

## УЧЁТ ВАРИАЦИИ СВОЙСТВ И НАГРУЖЕННОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ РЕСУРСА

*Описано дальнейшее развитие методов анализа безопасности и расчёта вероятностных характеристик циклической прочности и ресурса с разработкой подхода, посвящённого оценке взаимосвязи параметров рассеяния основных механических свойств, нагруженности и запасов прочности.*

**Ключевые слова:** циклическая долговечность, вероятностные характеристики, запас прочности, безопасность.

Существующая в реальных конструкциях существенная неоднородность механических и циклических характеристик материалов, изменчивость эксплуатационных нагрузок, вариация трещиностойкости и конструкторско-технологических факторов влияют на рассеяние долговечности и на случайный характер накопления усталостных повреждений. Все эти и другие факторы требуют разработки и применения уточнённых вероятностных методов оценки прочности, ресурса, живучести и безопасности ответственных машин и конструкций, развиваемых в ИМАШ РАН в течении ряда последних лет [1–6].

Для проведения расчётной оценки взаимосвязи параметров рассеяния основных механических свойств (ОМС), нагруженности и запасов прочности в качестве первого шага такой оценки были построены расчётные вероятностные кривые усталости для характеристик стали 38ХНЗМФА при 20<sup>0</sup>С по заданным параметрам вероятности  $P$  значений ОМС (табл. 1). В качестве исходных характеристик приняты  $R_m^T = 1000$  МПа,  $R_{p_{0,2}}^T = 900$  МПа,  $E^T = 2,1 \cdot 10^6$  МПа,  $Z = 50\%$ ,  $r = 0,441$ . Кривые долговечности построены в соответствии с уравнениями Норм прочности [7] применяемых для определения допускаемой амплитуды условного упругого напряжения или допускаемого числа циклов. При принятых в расчете коэффициентах запасов  $n_\sigma = n_N = 1$  для однородного напряжённого состояния уравнения кривые усталости (1) и (2) для условий жёсткого нагружения из Норм вырождаются в уравнение (3)

$$[\sigma_{\alpha F}] = \frac{E^T \cdot e_c^T}{n_\sigma (4[N_0])^m} + \frac{R_c^T}{n_\sigma \left[ (4[N_0])^{m_e} + \frac{1+r}{1-r} \right]}, \quad (1)$$

$$[\sigma_{aF}] = \frac{E^T \cdot e_c^T}{(4n_N[N_0])^m} + \frac{R_c^T}{(4n_N[N_0])^{m_e} + \frac{1+r}{1-r}}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $e_c^T$  – характеристика пластичности, зависящая от значений  $Z_c^T$ ;  $R_c^T$  – характеристика прочности, зависящая от  $R_m^T$  и  $Z^T$ ;  $r$  – коэффициент асимметрии напряжений;  $m$ ,  $m_e$  – характеристики материала.

$$\sigma_{aF} = \frac{E \cdot e_c}{(4N_0)^m} + \frac{R_c}{(4N_0)^{m_e} + \frac{1+r}{1-r}}. \quad (3)$$

Таблица 1

**Значения расчётного рассеяния основных механических свойств стали 38ХНЗМФА при 20°С для различных уровней вероятности и принятых коэффициентах вариации свойств**

Характеристика	Коэффициент вариации, $\nu$	Вероятность $P$ , %								
		0,999	0,995	0,99	0,95	0,5	0,05	0,01	0,005	0,001
$R_{p_{0,2}}$ , МПа	0,08	1122,5	1085,8	1067,8	1018,9	900	781,9	733,2	714,2	677,5
$R_m$ , МПа	0,06	1183,6	1154,8	1139,8	1098,4	1000	901,6	860,2	845,2	816,4
$\Psi$ , %	0,12	68,5	65,5	64	59,8	50	40,16	36,0	34,5	31,5
$E$ , МПа	0,02	$2,23 \cdot 10^5$	$2,21 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$	$2,17 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,03 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	$1,99 \cdot 10^5$	$1,97 \cdot 10^5$
$\frac{R_p}{R_m}$	-	0,95	0,94	0,94	0,93	0,9	0,87	0,852	0,845	0,83

Вводя указанные характеристики ОМС для заданной вероятности  $P$  в уравнение (3) можно получить расчётные оценки долговечности по параметру вероятности разрушения (появление трещины) (рис. 1).

