



УДК 624(075.8)+519.673(075.8)+51(075.8)

И.Ю. Майстренко – кандидат технических наук, ассистент
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВ НА ОСНОВАНИИ ИМИТАЦИОННОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

В работе представлена концепция оценки остаточного ресурса металлических конструкций мостов, основанная на имитационном статистическом моделировании процесса нагружения. Показана технология оценки ресурсных параметров на примере комбинации нагрузка-прочность-износ-среда, которая позволяет учитывать случайный характер изменения во времени силовых воздействий на конструкцию, прочностных свойств материала, процессов деградации расчетных элементов и индивидуальных особенностей эксплуатируемых сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Остаточный, ресурс, оценка, металлический, мост, имитация, статистический, моделирование.

I.Yu. Maystrenko – candidate of technical sciences, assistant
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

THE PREDICTION OF RESIDUAL RESOURCE OF METAL CONSTRUCTIONS OF BRIDGES ON THE BASIS OF IMITATION STATISTICAL SIMULATION OF PROCESS OF THE FREIGHTING

ABSTRACT

The conception of estimation of the residual resource of metal constructions of bridges is presented. This conception is based on the imitational statistical simulation of freighting process. The technology of estimation of resource parameters on the example of the combination of stress-strength-damage-environment is shown; this allows considering the accidental character of changes over the time in relation to force impact on construction, to mechanical properties of material, to processes of rated elements degradation, and to individual features of used constructions.

KEYWORDS: Residual, resource, estimation, metal, bridge, imitation, statistical, simulation.

Остаточный ресурс металлических конструкций мостов следует оценивать на основе анализа развития у них за время эксплуатации определяющих параметров и параметров деградации.

Определяющие параметры характеризуются случайными процессами нагружения конструкции. Например, изменение за время эксплуатации значений нормативной нагрузки и интенсивности нагружения конструкции, изменение расчетной схемы моста вследствие появления дополнительных усилий из-за геологических, гидрологических, оползневых и сейсмических явлений.

Под процессом деградации будем понимать постепенное ухудшение параметров, характеризующих физическое и напряженно-деформированное

состояние мостовых конструкций в процессе эксплуатации. К таким параметрам относятся: остаточные прогибы и деформации, скручивание, коррозионный износ и выпучивание стенки пролетных балок, явления старения и усталости металла, развитие трещиноподобных дефектов и т.п.

Учитывая, что остаточный ресурс представляет собой случайную величину, решение задачи его прогнозирования может дать содержательную оценку только в вероятностном аспекте.

Общий подход при оценке остаточного ресурса эксплуатируемой стальной конструкции состоит в разработке вероятностной модели оценки надежности элементов и доказательстве того, что в течение некоторого времени не будет достигнуто одно из



расчетных предельных состояний. Таким образом, остаточный ресурс длительно работающей стальной конструкции определяется отдельно для всех расчетных предельных состояний, а за остаточный ресурс металлоконструкции в целом принимается минимальное значение.

Выбор расчетных предельных состояний для оценки остаточного ресурса металлических конструкций должен производиться индивидуально для каждого моста. После некоторого срока эксплуатации техническое состояние элементов моста изменяется, соответственно изменяется и ресурс, но должна оставаться необходимая вероятность того, что остаточный ресурс будет выше требуемого уровня надёжности.

Запишем условие, при котором металлическая конструкция не исчерпала свой ресурс за время эксплуатации t :

$$Q_{\Omega}(t) \leq [Q(t)], \quad (1)$$

где: $Q_{\Omega}(t)$ – вероятность опасных отказов по предельному состоянию с условием Ω ; $[Q_{\Omega}(t)]$ – допустимое значение вероятности рассматриваемого отказа.

Для определения $[Q_{\Omega}(t)]$ потребуется оценить величину индекса риска от возможных последствий при отказе конструкции по этому предельному состоянию, ремонтпригодности конструкции или возможности замены расчетных элементов, вероятного характера разрушения. В рамках данной работы процедуры определения $[Q_{\Omega}(t)]$ не рассматриваются, а приняты исходя из общих требований к анализу видов, последствий и критичности отказов технических объектов всех видов, установленных ГОСТ 27.310-95 [1] и ГОСТ Р 51901.12-2007 [2].

