

УДК 629.7.036.54

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РЕСУРСНЫХ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ

© 2024 г. А. Ю. Бондаренко^{а, *}, А. И. Лиходед^{а, **}, В. А. Титов^а,
С. П. Фунтиков^б, А. Н. Шилин^б

^аЦентральный научно-исследовательский институт машиностроения,
г.о. Королёв, Россия

^бРакетно-космический центр “Прогресс”, г. Самара, Россия

*e-mail: andrei.bondarenko@phystech.edu,

**e-mail: likhoded@tsniimash.ru

Поступила в редакцию 04.07.2023 г.

После доработки 23.08.2023 г.

Принята к публикации 24.08.2023 г.

Существует ряд случаев эксплуатаций конструкций, в которых внешние воздействия носят случайный колебательный характер. Это в первую очередь транспортировочные случаи – железнодорожная и автомобильная транспортировки.

Поэтому при формировании режимов нагружения для оценки ресурсной прочности конструкций в этих случаях используется вероятностно-статистический подход. Представлены основные принципы такого подхода при формировании спектров циклического нагружения для отработки и анализа ресурсной прочности изделий. Проведена оценка уровней циклического нагружения, и сформированы предложения по использованию разработанного подхода при оценке ресурсной прочности конструкций.

Ключевые слова: случайная вибрация, вероятностно-статистический подход, спектр циклического нагружения, ресурсная прочность, транспортирование изделий

DOI: 10.31857/S1026351924020108, EDN: uvzimc

1. Введение. При проектировании и испытаниях конструкций ракетно-космической техники широко распространен принцип, согласно которому достижение предельного состояния конструкции по критерию прочности наиболее вероятно произойдет при наибольших уровнях внешних воздействий – статических, вибрационных, ударных, акустических. Соответственно и большая часть расчетных и экспериментальных работ основана на анализе поведения конструкций при этих типах внешних воздействий.

С постепенным ростом заинтересованности в многоразовых ракетных системах и расширением требований по условиям эксплуатации космической техники возникает необходимость более внимательно относиться к тем случаям нагружения конструкций, в которых внешние воздействия

носят длительный случайный колебательный характер. Эти случаи в основном связаны с наземной эксплуатацией – железнодорожным и автомобильным транспортированием изделий.

В данной статье рассматриваются вопросы обеспечения ресурсной прочности конструкций, то есть прочности при повторяющемся нагружении, характерном для транспортировки. В общем случае ресурсная прочность изделий определяется спектром циклического нагружения – количеством циклов нагружения с различными уровнями.

При этом нагрузки для оценки ресурсной прочности должны базироваться не на расчетных уровнях с учетом коэффициентов безопасности, а на эксплуатационных, наиболее близко отражающих условия нагружения в процессе эксплуатации. Это позволяет избежать неоправданного завышения ресурсных нагрузок и заниженной оценки запасов ресурсной прочности конструкций.

Максимальные эксплуатационные нагрузки формируются на основе обобщения длительного опыта натуральных измерений внешних воздействий (перегрузок) при транспортировочных испытаниях. Эти уровни формируются из весовой составляющей (в вертикальном направлении) и экстремальных низкочастотных перегрузок в пределах низших тонов колебаний транспортируемого изделия и оборудования. Однако в некоторых случаях достоверные данные о спектрах нагружения на определенных этапах эксплуатации могут отсутствовать.

2. Основные допущения вероятностно-статического подхода. В связи с этим предлагается вероятностно-статистический подход к формированию спектров циклического нагружения для отработки и анализа ресурсной прочности изделий. Этот подход базируется на нескольких основных предположениях:

1. Задании коэффициента между среднеквадратичным значением (СКЗ) перегрузки σ и ее максимальным эксплуатационным n_{\max}^{ekspl} значением:

$$n_{\max}^{ekspl} = k\sigma. \quad (2.1)$$

В некоторых случаях величина k назначается на экспертном уровне с учетом имеющихся прецедентов и опыта.

2. Оценке предельного количества циклов нагружения объекта N_{Σ} с использованием данных о длительности воздействий, характерных частотах колебаний транспортных средств, а также частот наиболее энергоемких тонов колебаний объекта.

