

трудов. Вып. 1. В 3 т. Т. 2/ Под общ. ред. П.А. Витязя. – Мн.: УП «Техно-принт», 2002. - С. 334 – 344.; 21. Почтенный Е.К. Анализ и синтез усталости элементов конструкций// Доклады НАН Беларуси, 2002, т. 46, №2, с.105-107.; 22. Почтенный Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций.- Мн., УП “Арти-Фекс”, 2002, 186 с., ил.; 23. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Анализ нагруженности и расчет ресурса конструкций при случайном нагружении// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 1. Перспективные направления создания машин. - Мн., 2004. - С. 125-135.; 24. Капуста П.П. Прогнозирование нагруженности и долговечности несущих конструкций на стадиях ресурсного проектирования мобильных машин заданной надежности// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин. - Мн., 2004. - С. 22 - 34.; 25. Капуста П.П., Швец И.В., Мальев Д.В., Вихренко Д.В., Рыбаков Д.В. Прогнозирование нагруженности несущих элементов подвески автомобильного полуприцепа с использованием имитационного моделирования// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин. - Мн., 2004. - С. 95 - 99.; 26. Капуста П.П., Слабко И.А., Рубцов А.В. Системная экспериментальная оценка эксплуатационной нагруженности несущих конструкций магистрального автопоезда// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин. - Мн., 2004. - С. 88 – 94.

УДК 621. 81: 621 – 192

Капуста П.П.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ НЕРЕГУЛЯРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь*

**1. Общие сведения об уравнениях нерегулярной нагруженности деталей машин.** В работе [1] автором опубликованы уравнения нерегулярного нагружения деталей машин (1) и (2), предназначенные для сравнительных оценок нагруженности на стадиях проектирования, а также для текущей диагностики с целью прогнозирования остаточного ресурса и риска эксплуатации.

$$\frac{\sigma_i - \sigma}{\hat{\sigma} - \sigma} = \exp \left\{ \frac{1}{w} \ln \left[ \frac{\ln \left( \frac{n}{i} \right)}{\ln(n)} \right] \right\}. \quad (1)$$

При  $\check{\sigma} = 0$ , уравнение (1) примет вид

$$\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = \exp \left\{ \frac{1}{w} \cdot \ln \left[ \frac{\ln \left( \frac{n}{i} \right)}{\ln(n)} \right] \right\}. \quad (1a)$$

$$\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} = \frac{\sigma_w}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} \cdot \exp \left[ \ln \left( \frac{\hat{\sigma} - \check{\sigma}}{\sigma_w} \right) \cdot \frac{\ln \ln \left( \frac{n}{i} \right)}{\ln \ln(n)} \right]. \quad (2)$$

При  $\check{\sigma} = 0$ , уравнение (2) примет вид

$$\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = \frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} \cdot \exp \left[ \ln \left( \frac{\hat{\sigma}}{\sigma_w} \right) \cdot \frac{\ln \ln \left( \frac{n}{i} \right)}{\ln \ln(n)} \right] \quad (2a)$$

## 2. Анализ уравнений нерегулярной нагруженности деталей машин

### 2.1. Анализ уравнения (1) типа $\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} = f \left( w, n, \frac{i}{n} \right)$

Для удобства анализа, был построен график с использованием указанного уравнения, приняв  $\check{\sigma} = 0$  (1a), в относительной системе координат  $\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} - \frac{i}{n}$ . При

этом приняты следующие значения параметров уравнения:

$$n = 10^4 = \text{const}; \quad w = (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 5,0; 10,0; 20,0) = \text{var}.$$

Анализируя (1a) и построенную соответствующую графическую диаграмму, можно констатировать, что получено уравнение, позволяющее описать любой режим нерегулярного нагружения в вероятностной его трактовке. Следует отметить, что с ростом параметра  $w$  степень тяжести нагрузочного режима увеличивается, а для регулярного нагружения, при  $w \rightarrow \infty$ ,  $\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = \frac{\sigma_1}{\hat{\sigma}} = 1$ .

Недостатком уравнений (1) и (1a) является отсутствие в них более чувствительного к оценке тяжести нагрузочного режима параметра  $\sigma_w$  и величины максимального напряжения нагрузочного блока  $\hat{\sigma}$ , которое желательно было бы увязать с прочностными характеристиками материала (например  $\sigma \leq (0,85 \dots 1,0) \cdot \sigma_T$ ), что особенно важно при проектных расчетах.