Рассмотрим основы подхода к оценке левой части неравенства (1). Очевидно, что при решении поставленной задачи мы имеем дело с ситуацией, когда интересующие нас характеристики не являются элементарными функциями внешних характеристик модели. В этом случае представляется наиболее удобным использование метода «имитации» или «Монте-Карло» [3, 4].

Для наглядности рассмотрим процедуру выполнения имитационного статистического моделирования на примере комбинации нагрузка-прочность-износ-среда. В качестве примера выбрана сварная двутавровая главная балка разрезного пролетного строения длиной 42 м, материал конструкции – сталь 09Г2С по ГОСТ 19281-89.

Будем считать, что внешние характеристики расчетной модели установлены: начальные – из проектных решений; фактические – в ходе обследования технического состояния моста через 25, 30 и 35 лет эксплуатации.

То есть $t \in [t_1, \dots, t_i, \dots, t_j]$.

Вначале составим аналитическую модель, характеризующую изменение интенсивности нагружения конструкции во времени $W(t)$. Для этого следует использовать данные мониторинга по оценке интенсивности движения транспортных средств на данном участке автодороги, а затем выбрать наиболее подходящую прогнозную модель (графическим или расчетным путем, например, по коэффициенту детерминации [5]). Исходные данные об интенсивности движения транспортных средств за время эксплуатации моста следующие: на момент постройки – 25, через 25 лет – 45, через 30 лет – 55 и через 35 лет – 65 транспортных средств за 1 час. В нашем случае рассмотрены прогнозные модели в виде двух линейных функций (по сумме квадратов и по сумме модулей отклонений) и степенной функции. Окончательно принимаем аналитическую модель вида $w(t) = 24,967 + 0,031 \cdot t^{2,02}$.

Для определения количественных показателей коррозионных потерь расчетного сечения выполняется инструментальный контроль неразрушающими методами. Наиболее существенным является изменение толщины сечения элементов. При описании изменчивости начальных и фактических значений толщины поясов и стенки главной балки использован равномерный закон распределения случайной величины в пределах допусков на размеры проката и границ доверительных интервалов. Порядок квантиля для принятого уровня достоверности интервальной оценки составляет $t_b = 1,729$. Полученные результаты сведены в таблицу.

Силовые воздействия на конструкцию за время эксплуатации характеризуются следующими данными: проектная подвижная нагрузка А11, НК-80 [6] сохранялась в течение 34 лет с момента постройки моста, спустя 35 лет внесено изменение требований по нагрузке до А14, НК-100 [7]; среднее значение изгибающего момента от расчетной постоянной нагрузки $m_q = 8260,45 \text{ кН} \cdot \text{м}$, коэффициент вариации $n_q = 2,5\%$.

Статистические исходные данные об удельной прочности стали 09Г2С, использованной для изготовления главных балок, принимаем из результатов экспериментальных исследований, полученных в период постройки моста и представленных в работе [8]: при толщине проката 10-20 мм среднее значение предела текучести $m_T = 362,0 \text{ МПа}$, стандарт $\Delta_T = 22,5 \text{ МПа}$, коэффициент вариации $n_T = 6,2\%$.

Переходим к следующей ступени, где каждую группу случайных внешних характеристик модели j_k подвергаем регрессионному анализу [5] и выбираем



Таблица

Элемент расчетного сечения	Номинальное значение	Статистические исходные данные, мм							
		На момент ввода в эксплуатацию		Через 25 лет		Через 30 лет		Через 35 лет	
		a_i	b_i	m_i	Δ_i	m_i	Δ_i	m_i	Δ_i
Верхний пояс	14,00	13,20	14,20	12,80	0,20	12,70	0,25	12,70	0,28
Нижний пояс	20,00	19,20	20,20	19,80	0,17	19,70	0,22	19,70	0,28
Стенка	12,00	11,20	12,20	11,70	0,20	11,60	0,25	11,60	0,35

В таблице приняты обозначения: a_i и b_i – нижняя и верхняя граница равномерного распределения случайной величины; m_i и Δ_i – среднее значение и стандарт нормального распределения случайной величины.

