

УДК 629.018

**РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ НЕПОВРЕЖДАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ  
ПРИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ МАШИН***канд. техн. наук А.А. РАКИЦКИЙ, А.В. ШМЕЛЕВ**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)*

*Рассматривается расчетный метод определения уровня неповреждающих напряжений для случайного процесса нагружения, который позволяет учитывать состав нагрузочного спектра, кинетику накопления повреждений, а также асимметрию нагружения. Основная область применения – разработка программ ускоренных стендовых испытаний несущих конструкций, подверженных случайному нагружению. Наиболее эффективная область ее практической реализации – формирование нагрузочных спектров для ускоренной оценки циклической долговечности несущих конструкций и деталей машин при стендовых рандом-испытаниях. Достигнуто хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов, что подтверждает достоверность разрабатываемого подхода.*

*Предложенная методика также позволяет исключать неповреждающие циклы непосредственно из случайного процесса нагружения, при сохранении исходной последовательности основных повреждающих циклов. При наличии современного испытательного оборудования это позволяет наиболее точно отразить особенности эксплуатационного нагружения.*

**Введение.** Наиболее точное представление о работоспособности новой конструкции достигается испытанием ее под действием спектра эксплуатационных нагрузок. Одним из основных требований при разработке программ таких испытаний является сокращение времени, что достигается исключением из реальных процессов нагружения низких, неповреждающих напряжений и увеличением интенсивности высоких нагрузок, не превышающих максимальных эксплуатационных значений для того, чтобы избежать недопустимых пластических деформаций.

Экспериментальное определение уровня неповреждающих напряжений – процесс очень длительный и дорогостоящий. Поэтому требуются расчетные методы, позволяющие определить его с достаточной точностью перед составлением программы ускоренных испытаний. Должны быть учтены характеристики сопротивления усталости конструкции в наиболее опасных зонах и особенности условий нагружения, т.е. формы случайных спектров.

В работе [1] изложен метод определения уровня неповреждающих напряжений с использованием критерия зарождения усталостной трещины. Недостатки этого метода – использование процедуры приведения асимметричных циклов к эквивалентным по повреждению с постоянным коэффициентом асимметрии без учета свойств конкретного материала; отсутствие зависимости между величиной отбрасываемых напряжений и составом нагрузочного спектра; применение линейной гипотезы суммирования повреждений, которое при анализе случайных процессов нагружения, как показывают экспериментальные данные, может давать значительное завышение расчетной долговечности. Предлагаемая программа испытаний не учитывает кинетику усталостного повреждения, т.е. подключения к повреждению изначально неповреждающих циклов.

Задача данного исследования состоит в разработке методики расчетного определения уровня неповреждающих напряжений при случайном нагружении, учитывающей следующие аспекты:

- асимметрию нагружения по свойствам конкретных материалов;
- зависимость повреждающего действия нагрузочного спектра от его формы;
- кинетику усталостного повреждения, т.е. подключение к повреждению циклов напряжений ниже исходного предела выносливости;
- исключение неповреждающих циклов процесса с сохранением последовательности следования эксплуатационных циклов.

**Методология.** Для решения поставленной задачи нами предлагается использовать:

- схематизацию случайных процессов нагружения методом «потоков дождя»;
- приведение асимметричных циклов напряжений к эквивалентным по повреждению симметричным как выше, так и ниже исходного предела выносливости;
- исключение из процесса случайного нагружения циклов, повреждающее действие которых считается незначительным, с сохранением основной последовательности циклов;
- суммирование усталостных повреждений, учитывающее подключение по мере роста повреждения изначально неповреждающих циклов напряжений.

Применение метода «потоков дождя» основано на том, что он имеет достаточное число теоретических и экспериментальных подтверждений достоверности. Существуют различные алгоритмы выполнения схематизации по этому методу, дающие одинаковые результаты, а разница заключается лишь в простоте и удобстве реализации отдельных элементов того или иного алгоритма. Нами использован «четырехточечный» алгоритм метода «потоков дождя», который детально изложен в работе [2].