Рассеяние расчётных значений механических характеристик стали для принятых вероятностей, равных 0,001, 0,01, 0,5, 0,99, 0,999 определялись по известным зависимостям теории вероятности в предположении нормального закона их распределения для следующих принятых коэффициентов вариации свойств:  $\nu = 0,08$  для  $R_{p_{0,2}}^T$ ,  $\nu = 0,06$  для  $R_m^T$ ,  $\nu = 0,12$  для  $Z^T$  и  $\nu = 0,02$  для  $E^T$ .

Аналогичным образом в соответствии с [7] рассчитываем вероятностные значения характеристик  $R_c$ ,  $e_c$ ,  $R_l$ ,  $m$ ,  $m_e$  и  $E$ .

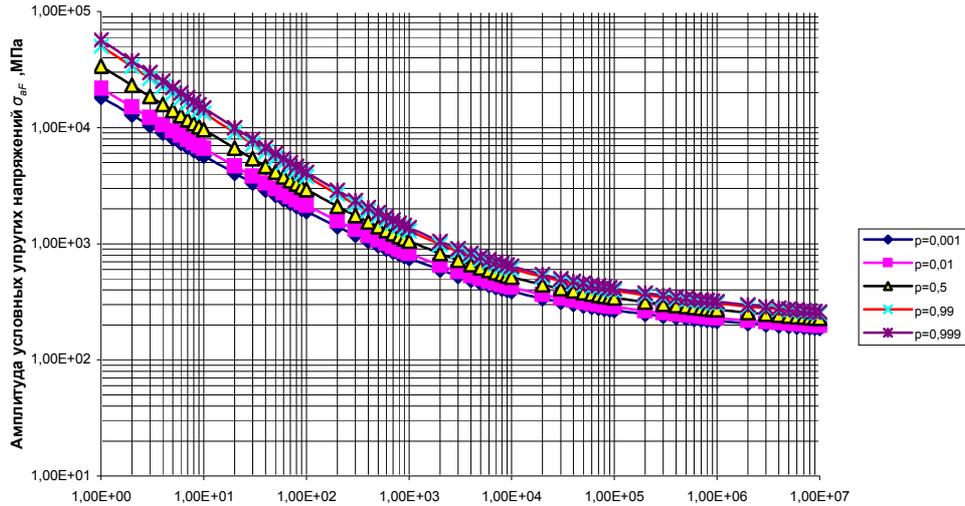


Рис. 1. Кривая усталости для стали 38ХНЗМФА при 20°C по параметру вероятности  $P$  значений ОМС.

Согласно [7] – характеристика прочности  $R_c^T$  принимается равной:

$$R_c^T = R_m^T (1 + 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot Z_C^T), \quad (4)$$

где  $e_c^T$  – характеристика пластичности:

$$e_c^T = 1,15 \lg \frac{100}{100 - Z_c^T}. \quad (5)$$

Показатели степени  $m$  и  $m_e$  и предел выносливости  $R_{-1}^T$  принимаются для случая  $700 \leq R_m^T \leq 1200$  МПа следующими:

$$\begin{aligned} R_{-1}^T &= (0,54 - 2 \cdot 10^{-4} R_m^T) \cdot R_m^T, \\ m &= 0,36 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot R_m^T, \\ m_e &= 0,132 \left[ \frac{R_m^T}{R_{-1}^T} (1 + 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot Z^T) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Построение усталостных кривых производилось для фиксированных значений долговечностей.

Для оценки взаимосвязи параметров рассеяния ОМС и нагруженности на долговечность и запасы аналогично проведён расчёт рассеяния амплитуд напряжений  $\sigma_{aF}$  при различных коэффициентах вариации  $v_\sigma$  (0,01; 0,05; 0,1)

для уровней вероятностей  $P$ , равных 0,001; 0,01; 0,99; 0,999 для заданных чисел циклов  $N_i$  кривой усталости ( $10^1, 10^3, 1,34 \cdot 10^3, 10^5, 10^7$ ). Налагая указанные рассеяния напряжений на кривые рассеяния долговечностей для определенного уровня вероятности значений ОМС для заданных сечений по долговечности  $N_i$  можно выявить такие неблагоприятные сочетания указанных рассеяний, которые приводят к наиболее значительному снижению долговечностей до образования трещин  $N_{e0}$ , уменьшению реализованных суммарных запасов по долговечности  $n_c$ , а также можно определить вероятность реализации таких неблагоприятных сочетаний (табл. 2).