наиболее подходящие функции регрессии, с учетом детерминированной $r_k(t)$ и случайной $e_k(t_i, b)$ составляющей:

$$f_{\pm}(j_k, t, b) = r_k(t) \pm e_k(t_i, b), \quad (2)$$

где b – заданный уровень достоверности расчетной оценки.

При построении доверительных интервалов для параметров регрессии и всего уравнения (2) в целом нам потребуется определить законы распределения соответствующих величин. Учитывая, что в общем случае для каждой точки времени t_i реализации случайной составляющей $e_k(t_i, b)$ являются асимптотически нормальными и эффективными, то есть имеющими минимальную дисперсию, расчет будем вести с помощью распределения Стьюдента с $t_j - 2$ степенями свободы [5].

Для наглядности на рис. 1 приведены результаты регрессионного анализа выборочных данных толщины верхнего горизонтального пояса главной балки j_{d1} при уровне достоверности $b = 0,90$. Здесь сплошными линиями показаны линейные функции регрессии, полученные методом наименьших квадратов, а пунктирными – регрессия степенной функцией.

Выбираем регрессию степенной функцией, в которой детерминированные составляющие прогнозной модели выразим системой уравнений (соответственно для нижней и верхней границы значений расчетного параметра):

$$\begin{cases} r_{d1,inf}(t) = 13,2 - 0,054 \cdot t^{0,693} \\ r_{d1,sup}(t) = 14,2 - 0,818 \cdot t^{0,152} \end{cases} \quad (3)$$

Регрессионный анализ силовых воздействий ведем с учетом перспективного возрастания подвижной нагрузки со временем, при этом используем уравнения взаимодействия, предусмотренные для расчета изгибаемых элементов мостов [6]. Затем полученные выборочные данные о величине изгибающих моментов от трёх основных сочетаний: АК, АК+толпа, НК [6] подвергаем статистической обработке, например, с помощью распределения Стьюдента с $j - 1$ степенями свободы [5]. На рис. 2 показаны прогнозные модели изменения силовых воздействий на пролетное строение по моменту в середине пролета от подвижной нагрузки $j_M(t)$.

На третьей ступени выбираем в качестве критерия оценки эксплуатационной надежности главной балки – вероятность разрушения растянутого нижнего пояса от действия нормальных напряжений при изгибе. В этом случае поставленная задача сводится к имитационному статистическому моделированию комбинации нагрузка-прочность-износ-среда, где факт отказа конструктивного элемента $Q(t)$ рассматривается как событие Ω , при котором имеет место превышение случайной реализации нормального напряжения в расчетном сечении $s_x|N(t)$ над случайной реализацией предела текучести стали $s_T|N(t)$ в растянутой зоне расчетного элемента:

$$\Omega \Rightarrow [s_x|N(t) > s_T|N(t)]. \quad (4)$$

В процедуре (4) $N(t) \sim w(t) \cdot \Delta t$ – число реализаций, необходимое для проведения численного статистического моделирования процесса нагружения главной балки, определяемое эквивалентно прогнозной

