



УДК 624(075.8)

**И.Ю. Майстренко** – кандидат технических наук, старший преподаватель

Тел.: 89053132253, e-mail: [maystr5555@mail.ru](mailto:maystr5555@mail.ru)

**А.З. Манапов** – кандидат технических наук, доцент

Тел.: 89178904302, e-mail: [man48-75@mail.ru](mailto:man48-75@mail.ru)

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

## **ОЦЕНКА РЕЗЕРВОВ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МОСТОВ С УЧЕТОМ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ**

### **АННОТАЦИЯ**

Представлена технология оценки резервов несущей способности и долговечности эксплуатируемых мостов, основанная на имитационном статистическом моделировании эксплуатационной надежности. Рассмотрены две расчетные комбинации: нагрузка – прочность – износ – среда; циклы нагрузки – усталостная прочность.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** оценка, резервы, долговечность, мост, имитация, статистический, моделирование.

**I.Yu. Maystrenko** – candidate of technical sciences, senior lecturer

Тел.: 89053132253, e-mail: [maystr5555@mail.ru](mailto:maystr5555@mail.ru)

**A.Z. Manapov** – candidate of technical sciences, associate professor

Тел.: 89178904302, e-mail: [man48-75@mail.ru](mailto:man48-75@mail.ru)

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

## **ESTIMATION OF RESERVES A LOAD-CARRYING AND DURABILITY EXPLOITED BRIDGES WITH A GLANCE FOR INDIVIDUAL FEATURES**

### **ABSTRACT**

The technology of estimation of reserves a load-carrying and durability exploited bridges is present. This technology is based on the imitational statistical simulation of the structural reliability of used constructions. Two combinations were considered: stress – strength – damage – environment; cycles of loads – fatigue strength.

**KEYWORDS:** estimation, reserves, durability, bridge, imitation, statistical, simulation.

В связи с введением в действие ГОСТ Р 52748-2007 [1] повышены требования к нагрузкам от автотранспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования. Перенаправление грузовых потоков потребует проведение оценки резервов несущей способности и долговечности мостов, находящихся на этих направлениях, с учетом тенденций роста интенсивности подвижной нагрузки.

Для решения этой задачи предлагается использовать имитационную статистическую модель оценки эксплуатационной надежности несущих элементов мостовых конструкций, на основании которой из общего числа эксплуатируемых мостов обоснованно выделить те, которые подлежат первоочередной реконструкции или усилению.

В общем виде модель процесса имитационного статистического моделирования эксплуатационной надежности представляет собой многоступенчатую технологию, которая включает:

1. Процедуру определения случайных внешних характеристик модели (начальных и изменяющихся во

времени), например, геометрических размеров конструкции с учетом допусков на размеры проката и предельных отклонений от номинальных размеров сборочных единиц, действующих нагрузок и прочностных свойств, условий эксплуатации конструкции (агрессивность среды, интенсивность воздействий подвижной нагрузки, изменение расчетной схемы моста, нестационарность режима нагруженности). Для описания внешних характеристик используются функции статистического распределения и оценка параметров с помощью доверительных интервалов.

2. Статистический анализ внешних характеристик и формирование на его основе векторных процессов, характеризующих изменение расчетных параметров во времени. При этом используется регрессионный анализ постепенного ухудшения технического состояния конструкции во времени, исходя из предположения об эволюторности поведения системы.

3. Разработку процедуры вычисления внутренних характеристик по известным внешним



характеристикам. На этой ступени определяются критерии оценки эксплуатационной надежности конструктивного элемента и выбираются аналитические функции взаимодействия между расчетными параметрами (например, на основе методов строительной механики с учетом требований, предъявляемых к расчету металлических конструкций мостов).

4. Формирование дискретной динамической системы на базе массивов случайных реализаций расчетных параметров, полученных с помощью генераторов случайных чисел, и разработка компьютерной программы для численного решения задачи, включающей блоки обработки результатов и оценки показателей надежности системы.

5. Проведение имитационного эксперимента путем численного статистического моделирования процесса нагружения, получение параметров надежности конструктивного элемента. Для компьютерного воспроизведения течения процесса нагружения применяется дискретизация имитационной модели.

6. Анализ результатов имитационного эксперимента и выявление наличия или отсутствия резервов несущей способности и долговечности.