Приведение асимметричных циклов напряжений к эквивалентным по повреждению симметричным, с величиной выше исходного предела выносливости, выполняется с использованием следующего выражения [3]:

$$\sigma_{zi} = \sigma_{-1} + b(\sigma_{\max i} - \sigma_R), \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости опасной зоны конструкции при симметричном нагружении ( $R = -1$ );  $\sigma_{\max i}$  – максимальное напряжение текущего цикла процесса нагружения;  $\sigma_R$  – предел выносливости для текущего  $i$ -того цикла процесса;  $b = \frac{v_2}{v_R} = 1 / \left[ \frac{v_1}{v_2} + \left( \frac{v_1}{v_2} - 1 \right) \cdot R \right]$  – параметр уравнения;  $v_2$  – угол наклона кривой усталости при симметричном цикле нагружения;  $v_1$  – угол наклона кривой усталости при отнулевом цикле нагружения.

В случае когда величина выделенного цикла ниже исходного предела выносливости, приведенная эквивалентная амплитуда при симметричном цикле рассчитывается по формуле [4]:

$$\sigma_{zi} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_R} \sigma_{\max i}, \quad (2)$$

где  $\sigma_R$  – предел выносливости для текущего цикла с коэффициентом асимметрии  $R$ .

В машиностроении достаточное распространение получила диаграмма предельных амплитуд Кинасошвили – Серенсена:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} + \psi \cdot \sigma_m, \quad (3)$$

где  $\sigma_a$ ,  $\sigma_m$  – соответственно предельная амплитуда и среднее напряжение цикла для соответствующего значения  $R$  ( $\sigma_R = \sigma_a + \sigma_m$ );  $\psi$  – коэффициент чувствительности к асимметрии нагружения.

После подстановки уравнения (3) в выражения (1) и (2) они принимают следующий вид:

$$\sigma_{zi} = b\sigma_{\max i} - (ab - 1)\sigma_{-1}; \quad (4)$$

$$\sigma_{zi} = \frac{\sigma_{\max i}}{a}, \quad (5)$$

где  $a = 2 / (2 - (1 - \psi) \cdot (1 + R))$  – параметр, характеризующий изменение величины предела выносливости при переходе от симметричного цикла напряжений к циклу с коэффициентом асимметрии  $R$ .

На рисунке 1 представлен алгоритм приведения асимметричных циклов напряжений к эквивалентным по повреждению симметричным.

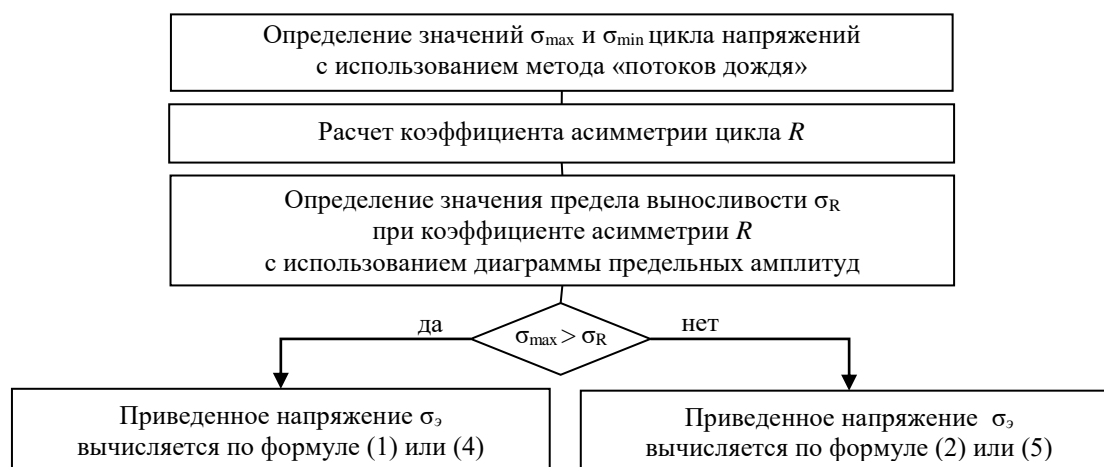


Рис. 1. Алгоритм приведения асимметричных циклов напряжений к эквивалентным по повреждению симметричным

Алгоритм удаления из процесса случайного нагружения неповреждающих напряжений  $\sigma_{нп}$  представлен на рисунке 2.