Таблица 2

**Запасы по долговечности  $n_N$  в условиях взаимосвязи параметров рассеяния ОМС и нагруженности ( $v_\sigma=0,05$ ) по кривой усталости ( $n_N=n_c$ )**

$N_i$ число циклов	Уровень вероятности реализации событий при неблагоприятном сочетании ОМС и нагруженности, $P\%$					$P^*$
	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$10^{-4}$		$10^{-6}$		
	$n_N$	$N_{e0}$	$n_N$	$N_{e0}$	$n_N$	
$10^1$	1	3,8	2,63	2,6	3,85	$3 \cdot 10^{-11}$
$10^2$	1	41	2,44	26	3,85	$2 \cdot 10^{-10}$
$10^3$	1	420	2,38	270	3,7	$6 \cdot 10^{-11}$
$1,34 \cdot 10^3$	1	620	2,16	380	3,53	$1,3 \cdot 10^{-10}$
$10^5$	1	16 000	6,25	9 000	11,1	$2,2 \cdot 10^{-6}$
$10^7$	1	210 000	47,6	$1 \cdot 10^5$	100	$2,4 \cdot 10^{-3}$

Так, например, минимальные значения долговечности  $N_{e0}$  по кривой усталости будет при сочетании рассеяния действующих амплитуд напряжений  $\sigma_{af}$ , определённых для вероятности  $p=0,999$ , и кривой усталости для минимального значения ОМС при  $p=0,001$ . Вероятность реализации такого события составит  $p=10^{-3} \cdot 10^{-3}=10^{-6}$ .

При сочетании напряжений с вероятностью  $p=0,99$  и кривой усталости с вероятностью  $p=0,01$  вероятность события составит  $p=10^{-2} \cdot 10^{-2}=10^{-4}$ .

По данным табл. 2 на рис. 2 показано изменение долговечности в условиях взаимосвязи параметров рассеяния ОМС и нагруженности (для трёх коэффициентов вариации напряжений - 0,01, 0,05, 0,1) по параметру числа циклов  $N_i$  ( $10^1, 10^2, 10^3, 1,34 \cdot 10^3, 10^5, 10^7$ ). Из рисунка видно существенное снижение долговечностей при такой взаимосвязи двух рассеяний по сравнению с 50%-вероятностной кривой усталости (при  $v_\sigma=0$  и  $v_{ОМС}=0$ ). Темп снижения долговечности для всех заданных чисел циклов  $10^1; 10^3; 1,34 \cdot 10^3; 10^5; 10^7$  увеличивается по мере увеличения коэффициента вариации напряжений (от 0,01 до 0,1).

