

УДК 691.714:620.169.1+69.059.4

А.З. Манапов, И.Ю. Майстренко

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА

В работе проводится анализ и сравнение известных теоретических моделей расчета надежности конструкции с учетом времени ее эксплуатации (таблица 1) и предлагается новая методика, основанная на статистическом моделировании (таблица 2). Для описания коррозионного износа в условиях длительной эксплуатации используются функции, предложенные в работах [4], [5], [6] (таблица 3). Анализ выполняется на конкретном примере конструктивного элемента, геометрические размеры, параметры,

характеризующие агрессивность эксплуатационной среды, силовые воздействия и прочностные характеристики материала которого приведены в таблицах 4-6.

В качестве примера конструктивного элемента принята стальная коробчатая балка. Геометрические размеры балки получены в ходе натурных обследований. При этом выполнено по 10 измерений фактических толщин горизонтальных поясов и вертикальных стенок балки с учетом предельных

Таблица 1

Источник получения информации	Формула расчета вероятности отказа с учетом времени эксплуатации
В.В.Болотин [1]	$Q(t) = \sum_{k=1}^n \int_0^t \frac{\Delta_{\sigma}(t)}{\sqrt{\Delta_{\sigma}^2(t) + \Delta_R^2(t)}} \cdot \exp\left\{-\frac{[\mu_R(t) - \mu_{\sigma}(t)]^2}{2 \cdot [\Delta_{\sigma}^2(t) + \Delta_R^2(t)]}\right\} \cdot \frac{\omega_{\sigma}}{2\pi} dt,$ <p>$\sigma(t)$ - напряжения, действующие на k-тый расчетный элемент конструкции; $R(t)$ - удельная прочность; $\mu_{\sigma}(t)$ и $D[\sigma(t)] \equiv \Delta_{\sigma}^2(t)$ - математическое ожидание и дисперсия напряжения; $\mu_R(t)$ и $D[R(t)] \equiv \Delta_R^2(t)$ - математическое ожидание и дисперсия удельной прочности; ω_{σ} - коэффициент вариации нагрузки.</p>
А.Р.Ржаницын [2]	$Q(t) = \exp\left\{\frac{t}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{B_R^2(t) \cdot \xi^2(t) + B_{\sigma}^2(t)}{A_R^2(t) \cdot \xi^2(t) + A_{\sigma}^2(t)} \cdot \exp\frac{-(\xi(t)-1)^2}{2 \cdot (A_R^2(t) \cdot \xi^2(t) + A_{\sigma}^2(t))}\right\},$ <p>$A_R^2(t) = \frac{D[R(t)]}{\mu_R^2(t)}$, $B_R^2(t) = \frac{-D^*[R(0)]}{\mu_R^2(t)}$, $A_{\sigma}^2(t) = \frac{D[\sigma(t)]}{\mu_{\sigma}^2(t)}$, $B_{\sigma}^2(t) = \frac{-D^*[\sigma(0)]}{\mu_{\sigma}^2(t)}$ - параметры, характеризующие изменчивость процессов $R(t)$ и $\sigma(t)$ во времени; $\xi(t) = \frac{\mu_R(t)}{\mu_{\sigma}(t)}$ - коэффициент запаса.</p>
А.А.Червоный, В.И.Лукьященко, Л.В.Котин [3]	$Q(t) = 1 - \exp\left\{-\frac{t}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\Delta_{\nu}}{\Delta_{\sigma}(t)} \cdot e^{-\frac{\mu_{\sigma}(t)^2}{2 \cdot \Delta_{\sigma}(t)^2}}\right\},$ <p>$u(t) = R(t) - \sigma(t)$; $R(t)$ - удельная прочность элемента конструкции; $\sigma(t)$ - напряжения; $\mu_{\sigma}(t)$ и $\Delta_{\sigma}(t)$ - математическое ожидание и стандарт $u(t)$; $\nu(t) = \frac{u(t+dt) - u(t)}{dt}$ - скорость изменения вероятностных характеристик во времени; Δ_{ν} - стандарт случайного процесса $\nu(t)$.</p>