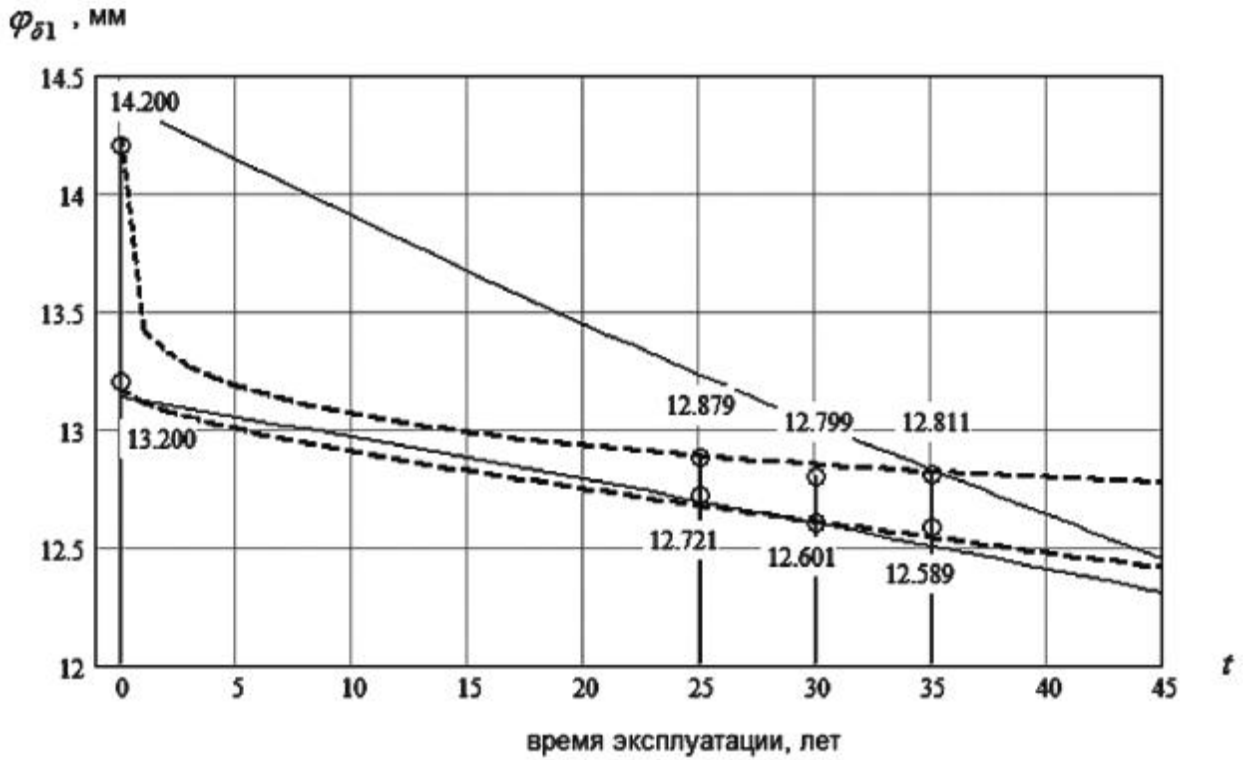


Рис. 1. Результаты регрессионного анализа и прогнозные области значений толщины верхнего горизонтального пояса главной балки

