

Капуста П.П.

**ПРОЕКТНЫЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ
ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ РЕГУЛЯРНОМ И НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Разработана методика построения проектных функций распределения усталостной долговечности деталей машин и конструкций, подверженных нерегулярному нагружению по результатам испытаний при регулярном нагружении с использованием для описания кривой усталости степенной функции.

Постановка задачи исследования. При проектных вероятностных расчетах долговечности при нерегулярном нагружении, интерес представляют вопросы методики построения функций распределения усталостной долговечности (ФРД) $P = f(\lg N_{\Sigma})$, описывающих зависимость вероятности неразрушения P от логарифма суммарного числа циклов до разрушения $\lg N_{\Sigma}$ (влияние степени тяжести нерегулярного нагружения на характер (наклон) кривых $P = f(\lg N_{\Sigma})$ в сравнении с регулярным), а так же способ определения доверительных областей для функции распределения долговечности.

Методика исследования. Системный подход к анализу процессов случайного эксплуатационного нагружения опасных по усталости элементов несущих систем, агрегатов, узлов, конструкций и деталей машин при регулярном и нерегулярном нагружении. Обоснование принципов проектных, в т. ч. – вероятностных, расчетов усталостного ресурса с учетом степени тяжести режимов нерегулярного нагружения на основе изучения их корреляционной взаимосвязи посредством разработанного ранее универсального способа формирования нагрузочных блоков, управления их основными характеристиками на стадиях проектирования и «прочностной доводки» машин. Алгоритмизация, программирование и автоматизация расчетов исследуемых характеристик нагруженности и долговечности опасных по усталости элементов деталей машин и конструкций. Верификация разработанных методов на результатах натуральных и вычислительных компьютерных экспериментов.

Результаты исследований. Приводятся принципы прогнозирования вероятностного ресурса путем построения проектных функций распределения усталостной долговечности деталей машин и конструкций при регулярном и нерегулярном нагружении, основанные на разработанных методиках и методах [1–12], с использованием для описания кривых усталости уравнения степенной функции.

Методы построения функций распределения усталостной долговечности и их доверительных областей. Метод заключается в определении значений пределов выносливости детали (образца) σ_{RP} , соответствующего требуемой (заданной) вероятности неразрушения P , с последующим вычислением долговечности $N_{\Sigma P}$ в циклах $P = f(\lg N_{\Sigma})$ по методике, описанной в [2, 4, 7–10]. В качестве примера, на рисунке 1 приведены функции распределения усталостной долговечности рам тракторных прицепов в случае движения по бездорожью с грузом (кривая 3) и по спрофилированной

грунтовой дороге с грузом (кривая 4) [8–9]. Отметим, что ось ординат соответствует вероятностям неразрушения в квантилях нормального распределения.

Здесь пределы выносливости σ_{RP} определены с использованием методики приведенной в [2, 4, 7–10] с учетом гипотезы о постоянстве предела выносливости $\overline{\sigma_R}$ при переходе от регулярного нагружения к нерегулярному. Расчет ведут при шаге напряжений $\Delta\sigma = 0,2$ МПа при следующих исходных параметрах: $\sigma_{RP} = f(P) = \text{var}$; $\overline{S} = 4,5$ Мпа = const; $m = 4,09 = \text{const}$, $N_G = 3,2 \cdot 10^6$ циклов = const [2, 8–10].

Для экспериментальной проверки исследований по оценке нерегулярного нагружения деталей машин используем результаты определения характеристик нагруженности путем тензометрирования опасных с точки зрения усталости зон рам тракторных прицепов [2]. Характеристики эксплуатационной нагруженности рам в виде параметров распределения Вейбулла. 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 1 – Характеристики эксплуатационной нагруженности рам тракторных прицепов

Эксплуатационный режим нагружения	$\hat{\sigma}$, МПа	$\check{\sigma}$, МПа	σ_w , МПа	$\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}}$	w
1. Движение по профилированной 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

Эксплуатационный ступенчатый блок заменен блоком, аппроксимированным с помощью распределения Вейбулла [12], 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.