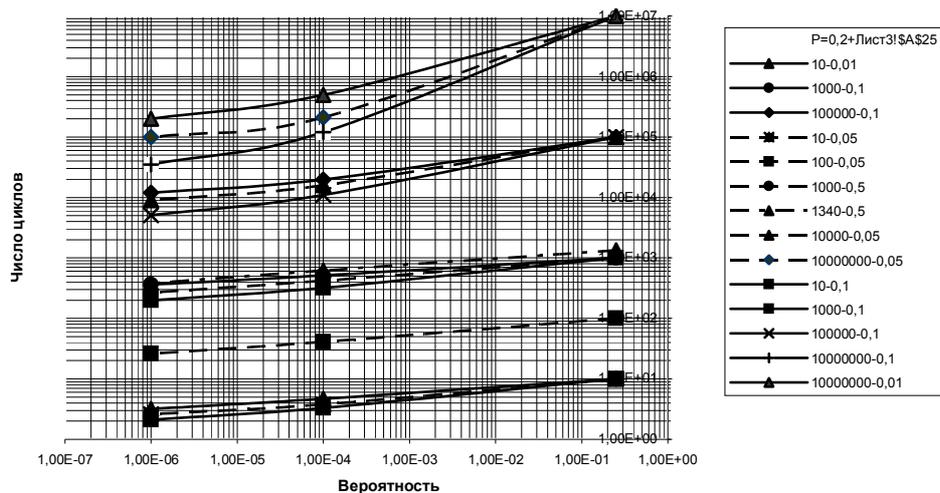


Рис. 2. Изменение долговечности в условиях взаимосвязи параметров рассеяния ОМС и нагруженности (для заданных  $V_{\sigma_{aF}} = 0,01; 0,5; 0,1$ ) по параметру числа циклов.

Из данных табл. 2 и рис. 4 видно, что исчерпание запаса по долговечности  $n_c = 10$  происходит в диапазоне очень малых вероятностей  $P$  (примерно от  $3 \cdot 10^{-11}$  до  $2 \cdot 10^{-10}$ ). Значение вероятности  $P$  определяется на рис.2 точкой пересечения с осью абсцисс продолженных кривых изменения долговечностей (для  $v_\sigma = 0,05$ ).

Также было рассмотрено изменение долговечностей  $N_{\text{ОМС}}$  и  $N_{\text{напр}}$  (и, соответственно, запасов по долговечности  $n_{\text{ОМС}}$  и  $n_{\text{напр}}$ ) на вероятностной кривой усталости в условиях изменения только уровней вероятности ОМС (при  $P$  равном 0,001; 0,01 и 0,5) и неизменном среднем значении напряжений  $\sigma_{aF} = \text{const}$  или только рассеяния напряжений  $\sigma_{aF}$  (при  $P$  равном 0,001, 0,01, 0,5, 0,99 и 0,999) для различных коэффициентов вариации при неизменном значении основных механических свойств (т.е относительно 50%-ой кривой усталости).

На рис. 3 показано сравнение темпа изменения (уменьшения) долговечностей  $N_{\text{ОМС}}$  и  $N_{\text{напр}}$ . Из рисунка видно, что для данного сочетания свойств прочности и пластичности наибольшее влияние на снижение долговечности оказывает учёт рассеяния характеристик ОМС по сравнению с влиянием рассеяния напряжений  $\sigma_{aF}$  (на рисунке представлены кривые для изменяющихся напряжений с коэффициентом вариации  $v_\sigma = 0,05$ ).

В табл. 3 представлено изменение запасов по долговечности  $n_N = n_c$ , полученное в условиях взаимосвязи параметров рассеяния ОМС и нагруженности (для варианта  $v_\sigma = 0,05$ ), по параметру чисел циклов  $N_i$  кривой усталости.

На рис. 4 и в табл. 3 представлено изменение запасов по долговечности  $n_N = n_c$ , полученное в условиях взаимосвязи параметров рассеяния ОМС и

нагруженности (для варианта  $v_\sigma = 0,05$ ), по параметру чисел циклов  $N_i$  кривой усталости. График построен по данным табл. 3.

