

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)  $\sigma_{RP}$ , 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  $\sigma_{RP}$  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	$\sigma_w$ , 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  $\sigma_a$ :  $\sigma_{a1} = 170$  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
$N_{\Sigma}$ , 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

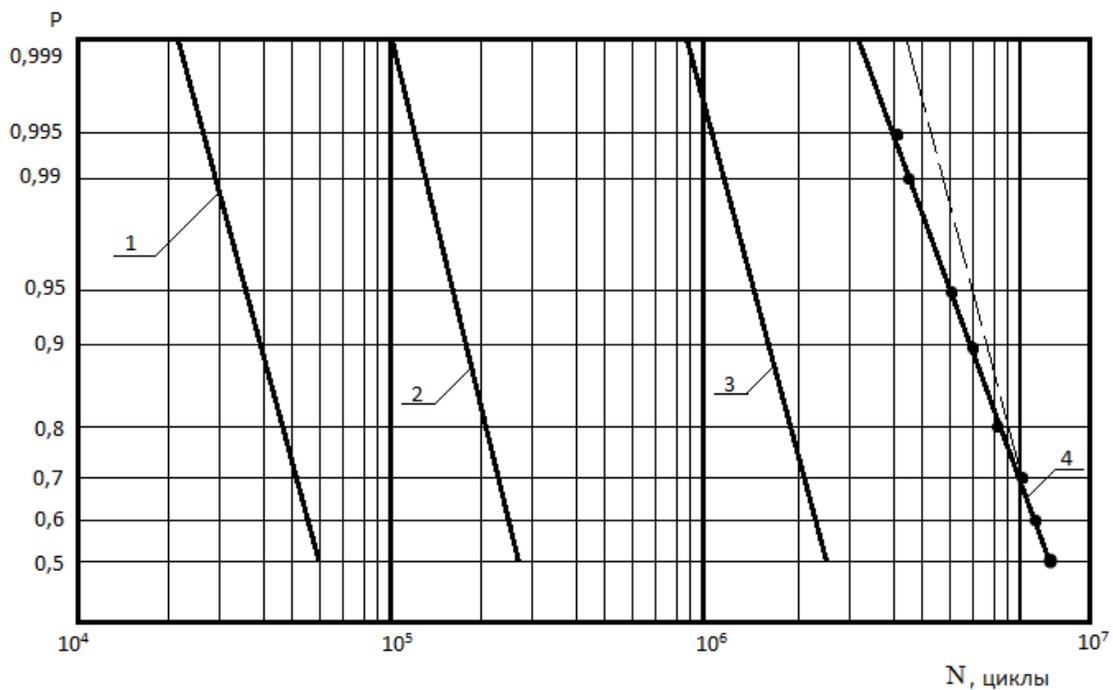


Рис. 1. Функции распределения усталостной долговечности при регулярном (1 –  $\sigma_{a1} = 170$  МПа, 2 –  $\sigma_{a2} = 118$  МПа) и нерегулярном (3 – движение по бездорожью с грузом, 4 – движение по профилированной грунтовой дороге с грузом) нагружении рам тракторных прицепов.

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

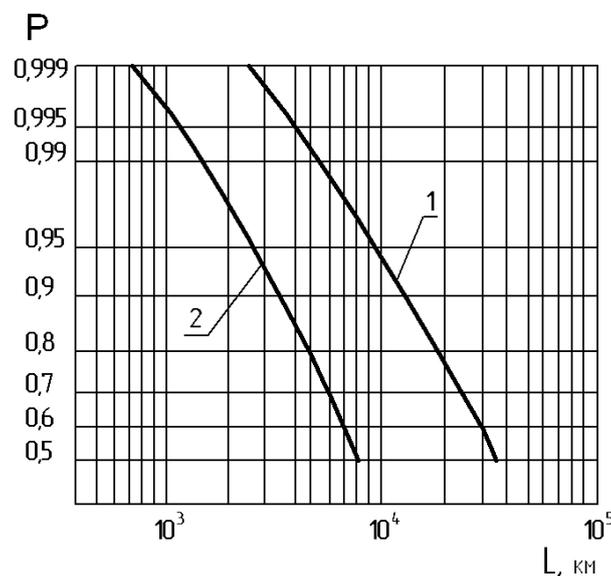


Рис. 2. Функции усталостной долговечности рам в километрах пробега  $P = f(\lg L)$

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  $\sigma_{RP}$ , 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.

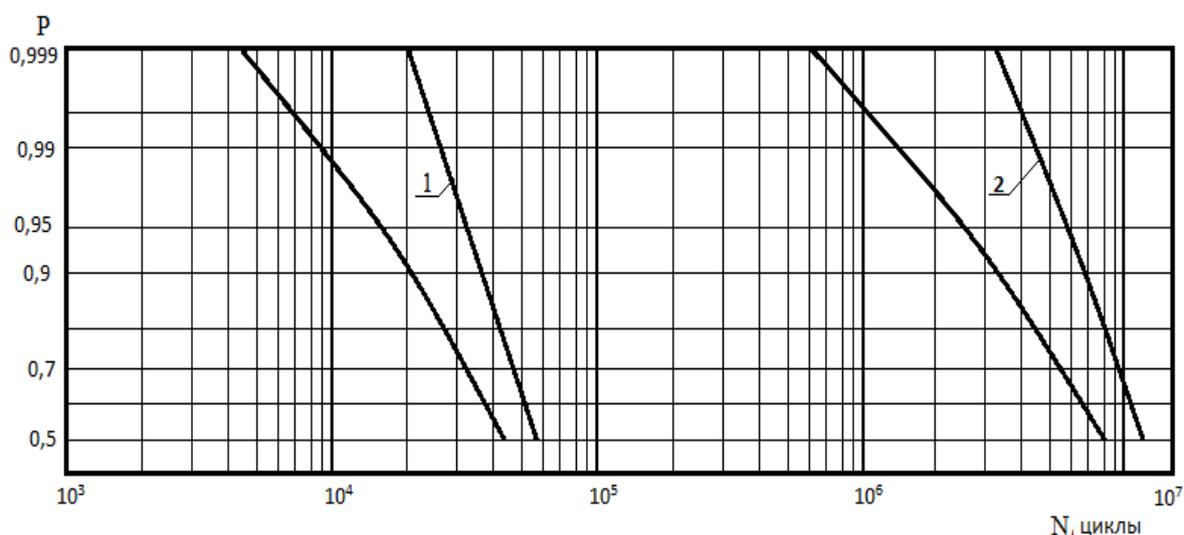


Рис. 3. Проектные функции распределения долговечности рам тракторных прицепов, соответствующие нижним 95 % -ным доверительным областям их предела выносливости

**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  $\sigma_{RP}$  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