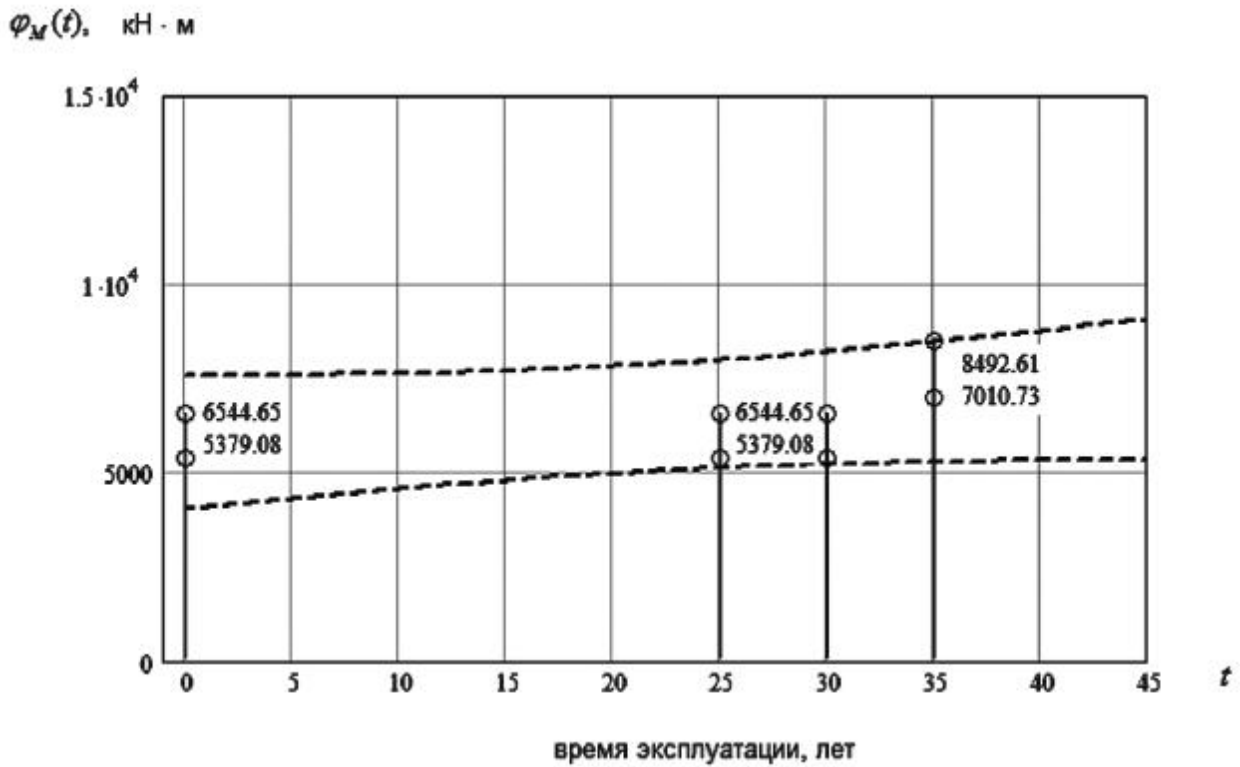


Рис. 2. Прогнозная модель изменения во времени силовых воздействий на пролетное строение (по моменту в середине пролета от подвижной нагрузки)



аналитической модели $W(t)$ и времени Δt , для которого эта процедура выполняется.

Выберем аналитические функции взаимодействия между расчетными параметрами на основе методов строительной механики с учетом требований, предъявляемых к расчету металлических конструкций мостов [6]:

$$S_x | N(t) \sim \frac{j_M(t) + j_q(t)}{j_c(t) \cdot j_w(t)} | N(t), \quad (5)$$

$$S_T | N(t) \sim j_T(t) | N(t), \quad (6)$$

где: $j_q(t) \sim f(m_q(t), \Delta_q(t))$ – функция изменения во времени изгибающего момента от действия постоянной нагрузки; $j_w(t) \sim f(j_1(t), j_2(t), \dots, j_k(t))$ – функция изменения во времени момента сопротивления сечения нетто, зависящая от прогнозных моделей соответствующих геометрических характеристик; $j_c(t)$ – функция изменения во времени параметра, учитывающего ограниченное развитие пластических деформаций в сечении; $j_T(t) \sim f(m_T(t), \Delta_T(t))$ – функция изменения во времени предела текучести стали.

Оценим вероятность того, что на промежутке времени $t \in [0; t_j]$ произойдет определенное число $n_Q(t) \in \{n_{Q,1}, \dots, n_{Q,i}, \dots, n_{Q,j}\}$ наступлений события

Ω . Будем рассматривать промежуток времени $[0; 35]$ лет, который разобьем на малые интервалы длиной по $dt = 1$ году. На каждом интервале, используя генераторы случайных чисел программной оболочки MathCAD и разработанные автором логические и аналитические программные блоки, проводим имитационный эксперимент путем численного статистического моделирования процесса нагружения.