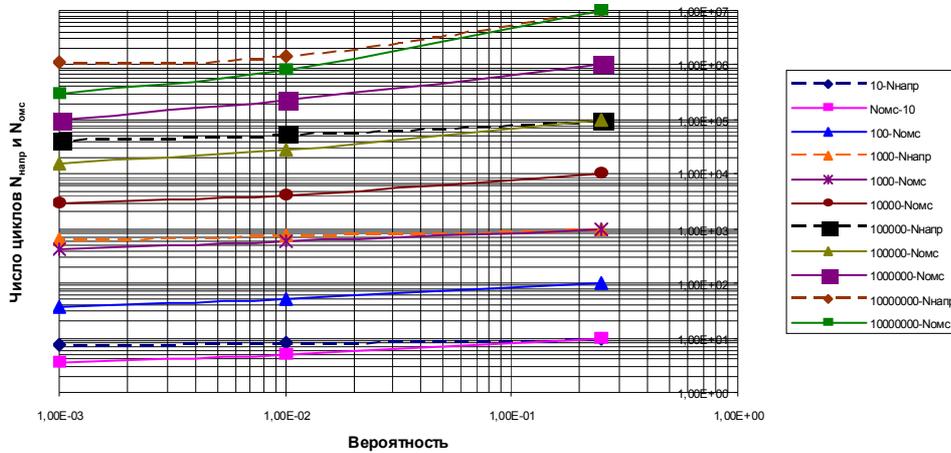
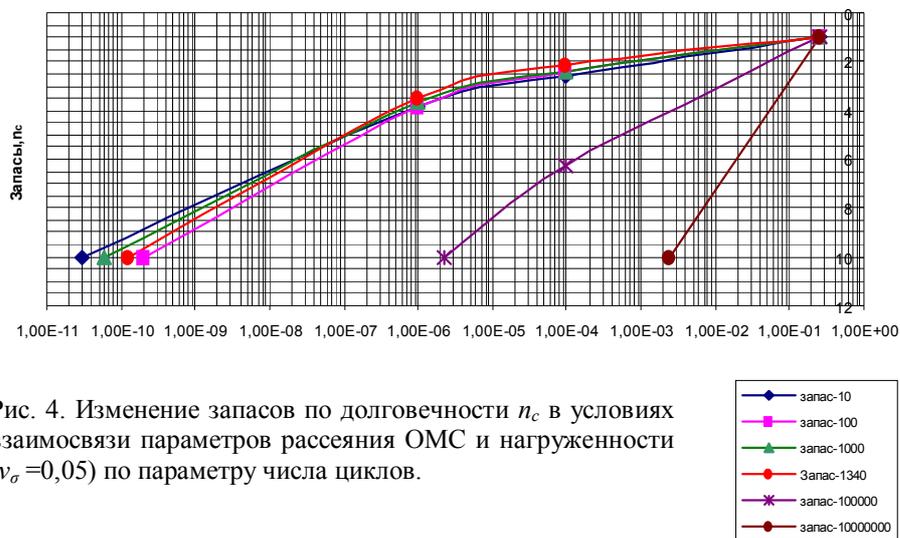


Рис. 3. Изменение долговечности с учётом рассеяния только нагруженности  $N_{напр}$  ( $v_\sigma = 0,05$ ) или ОМС  $N_{ОМС}$ .

Таблица 3

Соотношение запасов по долговечности в зависимости от рассеяния только напряжений  $n_{напр}$ , только характеристик ОМС  $n_{омс}$  или взаимосвязи параметров рассеяния ОМС и нагруженности  $n_c$  при  $v_\sigma=0,05$

Циклы $N_i$	Вероятность, $P$	Запасы				
		$n_{напр}$	$n_c$	$n_{омс}$	$n_{напр}/n_c$	$n_{омс}/n_c$
10	2,50E-01	1	1	1	1	1
	1,00E-02	1,21	1,5	2,04	0,807	1,36
	1,00E-03	1,3	1,9	2,94	0,684	1,55
100	2,50E-01		1	1		1
	1,00E-02		1,5	1,89		1,26
	1,00E-03		1,9	2,63		1,38
1000	2,50E-01	1	1	1	1	1
	1,00E-02	1,35	1,5	1,7	0,9	1,13
	1,00E-03	1,54	1,9	2,44	0,811	1,28



На графике для всех уровней вероятностей видна сконцентрированность 4-х линий, представляющих изменение запасов  $n_c$  по параметру числа циклов 10, 100, 1000 и 1340.

Линии графика для  $N_i = 10^5$  и  $N_i = 10^7$  лежат далеко в стороне и не являются представительными для определения циклических запасов по долговечности. Для выяснения вопроса о предельных границах по долговечности, где преимущественно действует коэффициент запаса  $n_N$ , была проведена операция по перестроению 50%-ой кривой усталости (см. рис. 1) в две кривые с введением нормативных запасов  $n_N = 10$  и  $n_\sigma = 2$ .

Пересечение этих кривых дало значения долговечности  $N = 1340$  и напряжения  $\sigma_{aF} = 920$  МПа (для 50%-ой кривой усталости). Определённые для этой долговечности запасы  $n_c$  также кучно ложатся на график (рис. 4) и дают незначительные вариации запасов. Для этого был проведен расчёт рассеяния амплитуд напряжений  $\sigma_{aF}$  (при  $v_\sigma = 0,05$ ) для числа циклов 1340.