### 2.2. Анализ уравнения (2) типа $\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} = f \left( \sigma_w, \hat{\sigma}, n, \frac{i}{n} \right)$

Для удобства анализа, был построен график с использованием указанного

уравнения, приняв  $\dot{\sigma} = 0$ , в относительной системе координат  $\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} - \frac{i}{n}$ . При этом приняты следующие значения параметров уравнения:  $n = 10^4 = const$ ;

$$\hat{\sigma} = 400 \text{ МПа} = const;$$

$$\sigma_w = (10; 30; 50; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 390; 400) = var.$$

Анализ (2), (2a) и соответствующей графической диаграммы показывает, что полученное уравнение позволяет описать любой режим нерегулярного нагружения, а также и регулярное нагружение при  $\sigma_w = \hat{\sigma}$ . Здесь  $0 \leq \sigma_w \leq \hat{\sigma}$ .

Уравнение (2), (2a) содержит кроме того параметры:  $\hat{\sigma}$  блока и размер нагрузочного блока  $n$ . Для оценки влияния  $\hat{\sigma}$  и  $n$  были построены графики в системе координат  $\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} - \frac{i}{n}$ :

- влияние максимального напряжения нагрузочного блока  $\hat{\sigma}$  на значение функции (2a) при  $n = 10^4 = const$ ;  $\sigma_w = 100 \text{ МПа} = const$ ;  $\hat{\sigma} = (400; 700; 1000 \text{ МПа}) = var$ ;

- влияние размера нагрузочного блока  $n$  на значение функции (2a), при  $\hat{\sigma} = 400 \text{ МПа} = const$ ;  $\sigma_w = 100 \text{ МПа} = const$ ;  $n = (10^3; 5 \cdot 10^3; 10^4) = var$ ;

- влияние размера нагрузочного блока  $n$  на значение функции (2a) при  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = 0,4 = const$ ;  $n = (5; 10; 10^2; 10^3; 10^4; 10^5; 10^6) = var$ .

Из проведенного анализа выше указанных зависимостей получены следующие выводы. Изменение  $\hat{\sigma}$  (например от 400 до 1000 МПа) оказывает значительное влияние на степень тяжести режима нагружения. Изменение размера нагрузочного блока от  $10^3$  до  $10^5$  и более не оказывает существенного влияния на значения уравнения (2a), т.е. влиянием  $n$  в указанном диапазоне можно пренебречь. Уравнение (2a) можно использовать, как для описания всех возможных режимов нерегулярного, так и регулярного нагружения при соблюдении условия  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = const$ . При этом показано, что при размере нагрузочного блока  $n \geq 10^3$ , он не оказывает существенного значения на степень тяжести режима нагружения. Вместе с тем при  $n < 10^3$  ( $n = 10^2; 10; 5$ ) не выполняются граничные условия функции (2a), что ограничивает ее применение при указанных значениях  $n$ .

Таким образом нагрузочный блок должен содержать не менее  $10^3$  экстремумов напряжений, что хорошо согласуется с рекомендациями ГОСТ 25. 101-83 [2]. Поэтому при построении графиков режимов нерегулярного нагружения [11], принимаем  $n = 10^4 = const$  (на основании выводов по рис. 4.12 и 4.13).

При этом в (2а) отношение  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}}$  одновременно характеризует степень тяжести режима нагружения и максимальное напряжение нагрузочного блока, которое нужно связать с прочностью материала.

Из анализа очевидно, что степень тяжести режима нагружения характеризуется отношением  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}}$ , которое изменяется от 0 до 1: при  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = 0$  следует, что и  $\sigma_i = 0$ , т.е. нагрузки отсутствуют; при  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = 1$   $\sigma_w = \hat{\sigma}$ , т.е. режим нагружения является регулярным. Следовательно, параметр  $\sigma_w$  может изменяться в пределах от 0 до  $\hat{\sigma}$ , а каждому режиму нерегулярного нагружения должно соответствовать свое отношение  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = const$  в уравнении (2а). Не выясненным остается, однако, вопрос числовых значений параметра  $w$ , соответствующих конкретным значениям отношения  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}}$ , т.к. параметр  $w$  не входит явно в уравнение (2а).