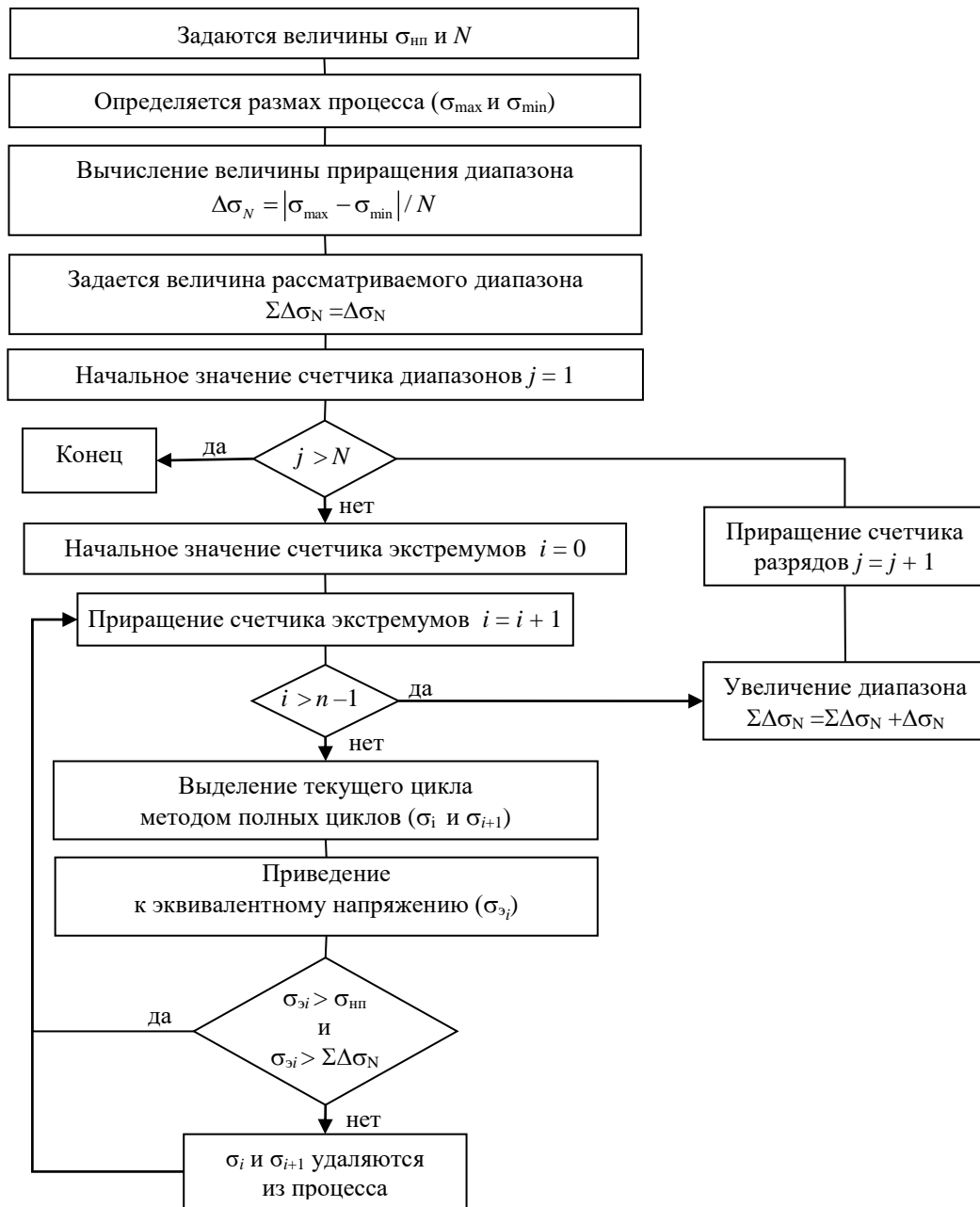


Рис. 2. Алгоритм удаления неповреждающих циклов

Здесь  $N$  – число диапазонов, на которые разбивается размах напряжений процесса. Чем больше эта величина, тем выше точность проведения всей процедуры. При малом числе  $N$  получается достаточно большое приращение диапазона, что может вызвать уменьшение амплитуды некоторых основных циклов за счет неправильного исключения наложенных, высокочастотных циклов.