3. Применении гипотетического закона распределения перегрузок. При анализе динамических процессов для амплитуд случайных колебаний используется интегральный Рэлеевский закон распределения [1]:

$$\mathcal{P}(x) = 1 - e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (x > 0). \quad (2.2)$$

4. Выборе нормативного значения вероятности непревышения тех или иных параметров внешних воздействий или нагрузок. Как правило, для различных параметров внешних воздействий принимаются следующие уровни вероятности непревышения \mathcal{P}_{giv}^i :

$$\mathcal{P}_{giv}^i = 0.95, 0.99, 0.997 \quad (i = 1, 2, 3). \quad (2.3)$$

На основе интегрального закона распределения Рэлея (2.2) определяются максимальные перегрузки, принятые для формирования спектров циклического нагружения при заданных уровнях вероятности не превышения \mathcal{P}_{giv}^i (2.3). С учетом (2.2) имеем:

$$1 - e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} = \mathcal{P}_{giv}^i \quad (i = 1, 2, 3).$$

Для определенности далее будем рассматривать внешние воздействия в виде линейных перегрузок. Из решения этого трансцендентного уравнения величина перегрузки, которая будет использоваться для оценки количества циклов нагружения при заданной вероятности не превышения \mathcal{P}_{giv}^i , определится следующими соотношениями:

$$x_{res}^i = c^i \sigma, \text{ где } c^i = \sqrt{-2 \ln(1 - \mathcal{P}_{giv}^i)} \quad (i = 1, 2, 3).$$

Отметим, что под корнем стоит положительная величина, так как $0 < 1 - \mathcal{P}_{giv}^i < 1$, и, следовательно, логарифм $\ln(1 - \mathcal{P}_{giv}^i)$ принимает отрицательные значения. При этом величина среднеквадратичного значения σ определяется из соотношения (2.1).

В итоге уровням вероятности не превышения 0.95, 0.99, 0.997 (2.3) соответствуют следующие уровни перегрузок:

$$\begin{aligned} x_{res}^1 &= 2.448 \cdot \sigma, & c^1 &= 2.448, \\ x_{res}^2 &= 3.035 \cdot \sigma, & c^2 &= 3.035, \\ x_{res}^3 &= 3.409 \cdot \sigma, & c^3 &= 3.409. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Таким образом, при формировании общего количества циклов нагружения для ресурсных испытаний предлагается учитывать перегрузки разного уровня, не превышающие значения x_{res}^i (2.4).

3. Оценка количества эквивалентных циклов нагружения. Для сокращения количества циклов нагружения и, следовательно, объемов и сроков ресурсных испытаний используется процедура приведения случайных перегрузок, распределенных в соответствии с принятым законом (2.2), к эквивалентным циклам с максимальной амплитудой x_{res}^i , соответствующей принятому уровню вероятности не превышения.

Эта задача решается на основе гипотезы эквивалентности вибродинамических воздействий, являющейся следствием усталостной кривой Веллера [2]:

$$(x_j)^4 \cdot N_j = (x_{res}^i)^4 \cdot N_{ji}^{eq}. \quad (3.1)$$

Здесь x_j – перегрузка j -го уровня;
 N_j – количество циклов перегрузок j -го уровня;

N_{ji}^{eq} – эквивалентное количество циклов с максимальной перегрузкой, принятой для ресурсных испытаний x_{res}^i .

Интегральной вероятности закона распределения (2.2) соответствует плотность вероятности:

$$p(x) = \frac{dP}{dx} = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (x > 0). \quad (3.2)$$

С использованием гипотезы эквивалентности (3.1) и выражения для плотности вероятности (3.2) определим количество приведенных циклов, соответствующих максимальной перегрузке x_{res}^i .

Количество циклов dN_x с амплитудами, лежащими в диапазоне $[x, x + dx]$, определяется равенством:

$$dN_x = N_{\Sigma} \cdot p(x) dx.$$

С учетом соотношения (3.1) количество приведенных к максимальной ресурсной перегрузке x_{res}^i циклов dN_x^{eq} , эквивалентных количеству циклов dN_x , соответствующих текущему значению x , примет вид:

$$dN_x^{eq} = N_{\Sigma} \cdot \left(\frac{x}{x_{res}^i} \right)^4 \cdot p(x) dx.$$

Общее количество приведенных к максимальной ресурсной перегрузке x_{res}^i (2.4) циклов N_i^{eq} , используемых в оценке ресурса при заданной вероятности непревышения \mathcal{P}_{giv}^i , определяется следующим интегралом:

$$N_i^{eq} = \int_0^{x_{res}^i} N_{\Sigma} \cdot \left(\frac{x}{x_{res}^i} \right)^4 \cdot p(x) dx \quad (i = 1, 2, 3). \quad (3.3)$$