В качестве примера выбрана сварная двутавровая главная балка пролетного строения моста, выполненного по разрезной схеме 6x21 м, находящегося в эксплуатации с 1989 года. Расчетная проектная нагрузка: А11, НК-80 [2]. Габарит моста Г-11,5+2x1. За время эксплуатации капитальный ремонт моста не проводился. В ходе обследования технического состояния моста в 2007 году проведен визуально-измерительный контроль и толщинометрия расчетных элементов. Материал несущих конструкций – сталь марки 10ХСНД по ГОСТ 6713.

Расчет главной балки по прочности по нормальным напряжениям в детерминированной постановке на повышенные нагрузки А14, НК-100 [1], показал перенапряжение расчетного сечения до 1,3 %. Расчет главной балки на выносливость, выполненный с учетом износа расчетных элементов, показал недонапряжение расчетного сечения в пределах 0,2 %.

Выполним оценку несущей способности методом имитационного статистического моделирования, предполагающего использование параметров статистического распределения исходных данных и расчетных параметров.

На первой ступени проведено описание внешних характеристик:

а) Начальные геометрические размеры сечения главной балки определены из проектных решений, при этом учтены допуски на толщину проката. Фактические геометрические размеры сечения главной балки определены путем прямых инструментальных измерений при обследовании технического состояния моста, проведенного спустя 18 лет эксплуатации. Выполнено по двадцать измерений каждого из

параметров, для которых определены границы доверительных интервалов с помощью распределения Стьюдента [3]. Уровень достоверности интервальной оценки принят равным 0,90. Учитывая, что значения геометрических размеров в пределах границ допусков и границ доверительных интервалов равновероятны, используем равномерное распределение вероятностей случайной величины в пределах этих границ.

Для расчета на выносливость определены границы варьирования параметра  $g_w$ , учитывающего случайный характер режима нагруженности автодорожного моста, концентрации напряжений в соединяемых элементах, вида соединений, длины загрузки линии влияния и асимметрии цикла переменных напряжений в расчетном сечении.

Описание изменчивости расчетного параметра  $g_w$  выполнено по равномерному закону распределения в пределах границ варьирования:

$$p(g_m) = j(0,75; 0,90).$$

б) Определение расчетного числа циклов нагружения конструктивного элемента  $N_p(t)$  и эквивалентного числа нагружений, принимаемого при расчете на выносливость  $N_3(t)$ , производим на основе статистики наблюдений за интенсивностью движения автотранспорта [4, 5].

Расчетное число циклов нагружения за время эксплуатации  $t$  определяется по формуле:

$$N_p(t) = 24 \cdot 365 \cdot t_p \cdot J(t) \cdot n_p(t), \quad (1)$$

где:  $t_p$  – расчетный промежуток времени эксплуатации, годы;  $J(t)$  – функция изменения во времени интенсивности воздействий подвижной нагрузки за 1 час;  $n_p(t)$  – функция изменения во времени числа колебательных воздействий рессорной части единицы подвижной нагрузки на пролетное строение, зависящая от расчетной схемы моста, силы инерции и силы упругости, действующих на главную балку.

На рисунке 1 приведена эмпирическая функция изменения во времени расчетного числа циклов нагружения главной балки

$$N_p(t) = 10^3 \cdot (34,7 \cdot t^{0,69} + 140,2).$$

Расчетное число циклов, принимаемое для расчета на выносливость  $N_3(t)$ , определяется по усредненным графикам загрузки пролетного строения подвижной нагрузкой (рис. 2). На графиках  $P_i$  и  $P_n$  – соответственно переменная, действующая в течение

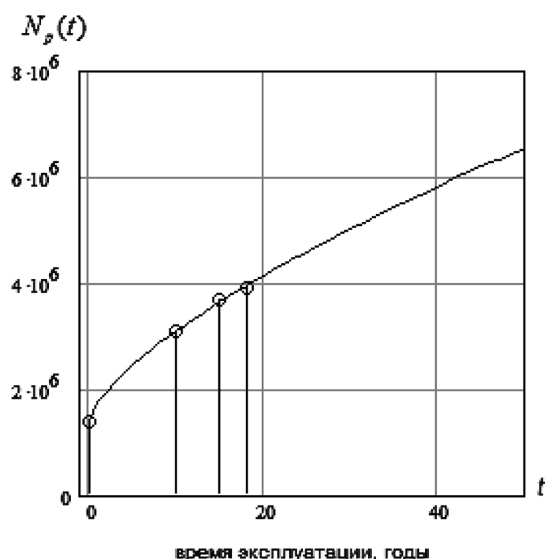


Рис. 1. Эмпирическая функция изменения во времени расчетного числа циклов нагружения главной балки