Одновременно с удалением экстремумов процесса, соответствующих неповреждающим циклам, удаляются и их значения времени. Эта процедура не отражена в алгоритме в целях его упрощения.

В качестве гипотезы суммирования усталостных повреждений нами был использован кинетический метод, предложенный Е.К. Почтенным [3]. Его достоинствами являются возможность учета снижения исходного предела выносливости конструкции, а также многократная проверка на практике при оценке усталостной долговечности несущих конструкций автомобилей.

Алгоритм расчета неповреждающих напряжений  $\sigma_{нп}$  случайного процесса представлен на рисунке 3. Данный подход предполагает задание некоторого начального значения  $\sigma_{нп}$ , например, равного  $0,1\sigma_R$ .

с дальнейшим его увеличением. Однако возможна и обратная процедура. В качестве начального значения  $\sigma_{нп}$  будет использоваться сам предел выносливости с дальнейшим его снижением, соответственно изменится и знак в неравенстве – с « $\geq$ » на « $\leq$ ».

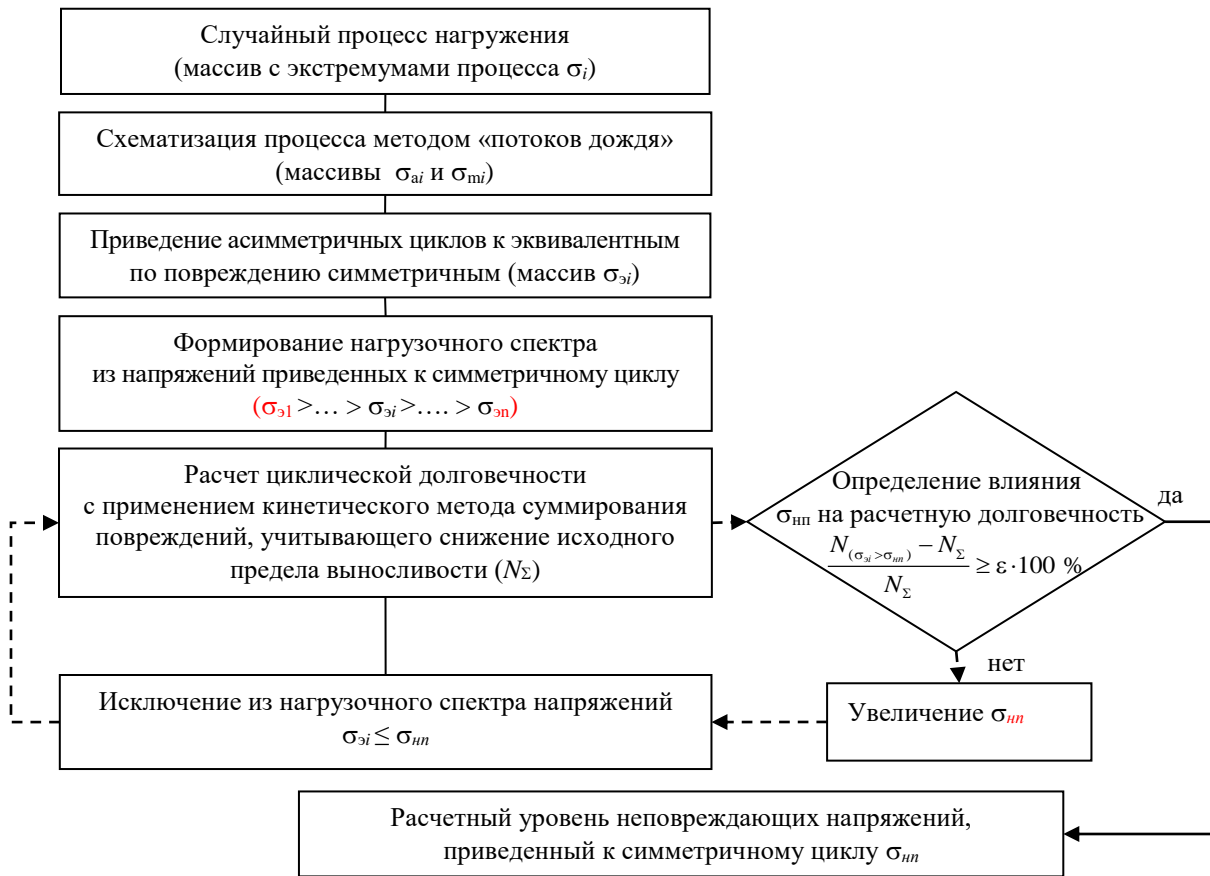


Рис. 3. Алгоритм определения уровня неповреждающих напряжений случайного процесса нагружения

Относительную погрешность определения уровня неповреждающих напряжений спектра можно выбрать:  $\varepsilon = 0,1$ . Эта величина достаточно близка к погрешности метода тензометрирования, широко применяемого при регистрации нагруженности несущих конструкций автомобилей.

Сопоставление результатов расчетов более удобно выполнять с использованием относительных величин. Уровень неповреждающих напряжений предлагается определять отношением верхней границы отбрасываемых напряжений к исходному пределу выносливости  $\sigma_R$ :

$$K_{\sigma_{нп}} = \frac{\sigma_{нп}}{\sigma_R} \quad (6)$$

Доля повреждающего действия оставшейся части напряжений спектра рассчитывается на основе выражения:

$$K_{(\sigma > \sigma_{нп})} = \frac{N_\Sigma}{N_{(\sigma_s > \sigma_{нп})}}, \quad (7)$$