### 3. Изучение влияния параметра $w$ на степень наклона кривых режимов нерегулярного нагружения при $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = const$

Для решения данного вопроса было построено семейство кривых возможных нагрузочных режимов в системе координат  $\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = \frac{i}{n}$  по уравнению (2а) при следующих значениях его параметров  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = 0,4 = const$ ;  $w = (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0) = var$ .

При выводе уравнения нерегулярного нагружения деталей машин (2) получено уравнение [1]

$$\sigma_i - \hat{\sigma} = \sigma_w \cdot \exp \left[ \frac{1}{w} \cdot \ln \ln \left( \frac{n}{i} \right) \right]. \quad (3)$$

Разделив левую и правую части уравнения (3) на  $\hat{\sigma}$ , и приняв  $\hat{\sigma} = 0$ , получим

$$\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = \frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} \cdot \exp \left[ \frac{1}{w} \cdot \ln \ln \left( \frac{n}{i} \right) \right]. \quad (4)$$

Кроме семейства кривых, построенных по уравнению (4), была построена также одна возможная кривая по уравнению (2а) при  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = 0,4 = const$ .

Проведенный анализ указанных зависимостей показал, что уравнения (2а) и (4) идентичны.

Совместный анализ кривых  $\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = \frac{i}{n}$ , построенных по уравнению (4) позволяет сделать вывод, что при изменении  $w$  изменяется наклон кривых нагрузочного режима при  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = const$ . При этом все кривые, в том числе и кривая, построенная по уравнению (2а) имеют одну общую точку  $C$  с координатами  $(\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}}; 0,3679)$ , относительно которой осуществляется их поворот при изменении  $w$ .

Следует отметить, что при определенных значениях параметра  $w$  (кривые, соответствующие  $w=0,5; 1; 1,5$ ) и  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = const$  (например, при  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} = 0,4$ ) не выполняются граничные условия уравнений (2а) и (4). Этот факт говорит о необходимости ограничения диапазона изменения параметра  $w$  для каждого определенного значения отношения  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}}$ .

Таким образом, требует ответа вопрос о численном значении параметра  $w$  для соответствующего отношения  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}}$  (или  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}-\sigma}$ ).

#### 4. Вывод уравнения для определения значения параметра $w$ , соответствующего заданной величине отношения $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}}$ (или $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}-\sigma}$ )

Ранее [1], при выводе формулы (1а), получено уравнение:

$$\sigma_i = \sigma_w \cdot \exp\left[\frac{1}{w} \cdot \ln \ln\left(\frac{n}{i}\right)\right] \quad (5)$$

а при выводе формулы (2а) получено уравнение

$$\sigma_i = \sigma_w \cdot \exp\left[\ln\left(\frac{\hat{\sigma}}{\sigma_w}\right) \cdot \frac{\ln \ln\left(\frac{n}{i}\right)}{\ln \ln(n)}\right] \quad (6)$$

Приравняв (5) и (6) и, заменив в (6)  $\frac{\hat{\sigma}}{\sigma_w}$  на  $\left(\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}}\right)^{-1}$ , получим формулу для вычисления значений параметра  $w$ , соответствующего заданной величине отношения  $\frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}}$ :

$$w = \frac{\ln \ln(n)}{\ln \left[ \left( \frac{\sigma_w}{\sigma} \right)^{-1} \right]}, \quad (7)$$

или при  $\sigma_w \neq 0$

$$w = \frac{\ln \ln(n)}{\ln \left[ \left( \frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma} \right)^{-1} \right]}. \quad (7a)$$

Из анализа формул (7) и (7a) видно, что параметр  $w$  не зависит от отношения  $\frac{i}{n}$ , а зависит от размера нагрузочного блока  $n$  и отношения  $\frac{\sigma_w}{\sigma}$  (или  $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma}$ ). Следовательно, каждому отношению  $\frac{\sigma_w}{\sigma}$  (при  $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma}$ ) при  $n = \text{const}$  должно соответствовать одно единственное значение параметра  $w$ .