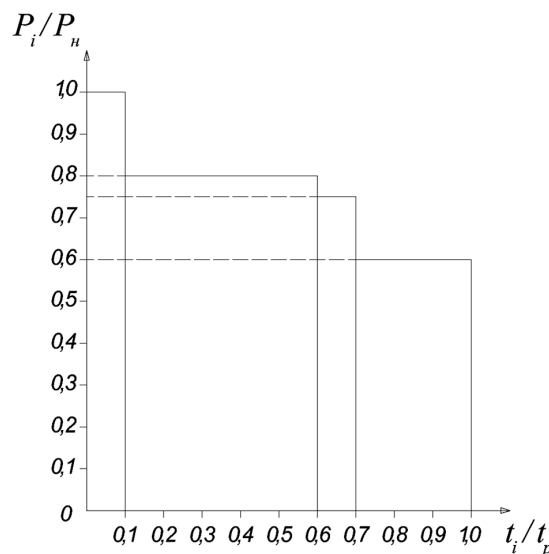


Рис. 2. График загрузки пролетного строения подвижной нагрузкой

времени  $t_i$ , и номинальная нагрузки;  $t_p$  – общее время эксплуатации конструкции.

в) В расчетах учтены постоянные нагрузки и нагрузки от автотранспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования [1, 2] с учетом изменчивости величин этих нагрузок. Для описания силовых воздействий на пролетное строение использовано нормальное распределение вероятностей случайной величины [3]. Статистические параметры внутренних усилий сведены в таблицу 1.

При расчете на выносливость произвольные законы распределения нагрузок по интервалам нагружения (см. рис. 2) приводятся к взвешенной сумме равномерных распределений.

г) Статистические характеристики стали, использованной для изготовления главной балки

приняты по экспериментальным данным, представленным в работе [6]: среднее значение предела текучести  $m_R = 44,57$  кгс/мм<sup>2</sup>, стандарт  $\Delta_R = 3,84$  кгс/мм<sup>2</sup>, коэффициент вариации  $v_R = 8,6$ .

На второй ступени расчетные параметры  $d_i$ , изменяющиеся во времени  $t$ , подвергаем регрессионному анализу (это касается, в первую очередь, уточнения элементов расчетного сечения в результате износа) и определяем поля расчетных значений, которые ограничиваются функциями регрессии верхнего и нижнего предельного отклонения. Выбор наиболее подходящих функций регрессии (отдельно для каждого параметра) выполнен методом наименьших квадратов [3]. Например, в результате регрессионного

Таблица 1

Статистические параметры внутренних усилий в главной балке

Параметр	Математическое ожидание	Стандарт
Изгибающий момент от постоянной нагрузки, $M_n$	$m_{Mn} = 1515,04$ кН·м	$\Delta_{Mn} = 75,75$ кН·м
Изгибающий момент от временной нагрузки для расчета на прочность, $M_p$	$m_{Mp} = 4188,24$ кН·м	$\Delta_{Mp} = 826,47$ кН·м
Изгибающий момент от временной нагрузки для расчета на выносливость, $M_{max,ef}$	$m_{M_{max,ef}} = 2741,43$ кН·м	$\Delta_{M_{max,ef}} = 553,86$ кН·м



анализа получена аналитическая функция, характеризующая процесс деградации расчетного сечения по моменту сопротивления сечения (нетто)

$W_n(t) = 0,025 - 8,44 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,602}$ , м<sup>3</sup>, которая использована в дальнейших расчетах.

Задаем в расчетную модель в векторной форме:

$$\vec{d}_i(t) = \begin{pmatrix} d_i(t_0) \in [\bar{d}_i(t_0); \underline{d}_i(t_0)] \\ d_i(t_1) \in [\bar{d}_i(t_1); \underline{d}_i(t_1)] \\ \dots \\ d_i(t_k) \in [\bar{d}_i(t_k); \underline{d}_i(t_k)] \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В модели (2):  $i$  – индекс расчетного параметра;  $\bar{d}_i(t_0), \bar{d}_i(t_1), \dots, \bar{d}_i(t_k)$  и  $\underline{d}_i(t_0), \underline{d}_i(t_1), \dots, \underline{d}_i(t_k)$  – верхние и нижние предельные отклонения расчетного параметра в дискретном времени  $t \in [t_0, t_1, \dots, t_k]$ .