где  $N_\Sigma$  – расчетная долговечность от воздействия всех напряжений случайного спектра;  $N_{(\sigma_s > \sigma_{нп})}$  – расчетная долговечность от воздействия напряжений случайного спектра без учета напряжений ниже  $\sigma_{нп}$ .

**Исходные данные.** Для определения уровня неповреждающих напряжений процесса случайного нагружения необходимо иметь следующие исходные данные: запись процесса нагружения, представленную в дискретном виде (так называемая история нагружения) и соответствующую определенной величине выработанного ресурса конструкции; характеристики сопротивления усталости и чувствительности к асимметрии нагружения опасной зоны конструкции.

Необходимым является наличие параметров уравнения кривой усталости для симметричного цикла нагружения. Чувствительность к асимметрии нагружения определяется на основании уравнения диаграммы предельных амплитуд. Это может быть функциональная зависимость (Кинасошвили – Серенсена, Гудмана, Гербера и др.) либо уравнение линии регрессии, полученное экспериментальным путем.

**Практическая реализация.** Предложенный метод расчета уровня неповреждающих напряжений рассмотрен на примере наиболее нагруженной зоны картера переднего ведущего моста автомобиля-лесовоза МАЗ. Используются процессы нагружения, полученные в пяти заездах груженого автомобиля по мерному участку лесной грунтовой дороги длиной 1 км. Скорость движения во время регистрации нагруженности составляла 20...30 км/ч, т.е. этот режим представлял достаточно жесткие условия эксплуатации. Картер данной конструкции изготавливается из стали 40Л, литьем в земляные формы. Характеристики сопротивления усталости материала опасной зоны конструкции, учитывающие качество поверхности картера и технологию его изготовления, определены экспериментально. Значения пределов выносливости для симметричного и отнулевого циклов, согласно нормальному закону распределения, были пересчитаны на вероятность неразрушения (99 %). Эти характеристики сопротивления усталости сведены в таблицу, где  $v$  – показатель наклона кривой усталости в полулогарифмической системе координат  $\left( v = \frac{d\sigma}{d \ln N} \right)$ .