Таблица 2

Основные ступени расчета	Статистические и расчетные параметры
I. Определение расчетного числа нагружений элемента конструкции N за расчетное время эксплуатации τ	$N(\tau)$
II. Расчет определяющих параметров функций для описания коррозионного износа элементов конструкции по данным натурных обследований	$\delta x_m(t)$
III. Определение статистических параметров случайных процессов, характеризующих действующую нагрузку $\sigma(t)$ и прочность $R(t)$	$\sigma_j(t) \sim \sigma[\delta x_m(t); \mu_\sigma(t), \Delta_\sigma(t)],$ $R_j(t) \sim R[\mu_R(t); \Delta_R(t)],$ $\mu_\sigma(t), \Delta_\sigma(t)$ - функции изменения во времени математического ожидания и стандарта нагрузки, $\mu_R(t), \Delta_R(t)$ - функции изменения во времени математического ожидания и стандарта прочности.
IV. Получение по известным параметрам статистического распределения напряжения с помощью генератора случайных чисел случайных реализаций значения нагрузки	σ_j $(\sigma_1, \dots, \sigma_j, \dots, \sigma_N)$
V. Получение по известным параметрам статистического распределения прочности с помощью генератора случайных чисел случайных реализаций значения прочности	R_j $(R_1, \dots, R_j, \dots, R_N)$
VI. Попарное сравнение значений случайных реализаций нагрузки и прочности из общего числа испытаний	σ_1 и R_1 σ_j и R_j σ_N и R_N
VII. Определение количества случаев превышения нагрузкой прочности из общего числа испытаний (число отказов)	$n_j = \sigma_j > R_j$
VIII. Оценка надежности (вероятности отказа) конструктивного элемента за расчетное время эксплуатации по отношению числа отказов к общему числу реализаций	$\tilde{Q}_j(\tau) = \frac{n_j}{N(\tau)},$ $[n_{j+1} \geq n_j, \tilde{Q}_{j+1}(\tau) \geq \tilde{Q}_j(\tau)]$



Таблица 3

Источник получения информации	Функции для описания кинетики коррозионного износа
<p>А.И. Кикин, А.А. Васильев, Б.Н. Кошутин [4]</p>	$\delta x_m(t) = \begin{cases} \delta x_0 & (0 \leq t \leq t_s), \\ \delta x_0 - \alpha_c \cdot t^n & (t > t_s). \end{cases}$ <p>где α_c – эмпирический коэффициент, зависящий от марки стали и агрессивности эксплуатационной среды; n – эмпирический коэффициент, зависящий от характера коррозии (для малоуглеродистых сталей $n = 3$).</p>
<p>Е.В. Горохов, Я. Брудка, М. Лубиньски [5]</p>	$\delta x_m(t) = \begin{cases} \delta x_0 & (0 \leq t \leq t_s), \\ \delta x_0 - [\alpha_k \cdot (1 - e^{-b_k t})] & (t > t_s). \end{cases}$ <p>где $\delta x_m(t)$ – толщина стального листа в момент времени t; δx_0 – начальная толщина стального листа; α_k – структурный показатель коррозионного износа стальных конструкций; b_k – коэффициент кинетики коррозионного разрушения (для стальных конструкций $b_k = 0,4$); t_s – срок службы защитных покрытий.</p>
<p>А.З. Манапов, И.И. Маннанов [6]</p>	$\delta x_m(t) = \begin{cases} \delta x_0 & (0 \leq t \leq t_s), \\ \delta x_0 - v_{st} \cdot t & (t_s \leq t \leq t_{st}), \\ \delta x_0 - v_r \cdot t & (t > t_{st}). \end{cases}$ <p>t_{st} – время стабилизации коррозионных потерь, ($t_{st} \rightarrow h_k = 135 + 150$ мкм); h_k – критическая толщина продуктов коррозии под слоем лакокрасочного покрытия; $v_{st} = \frac{d\delta x_m}{dt}$ – условная скорость коррозии за время стабилизации коррозионных потерь, зависящая от агрессивности эксплуатационной среды ($0,01 \frac{мм}{год}$ – для неагрессивной; $0,05 \frac{мм}{год}$ – для слабоагрессивной; $0,50 \frac{мм}{год}$ – для среднеагрессивной); v_r – средняя условно-равномерная скорость коррозии за время эксплуатации конструкции после стабилизации коррозионных потерь.</p>



Таблица 4

Пролет	22,5 м
Начальные (проектные) геометрические размеры стальной коробчатой балки	
Геометрические размеры стальной коробчатой балки по результатам обмеров после 38 лет эксплуатации в слабоагрессивной среде	

отклонений по толщине стали при прокатке [7], доверительная вероятность принята равной 0,95.