Для вычисления вероятности отказов $Q(t)$ воспользуемся зависимостью, представленной в работе [9], где доказано, что для непрерывных распределений, то есть при $N(t) \rightarrow \infty$, выражение для определения вероятности отказа конструктивного элемента имеет вид:

$$Q(t) = \frac{n_Q(t)}{N(t)}, \quad N(t) \neq 0, \quad Q(t_{i+1}) \geq Q(t_i). \quad (7)$$

Итак, после выполнения процедуры (4) для каждого интервала dt и соответствующих вычислений по формуле (7), получим множество значений вероятности отказа $\{Q_1, \dots, Q_i, \dots, Q_j\}$, которое

определяет значения внутренних характеристик изучаемой комбинации в дискретные моменты времени $\{t_1, \dots, t_i, \dots, t_j\}$ (столбчатая диаграмма на рис. 3).

Следующая ступень оценки остаточного ресурса предусматривает описание множества значений вероятности отказа с помощью аппроксимирующих функций $f(Q_1 \pm \Delta_{Q,1}, \dots, Q_i \pm \Delta_{Q,i}, \dots, Q_j \pm \Delta_{Q,j})$, которые учитывают вероятностные отклонения $\Delta_{Q,1}, \dots, \Delta_{Q,i}, \dots, \Delta_{Q,j}$ случайных точек $Q_1, \dots, Q_i, \dots, Q_j$:

$$f(Q_1 \pm \Delta_{Q,1}, \dots, Q_i \pm \Delta_{Q,i}, \dots, Q_j \pm \Delta_{Q,j}) \approx f_Q(t, b) = \bar{Q}(t) \pm e_Q(t, b), \quad (8)$$

где: $\bar{Q}(t)$ и $e_Q(t, b)$ – соответственно детерминированная и случайная составляющие процесса отказов $Q(t)$.

Для рассматриваемого примера получены аппроксимирующие функции $f_Q(t, b)$, в которых детерминированная составляющая представлена степенной функцией $\bar{Q}(t) = 4,868 \cdot 10^{-6} + t^{7,006}$, а $e_Q(t, b)$ – характеризуется уровнем достоверности интервальной оценки b , равным 0,90 (сплошные линии на рис. 3).

Введем граничное условие для области значений вероятности отказа $[Q_\Omega(t)]$ применительно к комбинации нагрузка-прочность-износ-среда. Исходя из малой вероятности отказа, обусловленной только точностью расчета, согласно ГОСТ 27.310-95 [1] ожидаемая вероятность отказа конструктивного элемента должна находиться в пределах от 0,001 до 0,005. Тогда запишем наиболее невыгодное граничное условие $[Q_\Omega] = 0,001$, которое будет являться количественной оценкой правой части неравенства (1). Для упрощения задачи будем полагать, что $[Q_\Omega(t)] = const = [Q_\Omega]$.

С использованием полученных выше аппроксимирующих функций процесса отказов $f_Q(t, b)$ и граничного условия $[Q_\Omega]$ выполнена оценка ресурсных параметров главной балки пролетного строения моста: ресурс в целом Θ_Ω составляет 58 лет, а непосредственно остаточный ресурс $q_\Omega = \Theta_\Omega - t_j = 23$ года (рис. 4).