Следует отметить, что в табл. 3 и на рис. 4 численные и графические значения величин коэффициентов запасов по долговечности  $n_c$ , относящихся к долговечностям порядка  $10^4$  циклов и больше, являются не представительными ( $n_N > 10$ , в таблице выделены жирным шрифтом). Кроме того, на графиках 2, 3, 4 и 5 представлены только уменьшающиеся значения долговечностей и соответственно реализованных запасов по долговечностям  $n_{ОМС}$ ,  $n_{напр}$  и  $n_c$ , вызываемых теми или иными рассеяниями (свойств или нагруженности) или их неблагоприятными сочетаниями.

Рассмотрим теперь соотношение запасов по долговечности  $n_{ОМС}$ ,  $n_{напр}$  и  $n_c$ , между собой. Сами запасы представлены в табл. 3, а на рис. 5 построены графики изменения циклических запасов по долговечности  $n_{напр}$  (две верхние

пунктирные кривые для долговечности  $10^1$  и  $10^3$ ),  $n_{ОМС}$  (три нижние штрих пунктирные кривые для  $10^1, 10^2$  и  $10^3$  циклов) и  $n_c$  (в случае взаимосвязи параметров рассеяния ОМС и нагруженности) – средняя кривая, осреднённая по данным рис. 4 для числа циклов  $10^1, 10^2, 10^3, 1,3 \cdot 10^3$ .

Из табл. 3 и рис. 5 видно, что для данного материала с его конкретными сочетаниями свойств прочности и пластичности наибольшее влияние на исчерпание циклических запасов оказывает учёт рассеяния характеристик ОМС по сравнению с влиянием рассеяния напряжений  $\sigma_{aF}$ .

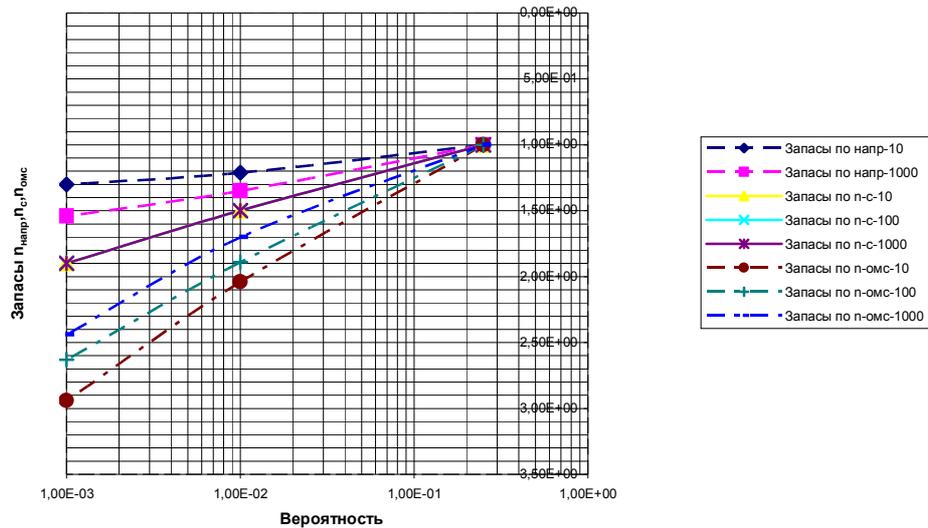


Рис. 5. Соотношение запасов прочности  $n_{напр}$ ,  $n_c$ ,  $n_{ОМС}$ .