Влияние степени тяжести нерегулярного нагружения на характер кривых $P = f(\lg N_\Sigma)$. Для установления влияния степени тяжести нерегулярного нагружения на характер (наклон) кривых $P = f(\lg N_\Sigma)$ в сравнении с регулярным нагружением, произведем расчет функций распределения усталостной долговечности рам тракторных прицепов при регулярном нагружении для двух уровней (амплитуд) напряжений σ_a : $\sigma_{a1} = 170$ МПа; $\sigma_{a2} = 118$ МПа. Расчет долговечности проводился с использованием методики [12] и сведен в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет функций распределения усталостной долговечности рам тракторных прицепов при регулярном нагружении

P	0,5			0,8	0,9	0,95	0,99	0,995	0,999
t	0	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	2,326	2,576	3,090
$\bar{\sigma}_{RP}$,	63,84	62,70	61,48	60,05	58,07	56,44	53,37	52,15	49,935
N_{Σ} , Циклы	58270/ 259407	54130/ 24978	49950/ 222369	45366/ 201962	39553/ 176082	35205/ 156727	28006/ 124680	25679/ 114321	21335/ 94979
$\lg N_{\Sigma}$	4,7654/ 5,4140	4,7334/ 5,3820	4,6985/ 5,3471	4,6567/ 5,3053	4,5972/ 5,2457	4,5466/ 5,1951	4,4473/ 5,0958	4,4096/ 5,0581	4,3291/ 4,9776

Примечание: в числителе – $\sigma_{a1} = 170$ МПа ; в знаменателе – $\sigma_{a2} = 118$ МПа.

Сравнительный регрессионный анализ влияния степени тяжести режима нерегулярного нагружения по сравнению с регулярным на характер функций распределения долговечности для рам тракторных прицепов, приведенный в таблице 3, подтверждает положение о независимости характера (наклона) кривых $P = f(\lg N)$ от уровня напряжений, на которых проводятся испытания, в случае регулярного нагружения [3, 8–10, 12]. При переходе от регулярного нагружения к нерегулярному и с уменьшением степени тяжести режима нагружения, наклон кривых $P = f(\lg N_{\Sigma})$ увеличится в сторону оси P. Если изменения наклона кривых $P = f(\lg N_{\Sigma})$ не учитывать (штриховая линия на рисунке 1), то завышение расчетной усталостной долговечности, например для вероятности неразрушения $P = 0,999$, составит: в случае движения по бездорожью с грузом в 1,046 раза (4,62 %); в случае движения по спрофилированной грунтовой дороге с грузом – в 1,011 раза (1,13 %). Приняв такие отклонения статистически не значимыми, при построении функций распределения усталостной долговечности деталей машин и элементов конструкций (в случае проектных расчетов), подверженных нерегулярному нагружению, нет оснований отвергать гипотезу об эквидистантности кривых $P = f(\lg N_{\Sigma})$ с изменением степени тяжести нагрузочного режима.

Таблица 3 – Сравнительный регрессионный анализ влияния степени тяжести нерегулярного нагружения на характер функций распределения усталостной долговечности по сравнению с регулярным нагружением для рам тракторных прицепов

Наименование режима нагружения	Уравнение регрессии функций распределения усталостной долговечности	Примечание
1. Регулярное нагружение: – при $\sigma_{a1} = 170$ МПа – при $\sigma_{a2} = 118$ МПа	$\lg N = 4,7720 - 0,14 \lg t$ $\lg N = 5,4206 - 0,14 \lg t$	в циклах в циклах
2. Движение по бездорожью с грузом	$\lg N_{\Sigma} = 6,3996 - 0,15 \lg t$ $\lg N = 4,0017 - 0,15 \lg t$	в циклах в км
3. Движение по спрофилированной грунтовой дороге с грузом	$\lg N_{\Sigma} = 7,0885 - 0,18 \lg t$ $\lg L = 4,6906 - 0,18 \lg t$	в циклах в км