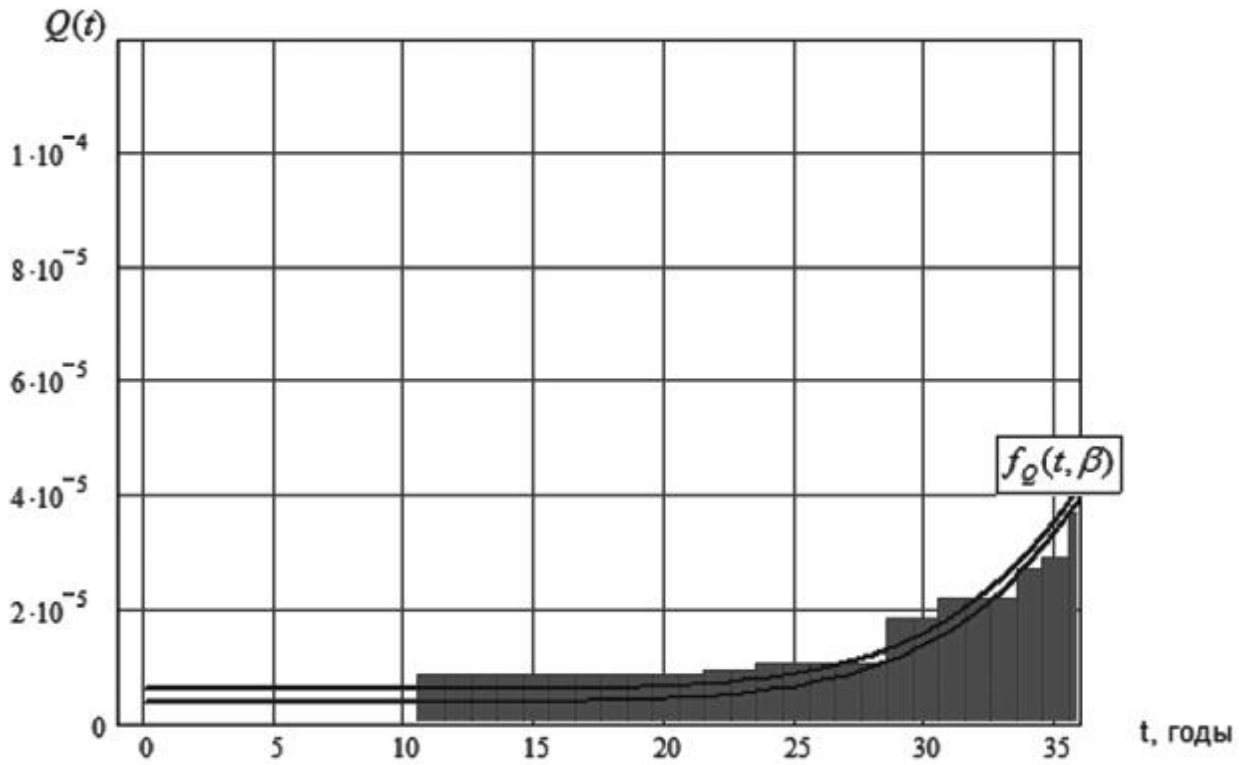


Рис. 3. Результаты численного статистического моделирования процесса нагружения главной балки