Характеристики сопротивления усталости стали 40Л

Коэффициент асимметрии цикла, $R$	Предел выносливости, $\sigma_R$ , МПа	Характеристика угла наклона, $v$ , МПа	Точка перегиба кривой усталости, $N_0$
0	103,9	69,4	$0,54 \cdot 10^6$
-1	56,6	69,4	$0,54 \cdot 10^6$

На рисунке 4 представлены результаты расчета уровня неповреждающих напряжений для пяти вышеотмеченных процессов нагружения картера с использованием относительных показателей (6) и (7).

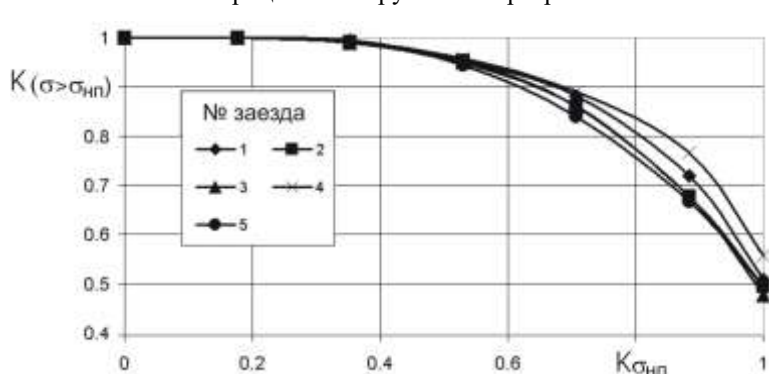


Рис. 4. Зависимость доли повреждающего действия отброшенной части нагрузочного спектра от уровня неучитываемых напряжений

Как видно из рисунка 4, исключение напряжений до 0,6 предела выносливости вызывает изменение долговечности не более чем на 10 % для всех пяти заездов. Эти результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными ранее при определении уровня неповреждающих напряжений балок осей автопоезда по эксплуатационным нагрузочным спектрам, где средняя величина неповреждающих напряжений составила в среднем 0,65 предела выносливости.

На рисунке 5 приведен фрагмент одного из исходных процессов нагружения наиболее опасной зоны картера и процессы, полученные удалением циклов, повреждающее действие которых эквивалентно 30 и 60 % исходного предела выносливости  $\sigma_{-1}$ , (соответственно 17 и 34 МПа).

Взятый для примера процесс нагружения содержит 5736 циклов. Амплитуда максимального цикла, приведенного к эквивалентному по повреждению симметричному, составляет 143,7 МПа, а минимального – 0,2 МПа. После удаления циклов, эквивалентных по повреждению  $\sigma_{нп} = 0,3\sigma_{-1}$ , процесс сокращается до 164 циклов, а при использовании  $\sigma_{нп} = 0,6\sigma_{-1}$  – до 40 циклов. В последнем случае, при режиме испытаний с частотой нагружения 10 Гц и работой в две смены за рабочую неделю можно воспроизвести 72 тыс. км пробега данных для условий эксплуатации.

На основании исследований [5] работа автомобиля-лесовоза в таких условиях составляет порядка 10 % от общего ресурса, а при условии, что только половина пробега приходится на движение в груженом состоянии, можно сделать заключение о существенном ускорении сроков испытания конструкции.

Следует заметить, что для составления полноценной программы испытаний необходимы данные по нагруженности для всех типовых условий эксплуатации, весовых состояний, подобранные с учетом длительности работы на том или ином режиме.