На рис.1 показаны графики изменения во времени значений математического ожидания нормальных напряжений от изгиба $m_s(t)$ стальной коробчатой балки, полученных для функций коррозионного износа таблицы 3.

Параметры статистического распределения удельной прочности (в данном случае предела текучести стали коробчатой балки) получены по данным исследований механических свойств строительных сталей [8]. Изменение во времени статистических параметров предела текучести стали оценивалось, исходя из результатов экспериментальных исследований образцов из малоуглеродистых сталей, показывающих, что предел текучести стали даже при значительном коррозионном поражении не снижается более чем на 5% [9].

С использованием динамических моделей (таблицы 1 и 2), функций коррозионного износа (таблица 3) выполнены расчеты вероятности отказов конструктивного элемента - стальной коробчатой балки. Для всех расчетов приняты одинаковые исходные статистические параметры (таблицы 4-6). При расчетах надежности стальной коробчатой балки методом статистического моделирования использовалась многофункциональная вычислительная система MathCAD. Полученные результаты сведены в таблицы 7 и 8 и показаны в виде графиков зависимости вероятности отказов и интенсивности отказов от продолжительности эксплуатации стальной коробчатой балки на рисунках 2-8.

Результаты выполненных расчетов вероятности отказа и интенсивности отказов стальной коробчатой

балки с использованием формул, представленных в таблицах 1, 2 и 3, позволяют сделать следующие выводы:

1. Функции коррозионного износа, предложенные А.И.Кикиным, А.А.Васильевым, Б.Н.Кошутиным [4], Е.В.Гороховым, Я.Брудка, М.Лубиньски [5], А.З.Манаповым, И.И.Маннановым [6], для продолжительности эксплуатации до 4000 дней дают практически одинаковые результаты по ожидаемому числу отказов, после 4000 дней эксплуатации разброс результатов для одинаковых исходных данных значительный. Например, при оценке надежности по динамической модели [1] с продолжительностью эксплуатации 10000 дней: для функции коррозионного износа [4] на 1 млн. объектов следует ожидать 65 отказов; для функции коррозионного износа [5] – 123 отказа; для функции коррозионного износа [6] – 114 отказов; без учета коррозионного износа – 16 отказов.

2. Учет коррозионного износа увеличивает ожидаемое число отказов для продолжительности эксплуатации до 4000 дней в среднем в 2 раза, а для продолжительности эксплуатации до 10000 дней в среднем в 8 раз.

3. Интенсивность отказов стальной коробчатой балки во времени возрастает для всех рассмотренных математических моделей коррозионного износа и для продолжительности эксплуатации до 4000 дней отличается незначительно. При увеличении продолжительности эксплуатации конструкции наибольшая интенсивность отказов получена для функции [6], наименьшая – для функции [4].

4. Оценка надежности методом статистического моделирования дает наименьший разброс результатов при большой продолжительности эксплуатации и наибольший разброс результатов при непродолжительной эксплуатации.



Таблица 5

Сведения о фактическом использовании конструкции	
Количество дней работы в году	300 дней
Расчетное время эксплуатации, τ	11400 дней
Число нагружений за 1 сутки	100 циклов
Параметры, характеризующие агрессивность эксплуатационной среды	
Эксплуатационная среда	Слабоагрессивная
Характеристика защитного покрытия	Грунт ГФ-0119 Лакокрасочное покрытие ПФ-115
Ориентировочный срок службы защитного покрытия, t_s	3 года
Статистические параметры, характеризующие силовые воздействия	
Максимальный изгибающий момент в расчетном сечении	107250 кгс·м
Коэффициент вариации нагрузки, ω_σ	0,042
Математическое ожидание нормальных напряжений для начальных сечений балки, $\mu_\sigma(0)$	154,649 МПа
Стандарт нормальных напряжений для начальных сечений балки, $\Delta_\sigma(0)$	6,495 МПа