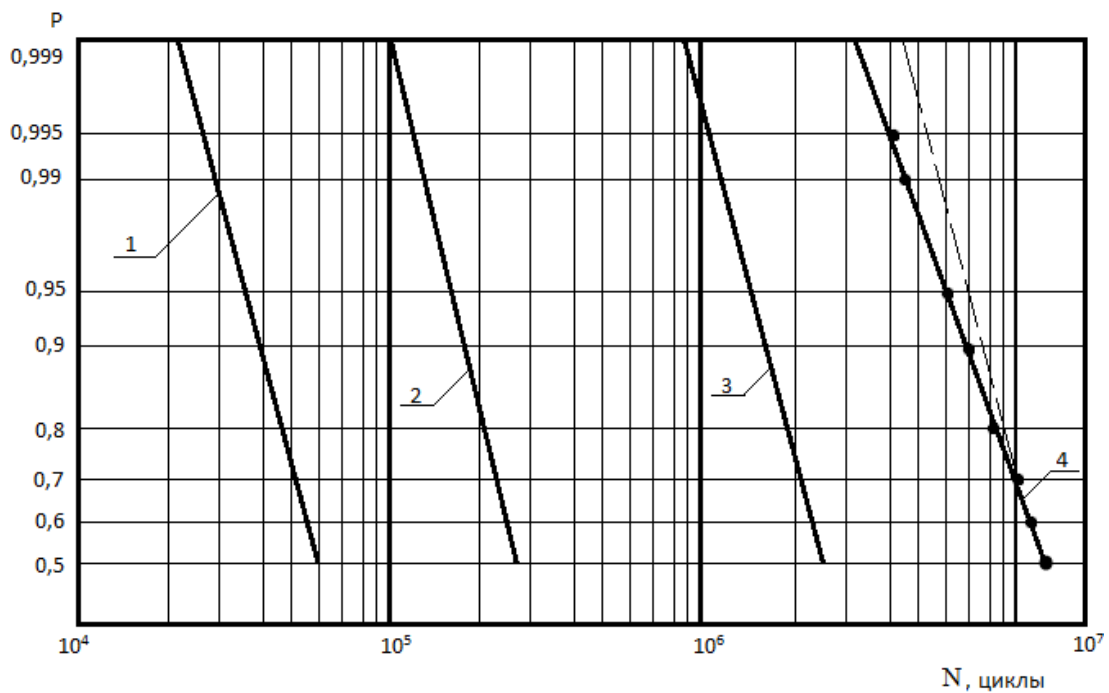


Рис. 1. Функции распределения усталостной долговечности при регулярном (1 – $\sigma_{a1} = 170$ МПа, 2 – $\sigma_{a2} = 118$ МПа) и нерегулярном (3 – движение по бездорожью с грузом, 4 – движение по профилированной грунтовой дороге с грузом) нагружении рам тракторных прицепов.

Результаты расчета функций усталостной долговечности в километрах пробега $P = f(\lg L)$ и приведены на рис. 2.

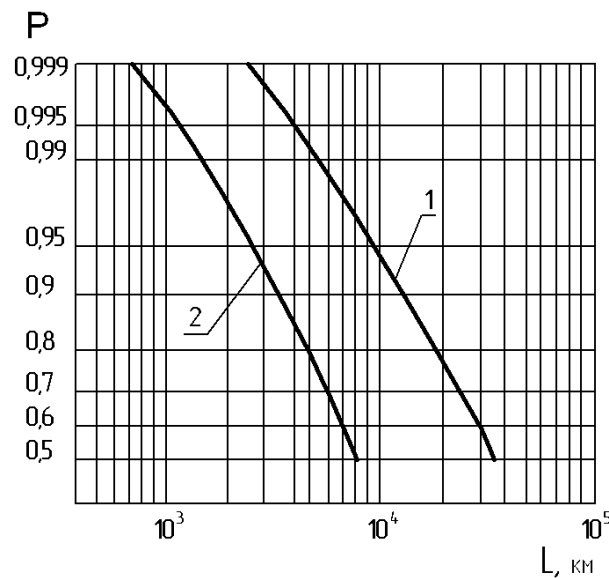


Рис. 2. Функции усталостной долговечности рам в километрах пробега $P = f(\lg L)$