С учетом выражения для плотности вероятности (3.2) этот интеграл преобразуется к следующему виду:

$$N_i^{eq} = \frac{N_{\Sigma}}{\sigma^2 \left(x_{res}^i \right)^4} \mathcal{I}_1(x), \quad (3.4)$$

где

$$\mathcal{I}_1(x) = \int_0^{x_{res}^i} x^5 \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (3.5)$$

Для вычисления интеграла (3.5) воспользуемся правилом интегрирования по частям, представив его в следующей форме:

$$\mathcal{I}_1(x) = \sigma^2 \int x^4 \cdot \frac{x}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx.$$

Тогда будем иметь:

$$\mathcal{I}_1(x) = \sigma^2 \left(-x^4 \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} + 4\mathcal{I}_2(x) \right), \quad (3.6)$$

здесь

$$\mathcal{I}_2(x) = \int x^3 \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx.$$

Интеграл $\mathcal{I}_2(x)$ также берется по частям, в результате чего имеем:

$$\mathcal{I}_2(x) = \sigma^2 \left(-x^2 \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} + 2 \int x \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \right)$$

Интеграл, входящий в это выражение, элементарно вычисляется, и для интеграла $\mathcal{I}_1(x)$ с учетом (3.6) окончательно получим выражение:

$$\mathcal{I}_1(x) = \sigma^2 \left(-x^4 - 4\sigma^2 x^2 - 8\sigma^4 \right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}.$$

Тогда выражение для количества приведенных к максимальной перегрузке x_{res}^i циклов (3.3), используемых в оценке ресурса, N_i^{eq} для различных уровней вероятности неперевышения \mathcal{P}_i примет вид:

$$N_i^{eq} = \frac{N_\Sigma}{(x_{res}^i)^4} \left[\left(-(x_{res}^i)^4 - 4\sigma^2 (x_{res}^i)^2 - 8\sigma^4 \right) e^{-\frac{(x_{res}^i)^2}{2\sigma^2}} + 8\sigma^4 \right] \quad (i = 1, 2, 3).$$

Равенство для приведенных циклов N_i^{eq} с учетом выражения для максимальной перегрузки x_{res}^i (2.4) запишется так:

$$N_i^{eq} = \frac{N_\Sigma}{(c^i)^4} \left[\left(-(c^i)^4 - 4(c^i)^2 - 8 \right) e^{-\frac{(c^i)^2}{2}} + 8 \right] \quad (i = 1, 2, 3). \quad (3.7)$$

Таким образом, получена явная зависимость количества приведенных циклов N_i^{eq} от отношения максимальной перегрузки x_{res}^i , учитываемой при формировании спектра циклического нагружения, к среднеквадратичному значению перегрузки σ .

При малых уровнях напряженного состояния и уровнях перегрузок допускается использовать пятую степень в гипотезе эквивалентности внешних воздействий (3.1) [3]:

$$x_j^5 \cdot N_j = (x_{res}^i)^5 \cdot N_{ji}^{eq}.$$

Тогда выражение для количества приведенных циклов примет вид:

$$N_i^{*eq} = \frac{N_{\Sigma}}{\sigma^2 (x_{res}^i)^5} \mathcal{I}_1^*(x_{res}^i), \quad \text{где} \quad \mathcal{I}_1^*(x_{res}^i) = \int_0^{x_{res}^i} x^6 \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (3.8)$$

Для вычисления интеграла \mathcal{I}_1^* используется тоекратное интегрирование по частям. В итоге для неопределенного интеграла \mathcal{I}_1^* получим выражение:

$$\mathcal{I}_1^*(x) = \sigma^2 \left(-x^5 - 5x^3\sigma^2 - 15x\sigma^4 \right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} + 15\sigma^6 \int e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (3.9)$$

Для вычисления значения интеграла $\mathcal{I}_1^*(x)$ при трех значениях x_{res}^i (2.4) необходимо определить численное значение интеграла, входящего в (3.9). При значениях верхнего предела x_{res}^i заменой $x = t\sigma$ этот интеграл сводится к следующему:

$$\int_0^{x_{res}^i} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = \sigma \cdot \mathcal{I}_0^*(c^i), \quad \text{где} \quad \mathcal{I}_0^*(c^i) = \int_0^{c^i} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (i = 1, 2, 3).$$

Численные значения интегралов $\mathcal{I}_0^*(c^i)$ с учетом (2.4) приведены в табл. 1.