Таблица 6

Материал конструкции	Сталь марки ВСтЗсп
Математическое ожидание, $\mu_R(0)$	274,7 МПа
Стандарт, $\Delta_R(0)$	24,5 МПа
Законы изменения во времени статистических параметров предела текучести стали	
Законы изменения во времени математического ожидания $\mu_R(t)$ и стандарта $\Delta_R(t)$	$\mu_R(t) = \mu_R(0) - \alpha_R \cdot t$ МПа
	$\Delta_R(t) = \Delta_R(0) + \alpha_{\Delta R} \cdot t$ МПа
Эмпирические поправки, учитывающие динамику изменения во времени предела текучести стали	$\alpha_R = 0,43 \cdot 10^{-5}$
	$\alpha_{\Delta R} = 0,04 \cdot 10^{-5}$



Таблица 7

Ожидаемое число отказов стальной коробчатой балки на 1 млн. конструкций за время эксплуатации t_i

Функция коррозионного износа	Ожидаемое число отказов за время t_i , $Q(t_i)$											
	t_i											
	1000 дней	2000 дней	3000 дней	4000 дней	5000 дней	6000 дней	7000 дней	8000 дней	9000 дней	10000 дней	11000 дней	12000 дней
Математическая модель В.В. Болотина [1]												
[4]	0	1	2	4	6	11	18	28	44	65	95	136
[5]	0	1	2	4	9	17	30	50	80	123	182	262
[6]	0	1	2	4	8	14	24	41	69	114	184	294
Без учета коррозии	0	1	1	2	3	4	6	8	12	16	21	28
Математическая модель А.Р. Ржаницына [2]												
[4]	20	42	77	131	210	325	488	716	1026	1442	1994	2714
[5]	20	47	99	191	341	571	905	1370	1994	2804	3832	5110
[6]	20	48	86	152	262	445	742	1216	1958	3099	4821	7376
Без учета коррозии	19	26	37	50	69	93	125	166	220	290	379	491
Математическая модель А.А. Червоный, В.И. Лукьященко, Л.В. Котина [3]												
[4]	0	0	0	1	1	2	3	6	9	14	22	32
[5]	0	0	0	1	2	3	6	11	18	28	42	60
[6]	0	0	0	1	1	3	5	10	18	31	52	87
Без учета коррозии	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	4	6
Метод статистического моделирования												
[4]	0	5	10	15	22	25	44	53	76	102	137	148
[5]	0	0	3	18	28	42	76	93	101	129	171	178
[6]	0	0	7	20	30	38	57	75	92	134	179	188
Без учета коррозии	0	0	7	7	10	13	16	18	24	27	34	35



Таблица 8

Ожидаемое число отказов стальной коробчатой балки на 10^9 конструкций на промежутке времени в 1 сутки при времени эксплуатации t_i

Функция коррозионного износа	Ожидаемое число отказов на промежутке времени $t_i, v(t_i)$											
	t_i											
	1000 дней	2000 дней	3000 дней	4000 дней	5000 дней	6000 дней	7000 дней	8000 дней	9000 дней	10000 дней	11000 дней	12000 дней
Математическая модель В.В. Болотина [1]												
[4]	0	1	1	2	4	6	9	12	18	25	35	47
[5]	0	1	2	3	6	10	16	25	36	50	69	92
[6]	0	1	2	3	5	8	13	22	35	56	87	134
Без учета коррозии	0	0	1	1	1	2	2	3	4	5	6	8
Математическая модель А.Р. Ржаницына [2]												
[4]	18	28	43	65	95	137	192	265	359	479	630	816
[5]	18	37	69	117	186	278	395	540	712	914	1147	1412
[6]	19	29	50	84	141	231	373	590	916	1396	2089	3070
Без учета коррозии	6	9	12	16	21	28	36	47	61	78	100	126
Математическая модель А.А. Червоный, В.И. Лукьященко, Л.В. Котина [3]												
[4]	0	0	0	0	1	1	2	3	4	6	9	12
[5]	0	0	0	0	1	2	4	6	8	12	16	21
[6]	0	0	0	0	1	2	3	6	10	17	27	43
Без учета коррозии	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2
Метод статистического моделирования												
[4]	1	3	5	8	10	13	16	19	22	25	28	31
[5]	2	4	7	10	13	16	20	23	27	31	35	39
[6]	2	4	7	10	14	17	21	25	29	33	37	42
Без учета коррозии	0	1	2	2	3	3	4	5	5	6	6	7