В заключение можно отметить, что из проведенного расчётно-экспериментального анализа следует:

- введение в расчёт (для выбранных сечений по долговечности  $N_i$  кривой усталости) рассеяния только нагруженности (с тремя коэффициентами вариации по напряжениям 0,05; 0,01; 0,1) относительно 50%-ой циклической кривой (при постоянных характеристиках ОМС –  $v_{ОМС} = 0$ ) или рассеяния только характеристик ОМС (с заданными коэффициентами вариации для отдельных характеристик) при не изменяющейся ( $\sigma_{aF} = \text{const}$ ) нагрузке приводит – в случае выбора неблагоприятных сочетаний максимальных нагрузок и минимальных характеристик ОМС – к неизбежному уменьшению числа циклов нагружения (см. рис. 3) в исследованном диапазоне вероятностей  $P$ , равных  $2,5 \cdot 10^{-1} \div 10^{-3}$ ;

- расчётный случай, соответствующий реализации одновременного взаимодействия параметров рассеяния ОМС и нагруженности, занимает промежуточное положение как по темпу снижения долговечности (в исследуемом диапазоне вероятностей  $10^{-6} \div 2,5 \cdot 10^{-1}$ ) (см. рис. 2), так и по абсолютной величине реализованных циклических запасов  $n_c$  (см. рис. 5).

– исчерпание запаса по долговечности  $n_c = 10$  при реализации одновременного взаимодействия параметров рассеяния ОМС и нагруженности происходит в диапазоне очень малых вероятностей  $P$  (примерно от  $3 \cdot 10^{-11}$  до  $2 \cdot 10^{-10}$ ).

Полученные различия в кривых изменения запасов основаны на принятом выше допущении об одностороннем изменении всего комплекса ОМС по параметру вероятности для заданных коэффициентов вариации  $v$ . Как правило, традиционные технологии связаны с разнонаправленным изменением соответствующих групп свойств ОМС (увеличению прочности обычно соответствует уменьшение пластичности и наоборот). Это обстоятельство подлежит дополнительному анализу.

Получены новые результаты, связанные с анализом изменения циклической долговечности и циклических запасов при рассеянии только характеристик ОМС или рассеянии только напряжений  $\sigma_{aF}$ , а также в случае взаимосвязи параметров рассеяния ОМС, нагруженности и запасов прочности.

Таким образом, результаты проводимых комплексных вероятностных исследований циклической прочности и долговечности на базе уравнений кривых усталости и вероятностных характеристик основных механических свойств и условий нагружения могут быть использованы как научная основа для последующей уточнённой оценки циклической долговечности и остаточного ресурса по параметрам вероятности разрушения с использованием нормативных и скорректированных запасов. Это является одним из основных методов количественного определения показателей безопасности и рисков потенциально опасных объектов энергетического машиностроения.

## Summary

The purpose of these researches is the further development of methods of safety analysis and estimation of probability characteristics of the fatigue strengths and lifetime. Suggested approach is devoted to an estimation of interrelation of dispersion parameters of the basic mechanical properties, loading and safety factors.

**Keywords:** cycles durability, probability characteristics, safety factors, safety.

## Резюме

Описано подальший розвиток методів аналізу безпеки та розрахунку ймовірних характеристик циклічної міцності та ресурсу з розробкою підходу, присвяченого оцінці взаємозв'язку параметрів розсіювання основних механічних властивостей, навантаженості і запасів міцності.

**Ключові слова:** циклічна довговічність, характеристики ймовірності, запас міцності, безпека.

1. *Махутов Н. А.* Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: Наука, 2008. – 523 с.
2. Статистические закономерности малоциклового разрушения / Махутов Н. А., Зацаринный В. В., Базарс Ж. Л. и др. – М.: Наука, 1989. – 252 с.
3. *Механика* малоциклового разрушения // Под ред. Н. А. Махутова, А. Н. Романова. – М.: Наука, 1986. – 264 с.
4. *Махутов Н. А., Фролов К. В., Стекольников В. В., Зацаринный В. В. и др.* Прочность и ресурс водо-водяных энергетических реакторов. – М.: Наука, 1988. – 311 с.
5. *Махутов Н. А., Зацаринный В. В.* Вариации долговечностей на ранних стадиях разрушения с учётом накопления повреждений. Тр. международной конференции «Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций», 6-9 июня 2000 г., Киев (Украина). – К.: Нац. АН Украины. Ин-т проблем прочности, 2000.-Логос 2000. – Т. 1. – С. 273 – 280.
6. *Махутов Н. А.* Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. / Н. А. Махутов – Новосибирск: Наука, 2005. – 4.1 – 494 с., 4.2 – 610 с.
7. *Нормы* расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. – М.: Энергоиздат, 1989. – 525 с.

Поступила 22.05.2009