В итоге при малых уровнях напряженного состояния и уровнях перегрузок, когда допускается использовать пятую степень в гипотезе эквивалентности внешних воздействий (3.1), количество приведенных циклов к максимальной перегрузке x_{res}^i , используемой для оценки ресурса при различных уровнях вероятности непревышения \mathcal{P}_i , примет вид:

$$N_i^{*eq} = \frac{N_{\Sigma}}{(x_{res}^i)^5} \left[\left(-(x_{res}^i)^5 - 5\sigma^2 (x_{res}^i)^3 - 15\sigma^4 x_{res}^i \right) e^{-\frac{(x_{res}^i)^2}{2\sigma^2}} + 15\sigma^4 \int_0^{x_{res}^i} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \right].$$

С учетом (2.4) количество приведенных циклов к максимальной перегрузке x_{res}^i при использовании пятой степени в гипотезе эквивалентности примет вид, аналогичный (3.7):

$$N_i^{*eq} = \frac{N_{\Sigma}}{(c^i)^5} \left[\left(-(c^i)^5 - 5(c^i)^3 - 15(c^i) \right) e^{-\frac{(c^i)^2}{2}} + 15 \cdot \mathcal{I}_0^*(c^i) \right] \quad (i = 1, 2, 3). \quad (3.10)$$

Была проведена оценка количества приведенных циклов нагружения N_i^{eq} (3.7) при использовании четвертой степени в критерии эквивалентности (3.1) и N_i^{*eq}

Таблица 1. Численные значения интеграла $\mathcal{I}_0^*(c^i)$

i	1	2	3
\mathcal{P}_i	0.95	0.99	0.997
c^i	2.448	3.035	3.409
$\mathcal{I}_0^*(c^i)$	1.235297	1.250298	1.252496

Таблица 2. Оценка приведенного количества циклов нагружения к подуровням. Базовое количество циклов нагружения $N_\xi = 10^7$

i		1	2	3
\mathcal{P}_i		0.95	0.99	0.997
c^i		2.448	3.035	3.409
x_{res}^i		$c^1 \cdot \sigma$	$c^2 \cdot \sigma$	$c^3 \cdot \sigma$
N_i^{eq} (3.7)		1.283·10⁶	7.902·10⁵	5.506·10⁵
$N_{i,j}^{eq}$ (3.11)	0.3 x_{res}^i	7.352·10 ⁵	1.016·10 ⁶	1.184·10 ⁶
	0.7 x_{res}^i	1.675·10 ⁶	1.507·10 ⁶	1.297·10 ⁶
	x_{res}^i	8.752·10 ⁵	4.201·10 ⁵	2.296·10 ⁵
N_i^{*eq} (3.10)		9.826·10⁵	5.565·10⁵	3.621·10⁵
$N_{i,j}^{*eq}$ (3.11)	0.3 x_{res}^i	6.253·10 ⁵	8.602·10 ⁵	9.991·10 ⁵
	0.7 x_{res}^i	1.380·10 ⁶	1.208·10 ⁶	1.016·10 ⁶
	x_{res}^i	7.491·10 ⁵	3.514·10 ⁵	1.889·10 ⁵

(3.10) при использовании пятой степени в (3.1) в соответствии с предлагаемым вероятностно-статистическим подходом. В качестве базового использовалось общее количество циклов нагружения $N_\xi = 10^7$. Эти результаты приведены в табл. 2.

Определение приведенного количества циклов нагружения на нескольких подинтервалах внутри выбранного для анализа ресурсной прочности интервала уровней нагружений от 0 до x_{res}^i должно проводиться в соответствии с (3.3), (3.8). Таким образом, например, для подуровня $[a_j, b_j]$ приведенное количество циклов нагружения запишется в виде:

$$N_{i,j}^{eq} = \frac{N_\Sigma}{\sigma^2 (b_j)^4} \int_{a_j}^{b_j} x^5 \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad N_{i,j}^{*eq} = \frac{N_\Sigma}{\sigma^2 (b_j)^5} \int_{a_j}^{b_j} x^6 \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (3.11)$$

при переводе по четвертой и пятой степени соответственно.