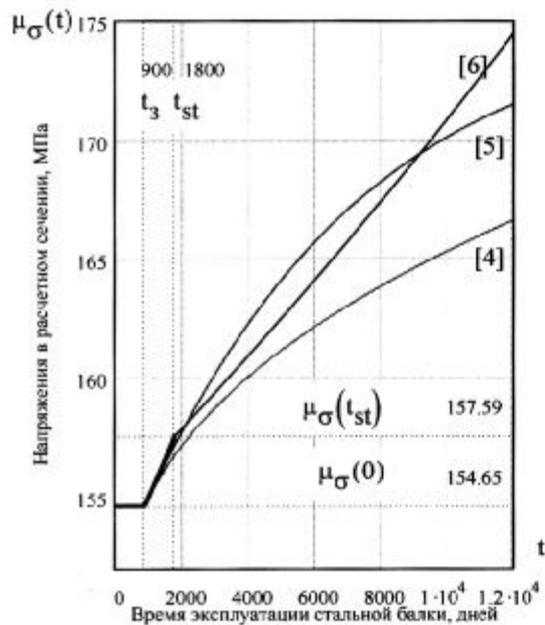


Рис.1. Динамика изменения во времени математического ожидания нормальных напряжений от изгиба стальной коробчатой балки, полученного для различных функций коррозионного износа (таблица 3)

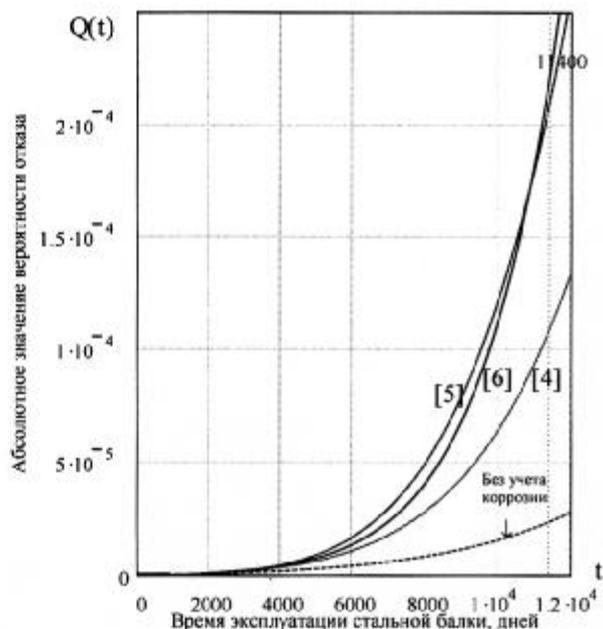


Рис.2. Изменение абсолютных значений вероятности отказа стальной коробчатой балки за время эксплуатации по динамической модели В.В.Болотина [1], полученных для различных функций коррозионного износа (таблица 3)

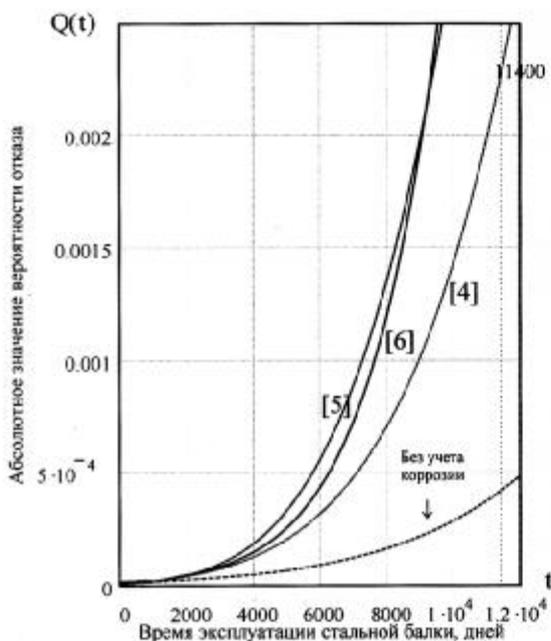


Рис.3. Изменение абсолютных значений вероятности отказа стальной коробчатой балки за время эксплуатации по динамической модели А.Р.Ржаницына [2], полученных для различных функций коррозионного износа (таблица 3)