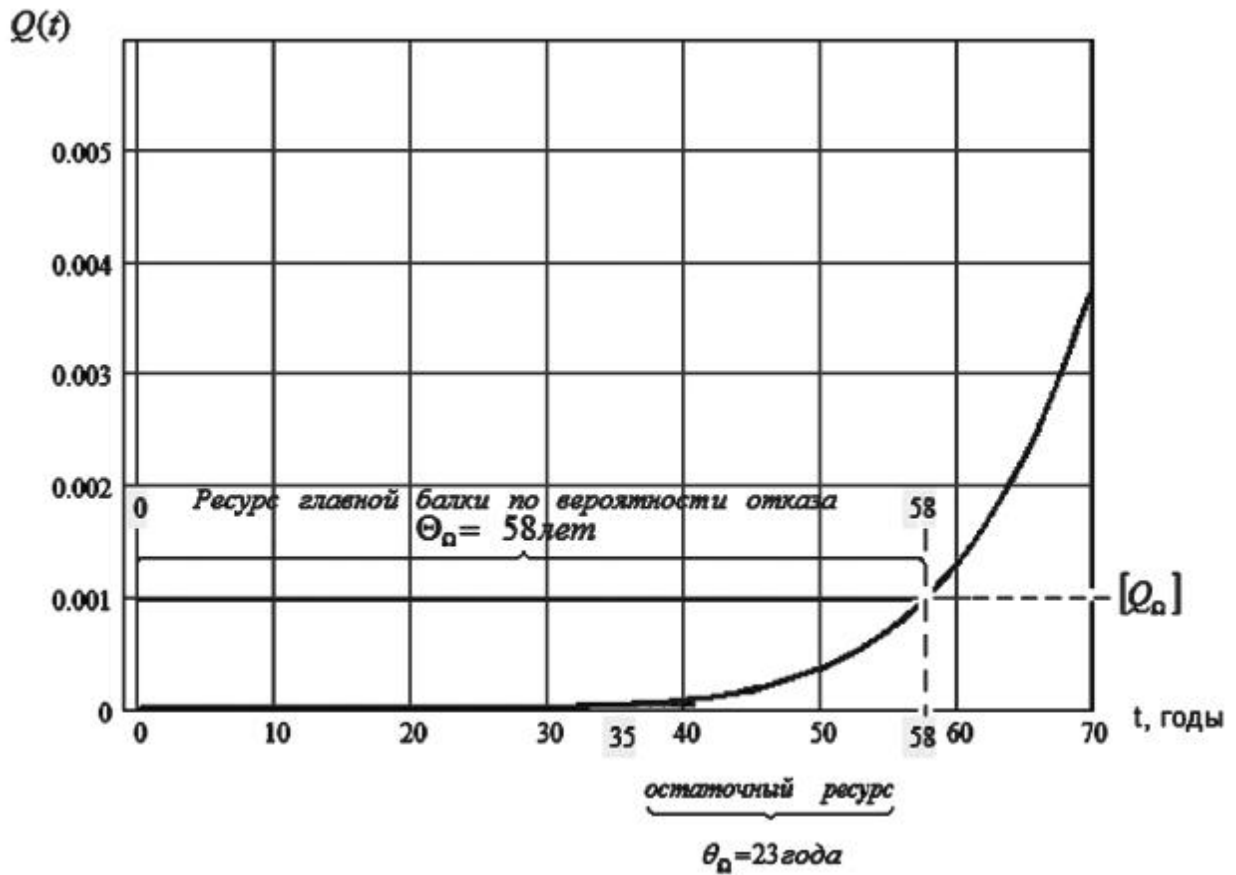


Рис. 4. Результаты оценки ресурсных параметров главной балки

**Выводы:**

1. Разработана концепция оценки остаточного ресурса металлических конструкций мостов, основанная на имитационном статистическом моделировании процесса нагружения.

2. Рассмотрен пример оценки ресурсных параметров элемента стальной конструкции для комбинации нагрузка-прочность-износ-среда. Проведенный имитационный эксперимент показал, что с вероятностью 0,90 в течение последующих 23 лет несущая способность растянутого нижнего пояса главной балки от действия нормальных напряжений при изгибе обеспечивается.

3. Представленная технология оценки остаточного ресурса, основанная на имитационном статистическом моделировании, позволяет учитывать случайный характер изменения во времени силовых воздействий на конструкцию, прочностных свойств, процессов деградации расчетных элементов и индивидуальных особенностей сооружения.

4. Допустимые вероятности опасных отказов должны быть установлены на основании комплекса расчетно-экспериментальных исследований. В общем случае для количественной оценки вероятности отказа следует использовать величину индекса риска от возможных последствий при отказе конструкции.

Литература

- ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
- ГОСТ Р 51901.12-2007 (МЭК 60812:2006). Менеджмент риска. Метод анализа риска и последствий отказов.
- Имитационное моделирование: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Ю.Н. Павловский, Н.В. Белотелов, Ю.И. Бродский. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 236 с.
- Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло: учеб. пособие для студ. вузов / Г.А. Михайлов, А.В. Войтишек. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 368 с.
- Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. – 12-е изд., перераб. – М.: Высшее образование, 2006. – 479 с.
- СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы. Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1998. – 214 с.
- ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 8 с.
- Ишменева Л.Н. Экспериментально-статистическое исследование расчетных сопротивлений сталей повышенной и высокой прочности для строительных металлических конструкций. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – М., 1978.
- Майстренко И.Ю. Оценка остаточного ресурса эксплуатируемых стальных конструкций. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – Казань, 2006.