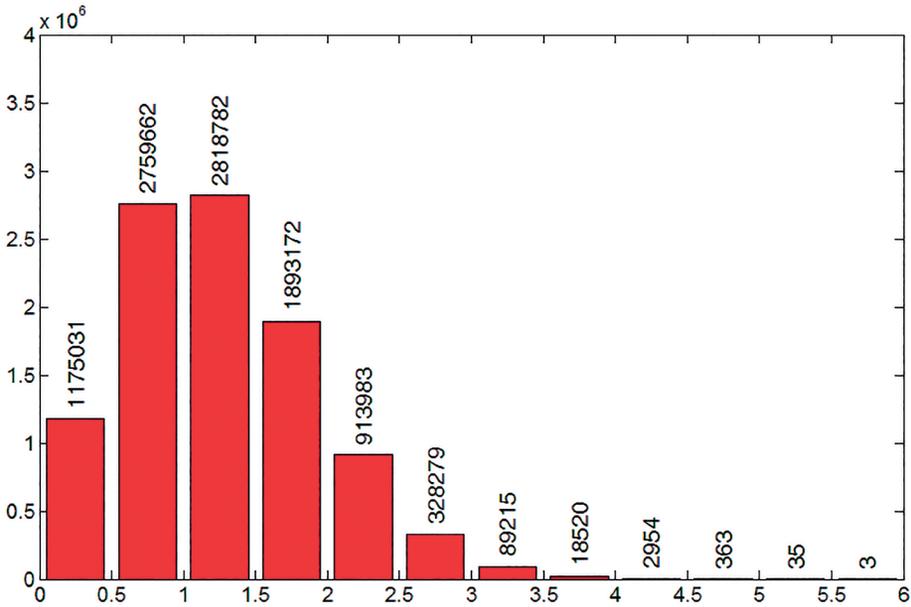


Рис. 1. По оси абсцисс отложен уровень нагружения в среднеквадратических значениях, по оси ординат число циклов нагружения внутри подуровней.

Таблица 3. Оценка приведенного количества циклов нагружения из правой части спектра (3.12) к уровню n_{\max}^{ekspl} . Базовое количество циклов нагружения $N_{\xi} = 10^7$

i	1	2	3
\mathcal{P}_i	0.95	0.99	0.997
c^i	2.448	3.035	3.409
$N_{\max}^{eq}, k = 6$	26182	10005	4385
$\xi, \%$	73.65	19.34	7.65

В табл. 2 приведены результаты оценки количества циклов нагружения при приведении к подуровням 30%, 70%, 100% в подинтервалах [0.0 0.3], [0.3 0.7] и [0.7 1.0] от x_{res}^i .

Из табл. 2 видно, что разделение на подуровни ведет к увеличению общего числа циклов нагружения (в рассмотренном варианте в 3–6 раз), однако позволяет снизить количество циклов нагружения с максимальным уровнем в соответствии с гипотезой эквивалентности вибродинамических воздействий (3.1).

Следует остановиться также на вопросе учета правой части спектра циклического нагружения, в которой большие уровни нагружения реализуются малое количество раз. В принятых предположениях это часть спектра от x_{res}^i до максимального эксплуатационного значения перегрузки n_{max}^{ekspl} :

$$x_{res}^i < x \leq n_{max}^{ekspl} . \tag{3.12}$$

Для этого проведем оценку количества циклов нагружения типового распределения (2.2) с шагом в половину среднеквадратического значения для базового количества циклов нагружения $N_{\xi} = 10^7$. Результаты этой оценки приведены на рис. 1.

Как видно из рисунка, уровни перегрузок более трех среднеквадратических значений (вероятность превышения которых для Рэлеевского распределения составляет 99%) можно считать достаточно маловероятными.

Была рассчитана величина ξ , определенная как отношение количества циклов от правой и левой частей спектра относительно x_{res}^i (для показателя кривой усталости 4), которая в соответствии с (3.3)–(3.5) запишется в виде:

$$\xi = \frac{\int_{x_{res}^i}^{k\sigma} x^5 \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx}{\int_0^{x_{res}^i} x^5 \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx} \cdot 100\% .$$

Результаты оценки эквивалентного числа циклов нагружения для правой части спектра (3.12), а также величины ξ при максимальном эксплуатационном уровне перегрузок $n_{max}^{ekspl} = 6\sigma$ приведены в табл. 3.

Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод, что при использовании вероятности превышения $P_i = 0.99$ вклад от правой части спектра циклического нагружения в общее количество эквивалентных циклов нагружения может составлять ~20%. Из этого следует, что уровни нагружения, представленные в табл. 3, также должны учитываться при анализе и отработке ресурсной прочности.

При оценке ресурса конструкции проводится симметризация нагрузок, так как наиболее полная информация по ресурсным свойствам материалов существует именно для симметричных циклов. Несимметричность циклов нагружения возникает как правило из-за наличия постоянной статической составляющей в перегрузках. Как правило, для транспортировки это весовая составляющая $n_{stat} = 1$.