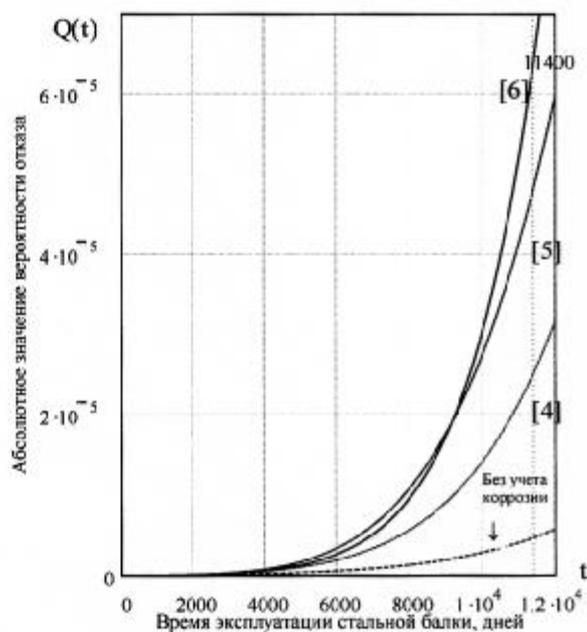


Рис.4. Изменение абсолютных значений вероятности отказа стальной коробчатой балки за время эксплуатации по динамической модели А.А.Червоный, В.И.Лукьященко, Л.В.Котина [3], полученных для различных функций коррозионного износа (таблица 3)

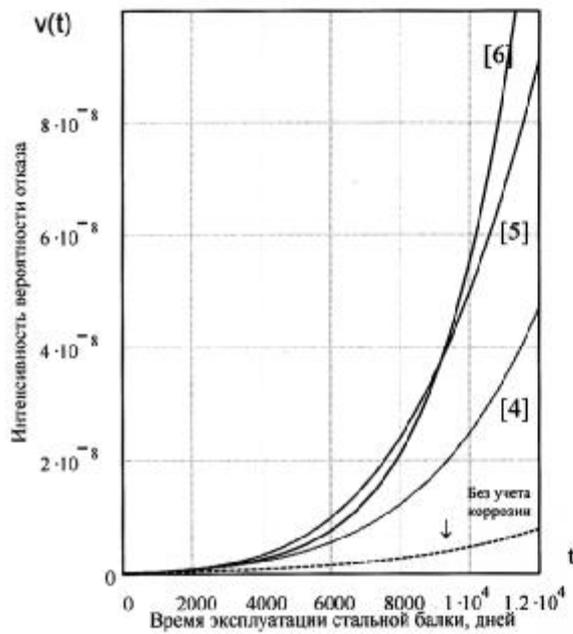


Рис.5. Интенсивность отказов стальной коробчатой балки по динамической модели В.В.Болотина [1], полученная для различных функций коррозионного износа (таблица 3)

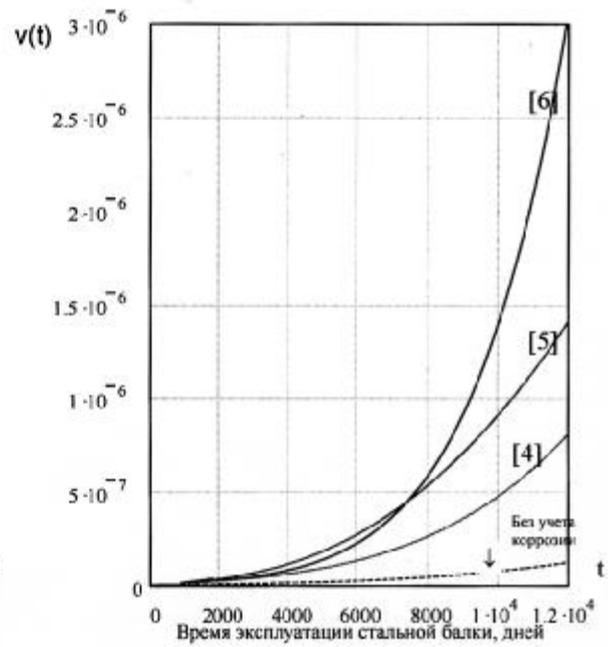


Рис.6. Интенсивность отказов стальной коробчатой балки по динамической модели А.Р.Ржаницына [2], полученная для различных функций коррозионного износа (таблица 3)