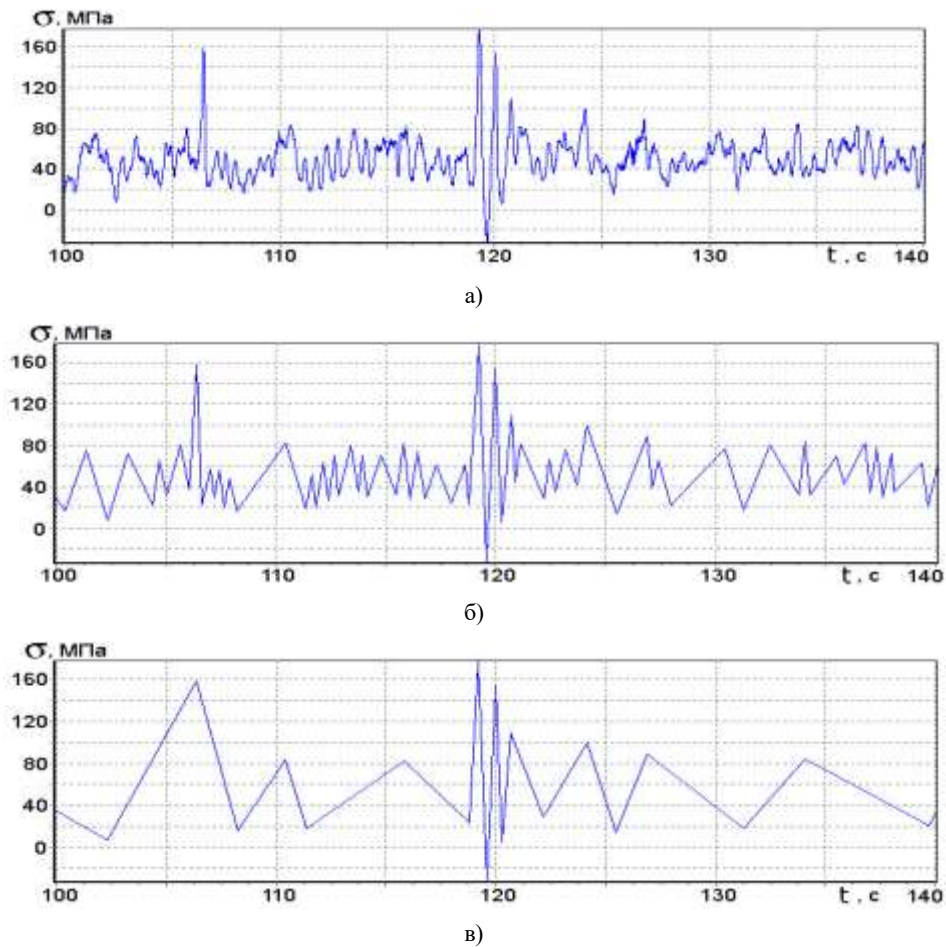


Рис. 5. Фрагмент процесса нагружения картера:  
 а – исходный процесс; б – удалены циклы с  $\sigma_{min} = 0,3\sigma_{-1}$ ; в – удалены циклы с  $\sigma_{min} = 0,6\sigma_{-1}$

**Заключение.** В работе приводится описание методики расчетного определения уровня неповреждающих напряжений случайных процессов нагружения. Наиболее эффективная область ее практической реализации – формирование нагрузочных спектров для ускоренной оценки циклической долговечности несущих конструкций и деталей машин при стандартных рандом-испытаниях. Достигнуто хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов, что подтверждает достоверность разрабатываемого подхода.

Предложенная методика также позволяет исключать неповреждающие циклы непосредственно из случайного процесса нагружения, при сохранении исходной последовательности основных повреждающих циклов. При наличии современного испытательного оборудования это позволяет наиболее точно отразить особенности эксплуатационного нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yan, J.H. Experimental investigation on the small-load-omitting criterion / J.H. Yan, X.L. Zheng, K. Zhao // Int J Fatigue 23. – 2001. – P. 403 – 415.
2. Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis / C. Amzallag [et al.] // Int J Fatigue 16. – 1994. – P. 287 – 293.
3. Почтенный, Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций / Е.К. Почтенный. – Минск: Арти-Фекс, 2002. – 187 с.
4. Шмелев, А.В. Схематизация случайных процессов нагружения при максимальных напряжениях цикла меньше предела выносливости / А.В. Шмелев // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2006. – № 3. – С. 37 – 41.
5. Жуков, А.В. Теория лесных машин: учеб. пособие для студентов вузов / А.В. Жуков. – Минск: БГТУ, 2001. – 640 с.

Поступила 14.05.2007