### 5. Зависимость параметра $w$ от размера нагрузочного блока $n$ и отношения $\frac{\sigma_w}{\sigma}$ (или $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma}$ )

Для изучения данного вопроса были построены графические зависимости  $\frac{w}{\sigma} = f(w, n)$  и  $\frac{\sigma_w}{\sigma} = f(w)$  при  $n = 10^4 = \text{const}$ , а некоторые результаты зависимости  $w = f\left(\frac{\sigma_w}{\sigma}\right)$  при  $n = 10^4 = \text{const}$  сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Зависимость параметра  $w$  от отношения  $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma}$  при  $n = 10^4$  циклов = const

| $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma}$ | $w$  | $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma}$ | $w$      |
|------------------------------------|------|------------------------------------|----------|
| 0,001                              | 0,32 | 0,6                                | 4,35     |
| 0,01                               | 0,48 | 0,7                                | 6,23     |
| 0,1                                | 0,96 | 0,8                                | 9,95     |
| 0,2                                | 1,38 | 0,9                                | 21,07    |
| 0,3                                | 1,84 | 0,99                               | 220,92   |
| 0,4                                | 2,42 | 0,999                              | 2219,22  |
| 0,5                                | 3,20 | 0,9999                             | 22204,38 |

Из анализа указанных графических зависимостей и результатов таблицы 1 сделан вывод о незначительной зависимости  $w$  от размера блока при  $n \geq 10^3$ .

При этом значение параметра  $w$  возрастает с увеличением отношения  $\frac{\sigma_w}{\sigma}$ . А

для регулярного нагружения, при  $\frac{\sigma_w}{\sigma} = 1$ ,  $w \rightarrow \infty$ .

### **6. Предварительные рекомендации по использованию отношения $\frac{\sigma_w}{\sigma}$**

**(или  $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma}$ ) при оценке нерегулярного нагружения деталей машин**

На основании проведенного выше анализа графических зависимостей и формул (2) и (2а), а также, основываясь на выводах разделов 2-5 настоящей статьи, изменяя отношение  $\frac{\sigma_w}{\sigma}$  (или  $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma}$ ) и соответствующее ему значение параметра  $w$  по формулам (7) или (7а), можно переходить от одного режима нагружения деталей машин к другому (а именно к более или менее тяжелому).

Изменять это отношение в пределах  $0 \leq \frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma} \leq 1$  можно тремя способами:

1. Изменяя  $\sigma_w$ , т.е. степень тяжести режима (величину действующих напряжений или долю больших напряжений в блоке  $n$ ) при постоянном  $\hat{\sigma}$  (например при  $\hat{\sigma} \approx (0,7...0,9) \cdot \sigma_T$  - максимально допустимое напряжение блока, зависящее от материала; однако при назначении верхнего предела  $\hat{\sigma}$  следует помнить о возможном переходе из области многоциклового в область малоциклового усталости);

2. Изменяя разность  $(\hat{\sigma} - \sigma)$ , т.е. размах напряжений в нагрузочном блоке;

3. Изменяя геометрические размеры и форму сечения детали.

Марка материала, т.е. его прочностные свойства, на величину отношения  $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma}$  влияния не оказывают. Однако выбор марки материала зависит от степени жесткости нагрузочного режима, а значит, и от отношения  $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma}$  и соответствующего ему параметра  $w$ .

Например, взяв более прочный с точки зрения сопротивления усталости материал (с большими значениями  $\bar{\sigma}_R$ ,  $N_G$  и  $m$ ), можно увеличить проектную долговечность. При этом чем большее значение  $\bar{\sigma}_R$  имеет данный материал, тем меньшее количество напряжений нагрузочного блока будет повреждающим.

Рассеяние характеристик сопротивления усталости зависит от коэффициента вариации предела выносливости, а значит - от качества материала и множества технологических и конструктивных факторов (см., например, [3]).

Учитывая проведенный анализ и универсальность отношения  $\frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma_v}$ , назовем последнее критерием нагруженности и обозначим его  $K_w$ .

Таким образом, зная на стадии проектирования критерий нагруженности  $K_w$  и соответствующее ему значение параметра  $w$ , можно вести ресурсное проектирование деталей машин и элементов конструкций, подверженных в эксплуатации нерегулярному нагружению. Для реализации этой задачи необходимо создание соответствующего банка данных об эксплуатационной нагруженности различных деталей.

### **7. Основные результаты и выводы**

1. Получено уравнение для оценки нерегулярного нагружения деталей машин с использованием распределения Вейбулла [4] (4.20).