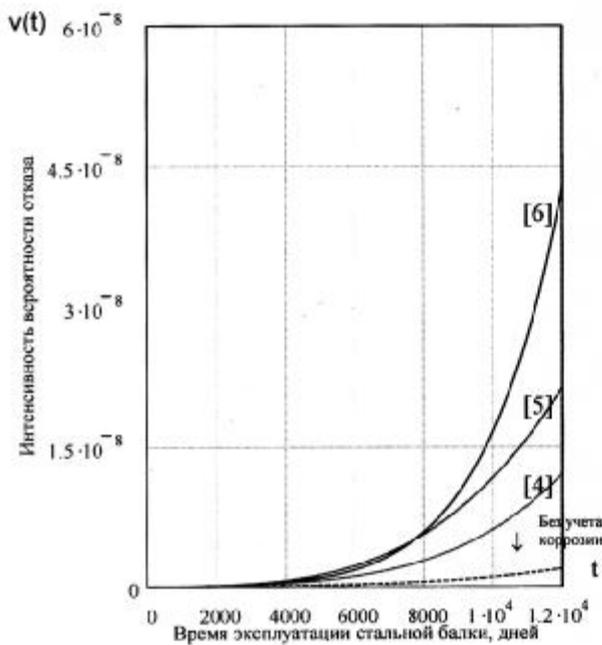


Рис.7. Интенсивность отказов стальной коробчатой балки по динамической модели А.А.Червоный, В.И.Лукьященко, Л.В.Котина [3], полученная для различных функций коррозионного износа (таблица 3)

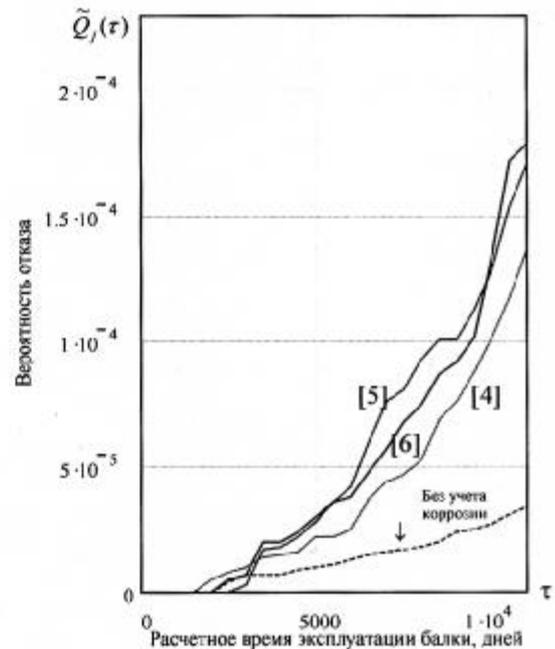


Рис.8. Дискретные ряды значений вероятности отказа стальной коробчатой балки за расчетное время эксплуатации, полученные методом статистического моделирования для различных функций коррозионного износа (таблица 3)



Литература

1. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 351 с.
2. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
3. Червоный А.А., Лукьященко В.И., Котин Л.В. Надежность сложных систем. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
4. Кикин А.И., Васильев А.А., Кошутин Б.Н. и др. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий / Под ред. А.И.Кикина. – 2-е изд., перераб. и доп.. – М.: Стройиздат, 1984. – С. 204-217.
5. Горохов Е.В., Брудка Я., Лубиньски М. и др. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции. – М.: Стройиздат, 1994. – 224-237 с.
6. Манапов А.З., Маннанов И.И. Долговечность элементов стальных конструкций, подверженных коррозии. Оптимизация, расчет и испытание металлических конструкций: Межвуз. сб. – Казань: КХТИ, 1984. – С. 64-67.
7. ГОСТ 19903-74. Сталь листовая горячекатанная. Сортамент.
8. Ароне Р.Г., Урицкий М.Р. Вероятностная оценка обеспеченности нормативных сопротивлений в строительных сталях / В кн.: Проблемы надежности в строительной механике // Материалы ко второй Всесоюзной конференции по проблемам надежности в строительной механике / Под ред. Болотина В.В. и Чираса А.А. – Вильнюс, 1968. – С. 31-64.
9. Вольберг Ю.Л., Коряков А.С. Влияние агрессивных сред на несущую способность строительных металлических конструкций. / В кн.: Долговечность строительных конструкций на Севере. – Якутск, 1981.