Анализ рис. 2 показывает, что при увеличении требуемой вероятности неразрушения P , например от 0,5 до 0,99, расчетная долговечность уменьшается: в случае движения по профилированной дороге с грузом (кривая 1) – в 2,65 раза; в случае движения по бездорожью с грузом (кривая 2) – в 2,18 раза.

Определение доверительных областей для функции распределения усталостной долговечности. Доверительные области для функций распределения усталостной долго-

вечности будем рассчитывать исходя из доверительных интервалов для функции распределения предела выносливости детали $\sigma_{RP\min}$ и $\sigma_{RP\max}$ с учетом доверительных интервалов для среднего квадратического отклонения предела выносливости $S_{\sigma_{R\min}}$ и $S_{\sigma_{R\max}}$. Такой подход обусловлен испытанием в большинстве случаев малого количества деталей при определении их характеристик сопротивления усталости.

Расчет проводится при шаге напряжений нагрузочных блоков $\Delta\sigma = 0,2$ МПа. При этом в ПЭВМ вводится в качестве исходного не среднее значение предела выносливости, для заданной вероятности неразрушения P и соответствующему значению квантили нормального распределения t предела выносливости, а значения предела выносливости $\sigma_{RP} = \sigma_{R\min} - tS_{\sigma_{R\max}}$, соответствующему интервалу для предела выносливости $\sigma_{RP\min}$, вычисляемому для случая определения нижней доверительной области функции распределения усталостной долговечности. При определении верхней доверительной области функции распределения долговечности, в ПЭВМ вводят значения σ_{RP} , соответствующие верхнему доверительному интервалу для предела выносливости $\bar{\sigma}_{R\min}$.

При расчетной оценке долговечности для вероятностей неразрушения $P \geq 0,5$, практический интерес представляют только нижние доверительные области для функции распределения долговечности.

В качестве примера по приведённой методике нижние определены 95 % – ные доверительные области для функции распределения усталостной долговечности рам тракторных прицепов (рис. 3) при регулярном (для $\sigma_a = 170$ МПа, кривые 1) и нерегулярном (для $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma} = 0,2685$, кривые 2) нагружении. На рис. 3 приведены сравнительные

графики функций распределения долговечности с нижними 95 %-и доверительными областями.

В случае проектных вероятностных расчетов деталей машин на долговечность и определения характеристик сопротивления усталости по результатам испытания малых выборок зависимости $P = f(\lg N_{\Sigma})$ рекомендуется представлять как нижние граничные кривые доверительных областей функции распределения усталостной долговечности.

