенный, А.И. Журавель, К.В. Щурин, В.И. Миркичанов и др.- Минск: Изд. ИНДМАШ АН БССР, 1985. - 38 с.
3. Почтенный Е.К. Вероятностная оценка долговечности деталей машин при нерегулярном нагружении по результатам испытаний при регулярном нагружении // Надежность и контроль качества. - 1988. - №10. - С. 25 - 29.
4. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Вероятностные диаграммы многоциклового усталости деталей машин // Вестник машиностроения. - 1993. - № 12.- С. 5 - 7.
5. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Приведение асимметричных циклов к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным или отнулевым // Вестні НАН Беларусі: Серыя фізіка-тэхнічных навук.- 2000. - №2. - С. 59 - 61.
6. Капуста П.П. Методика оценки нерегулярной нагруженности деталей и конструкций машин // Вестник машиностроения. – 2005. - №6. – С. 13-18.
7. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Прогнозирование эксплуатационного нагружения несущих конструкций автомобилей-самосвалов // Горная механика. – 2005. - № 3. - С. 47-60.
8. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Экспериментально-аналитическая методика ускоренных испытаний конструкций при регулярном многоцикловоом нагружении и оценка их ресурса при случайном многочастотном и многорежимном нагружении // Вестник машиностроения. – 2006. - №1. – С. 28-40.
9. Капуста П.П. Вариация характеристик сопротивления усталости сталей на разных уровнях напряжений при проектных оценках ресурса // Материалы, технологии, инструменты. – 2009, том 14, № 4, - С. 22-29.
10. Капуста П.П. Вариация характеристик сопротивления усталости стали в процессе развития повреждений и снижения предела выносливости при проектной оценке ресурса // Материалы, технологии, инструменты. - 2011, том 16, № 1, – С. 11 – 15.
11. Капуста П.П. Проектные кинетические диаграммы усталости стали и вероятностная оценка ресурса при нерегулярном нагружении с учетом снижения предела выносливости // Материалы, технологии, инструменты. - 2011, том 16, № 2, – С. 14 – 21.