Максимальное эксплуатационное значение амплитуды эквивалентного симметризованного цикла нагружения A_{eq}^i по Одингу [3] записывается в виде (в предположении линейной связи между перегрузками и напряжениями):

$$A_{eq}^i = \sqrt{x_{res}^i (x_{res}^i + n_{stat})} ,$$

где x_{res}^i – уровень динамической перегрузки, учитываемый при оценке ресурса.

4. Заключение. В итоге для случаев транспортировки с учетом принятых допущений разработан способ формирования форсированных уровней перегрузок с заданным уровнем вероятностей не превышения в обеспечение анализа и отработки ресурсной прочности изделий. Это позволяет свести все многообразии случайных разноуровневых циклов нагружения к суммарным циклам форсированных уровней перегрузок.

Таким образом, при проектировании изделий и отработке ресурсной прочности, особенно для изделий многоразового применения, дальность транспортирования которых может быть явно не задана, предлагается ориентироваться на соотношения величин σ , x_{res}^i и n_{max}^{ekspl} с достижением пределов прочности, текучести и выносливости используемых материалов при соответствующих перегрузках. При отсутствии представительных данных по спектрам нагружения рекомендуется, чтобы максимальные уровни перегрузок, используемые для ресурсных испытаний, не превышали перегрузок, задаваемых для проектных прочностных расчетов и не приводили к появлению пластических деформаций в конструкции:

$$\sigma(n_{max}^{ekspl}) \leq \sigma_{0.2}.$$

Для изделий, многократное длительное транспортирование которых не предполагается, это требование может оказаться избыточным – при уровнях перегрузок больше x_{res}^i , определенной при вероятности не превышения не менее 0,99, в отдельных зонах конструкции могут возникать пластические деформации. Для их учета необходимо в каждом конкретном случае оценивать количество превышений указанного уровня и принимать решение по их включению в спектр циклического нагружения.

Вопрос принятия решения по конкретному уровню вероятности не превышения нагрузок, используемых при ресурсных испытаниях, зависит от степени ответственности рассматриваемого конструктивного объекта и носит нормативный характер. Окончательное определение параметров для формирования спектров циклического нагружения должно проводиться с учетом времени испытаний, возможностей оборудования и параметров нагружения изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. М.: Наука, 1979. 336 с.
2. Гладкий В.Ф. Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата. М.: Наука, 1975. 454 с.
3. Мыльников В.В., Кондрашкин О.Б., Шетулов Д.Б. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: монография. Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. 177 с.
4. Воробьев А.З., Олькин Б.И. Сопротивление усталости элементов конструкций. М.: Машиностроение, 1999. 240 с.

UDC 629.7.036.54

PROBABILISTIC CORRELATIONS FOR RESOURCE LOADING REGIMES DURING TRANSPORTATION

© 2024 г. А. Ю. Bondarenko^{a, *}, А. И. Likhoded^{a, **},
V. A. Titov^a, S. P. Funtikov^b, A. N. Shilin^b

^aCentral Research Institute for Machine Building, Korolev, Russia

^bSpace Rocket Centre "Progress", Samara, Russia

*e-mail: andrei.bondarenko@phystech.edu,

**e-mail: likhoded@tsniimash.ru

Abstract – There are several cases during exploitation of structures when external loading is random vibration in nature. It is, firstly, automobile and railway transporting regimes. Therefore, during formation of loading regimes for estimation of resource strength of structures probability-statistical approach is used. In this article basic principles of this approach for formation spectrums of cyclic loading for testing and analysis of resource strength are presented. Estimation of levels of cyclic loading is performed, as well as suggestions for possible use of proposed approach when estimating resource strength of structures were provided.

Keywords: random vibration, probability-statistical approach, spectrum of cyclic loading, resource strength, transportation of spacecraft

REFERENCES

1. Bolotin V.V. Random oscillations of elastic systems (Moscow, Nauka, 1979) [in Russian]
2. Gladkiy V.F. . Strength, vibrations and reliability of spacecraft structure. Moscow, Nauka, 1975 [in Russian].
3. Mylnikov V.V., Kondrashkin O.B., and Shetulov D.B. Cyclic strength and durability of construction materials. Nizhniy Novgorod, Monography of NNGASU, 2018 [in Russian].
4. Vorobiev A.Z., Olkyn B.I. Fatigue resistance of structural elements. Moscow, Mashinostroeniye, 1999 [in Russian].