2. Размер нагрузочного блока не оказывает существенного значения на степень тяжести нагрузочного режима при  $n \geq 10^3$ .

3. Степень тяжести нагрузочного режима необходимо оценивать критерием нагруженности  $K_w = \frac{\sigma_w}{\sigma - \sigma_v}$  и, соответствующим ему значением параметра

$w$ .

4. Разработанный с использованием распределения Вейбулла [2] метод оценки нерегулярного нагружения позволяет в вероятностном аспекте оценить нагруженность, как на стадиях проверочных так и проектных расчетов.

5. Для оценки реальных режимов нагружения деталей (например мобильных машин) требуется накопление широкой экспериментальной информации о значениях критерия нагруженности  $K_w$  и соответствующего ему параметра  $w$ .

6. Проектная оценка режимов нагружения деталей возможна с использованием имитационного моделирования машин и условий их нагруженности [3, 5...11], а накопление экспериментальной информации о значениях критерия нагруженности  $K_w$  и соответствующего ему параметра  $w$  – по результатам имитационных испытаний этих моделей в соответствующих эксплуатационных условиях [3, 12...16].

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Капуста П.П. Уравнения нерегулярной нагруженности деталей машин// В сб. Машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 17/Под ред. И.П. Филонова. – Мн.: УП “Технопринт”, 2001. – С. 323-327.
2. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.- М.: Изд-во стандартов, 1983. – 29 с.
3. Капуста П.П. Вероятностная оценка характеристик сопротивления усталости деталей на стадии проектирования машин. - Мн.: Технопринт , 2001. - 97 с.
4. Вейбулл В. Усталостные испыта-



ния и анализ их результатов.-М.: Машиностроение, 1964.-276 с. 5. Капуста П.П. Ресурсное проектирование несущих деталей АТС// Автомобильная промышленность. - 2000. - №2. - С. 59 - 61. 6. Капуста П.П. Математическая модель как инструмент ресурсного проектирования АТС// Автомобильная промышленность. -2001. - № 11. - С. 15-18. 7. 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. 8. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Прогнозирование случайного нагружения и построение нагрузочных блоков// Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология изготовления. Сборник научных трудов. Вып. 1. В 3-х томах. - Т. 2/ Под общ. ред. П.А. Витязя. - Минск: УП «Технопринт», 2002.- С. 334 - 344. 9. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Анализ нагруженности и расчет ресурса конструкций при случайном нагружении// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 1. Перспективные направления создания машин. - Мн., 2004. - С. 125-135. 10. Капуста П.П. Надежность и ресурсное проектирование несущих систем и элементов машин// Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология изготовления. Сборник научных трудов. Вып. 1. В 3-х томах. - Т. 1/ Под общ. ред. П.А. Витязя. - Минск: УП «Технопринт», 2002.- С. 97 - 108. 11. Капуста П.П. Теоретическая модель оценки нерегулярной нагруженности деталей и конструкций машин// Теория и практика машиностроения,-2004.-№4. - С. 52-55. 12. Капуста П.П. Прогнозирование нагруженности и долговечности несущих конструкций на стадиях ресурсного проектирования мобильных машин заданной надежности// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин. - Мн., 2004. - С. 22 - 34. 13. Капуста П.П. О методике имитационного компьютерного моделирования дорожных условий на стадиях проектирования автотранспортных средств// В сб. Материалы МНТК "Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии", Могилев, 22-23 апреля 2004 г. В 3-х частях. Часть 2.-С. 39-40. 14. Капуста П.П., Кобрусев С.В. Разработка алгоритма расчета высот микропрофиля автомобильных дорог// В сб. Материалы МНТК "Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии", Могилев, 22-23 апреля 2004 г. В 3-х частях. Часть 2.-С. 41-43. 15. Капуста П.П., Швец И.В., Мальев Д.В., Вихренко Д.В., Рыбаков Д.В. Прогнозирование нагруженности несущих элементов подвески автомобильного полуприцепа с использованием имитационного моделирования// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин. - Мн., 2004. - С. 95 - 99. 16. Капуста П.П. О принципах создания компьютерного автополигона для прогнозирования нагруженности несущих систем автотранспортных средств// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 6. Автоматизация проектирования и информационные технологии. - Мн., 2004. - С. 37-47.