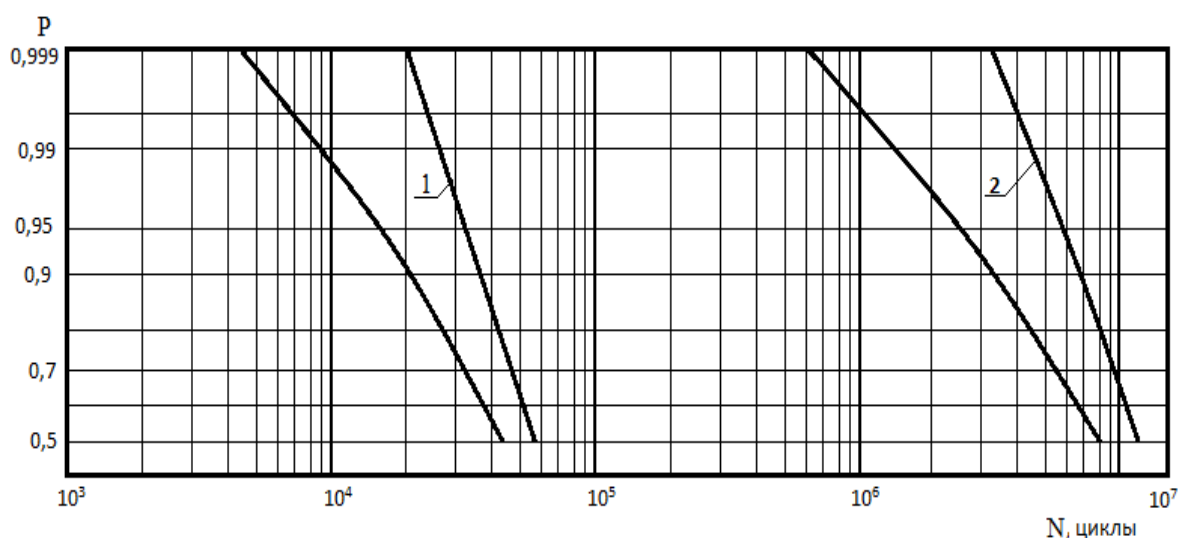


Рис. 3. Проектные функции распределения долговечности рам тракторных прицепов, соответствующие нижним 95 % -ным доверительным областям их предела выносливости

Основные результаты и выводы. Развита ранее разработанная автором методика проектного расчета долговечности деталей машин и элементов конструкций в зависимости от проектируемых условий их эксплуатационной нагруженности с использованием для описания кривой усталости степенной функции.

Экспериментально, на примерах натуральных элементов конструкций, подтверждены гипотезы о постоянстве показателя наклона левой ветви кривой усталости m и предела выносливости σ_{RP} при переходе от регулярного нагружения к нерегулярному.

На результатах испытаний локальных моделей рам тракторных прицепов показано, что при проектных вероятностных расчетах изменением эквидистантности функций распределения усталостной долговечности $P = f(\lg N_{\Sigma})$ при переходе от регулярного нагружения к нерегулярному можно пренебречь.

Разработана методика построения проектных функций распределения усталостной долговечности деталей машин и конструкций, подверженных нерегулярному нагружению по результатам испытаний при регулярном нагружении с использованием для описания кривой усталости степенной функции.

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. Миркитанов и др. – Минск: Изд. ИНДМАШ АН БССР, 1985. – 38 с.
3. Почтенный, Е. К., Капуста, П. П. Вероятностные диаграммы многоциклового усталости деталей машин // Вестник машиностроения. – 1993. – № 12. – С. 5–7.
4. Почтенный, Е. К., Капуста, П. П. Приведение асимметричных циклов к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным или отнулевым // Весці НАН Беларусі: Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2000. – № 2. – С. 59 – 61.
5. Капуста, П. П. Методика оценки нерегулярной нагруженности деталей и конструкций машин // Вестник машиностроения. – 2005. – № 6. – С. 13–18.
6. Почтенный, Е. К., Капуста, П. П. Прогнозирование эксплуатационного нагружения несущих конструкций автомобилей-самосвалов // Горная механика. – 2005. – № 3. – С. 47–60.
7. 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.
8. 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.
9. Капуста, П. П. Вариация характеристик сопротивления усталости при регулярном нагружении стали в процессе развития повреждений и снижения предела выносливости при проектной оценке ресурса // Материалы, технологии, инструменты. – 2011, том 16, № 1, – С. 11–15.
10. 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.
11. Капуста, П. П. Принципы обеспечения надежности и ресурсного проектирования несущих систем мобильных машин // Грузовик. – 2013, № 3. – С. 24–31.
12. Капуста, П. П. Методика формирования нагрузочных блоков и проектный расчет усталостного ресурса деталей машин и конструкций при случайном нагружении // Международный научно-технический сборник «Теоретическая и прикладная механика». Вып. 34. Минск, 2019. С. 336–343.

Поступила 22.01.2020