На третьей ступени выбираем модели оценки эксплуатационной надежности для двух комбинаций:

1. Нагрузка – прочность – износ – среда;
2. Циклы нагрузки – усталостная прочность.

В выбранных моделях введем событие – факт отказа конструктивного элемента  $n_{Q,i}$ , под которым подразумевается:

§ для первой комбинации – превышение случайной реализации нормального напряжения в расчетном сечении  $S_x(N_j)$  над случайной реализацией предела текучести стали  $S_T(N_j)$  в сжатой (растянутой) зоне расчетного элемента. То есть:

$$n_{Q,1} \Rightarrow [S_x(N_j) > S_T(N_j)];$$

§ для второй комбинации – превышение случайной реализации амплитудного растягивающего (сжимающего) нормального напряжения в элементе пролетного строения  $S_{max,ef}(N_j)$  над случайной реализацией расчетного сопротивления усталости  $[S_T \cdot g_w](N_j)$ . То есть:

$$n_{Q,2} \Rightarrow [S_{max,ef}(N_j) > [S_T \cdot g_w](N_j)].$$

Число реализаций  $N(t)$ , необходимое для проведения численного статистического моделирования процесса нагружения главной балки, для соответствующих комбинаций принято равным расчетному числу циклов нагружения  $N_p(t)$  и эквивалентному числу нагружений  $N_3(t)$ .

Аналитические функции взаимодействия между расчетными параметрами определены методами

строительной механики с учетом требований, предъявляемых к расчету металлических конструкций мостов, в соответствии с типовыми расчетными схемами [1, 2].

Для проведения процедур имитационного эксперимента использована программная оболочка MathCAD со встроенными генераторами случайных чисел и разработанные авторами вычислительные и аналитические блоки обработки массивов случайных реализаций и оценки показателей надежности системы.

На четвертой ступени сформированы дискретные динамические системы на базе массивов случайных реализаций расчетных параметров и модели развивающегося во времени процесса на отрезке  $t = [0; 40]$ , лет эксплуатации.

На пятой ступени выполнена дискретизация имитационной модели с шагом  $\Delta t = 1$  год, проведено численное статистическое моделирование процесса нагружения и определены факты отказа  $n_{Q,1}$  и  $n_{Q,2}$  для соответствующих объемов выборок.

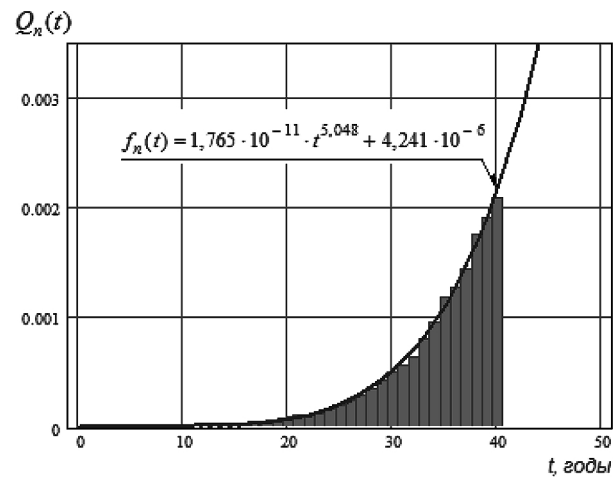


Рис. 3. Вероятность отказов для комбинации: нагрузка – прочность – износ – среда

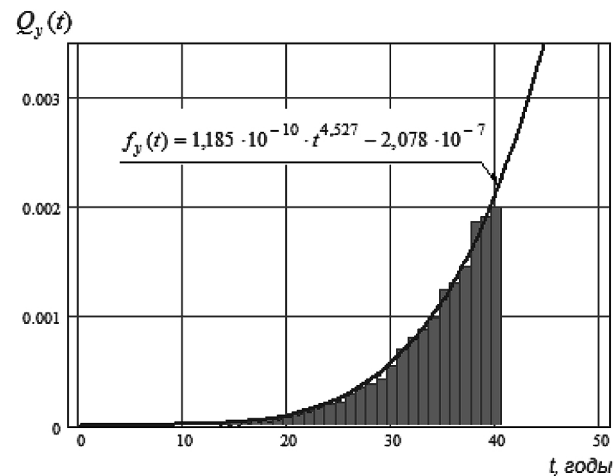


Рис. 4. Вероятность отказов для комбинации: циклы нагрузки – усталостная прочность

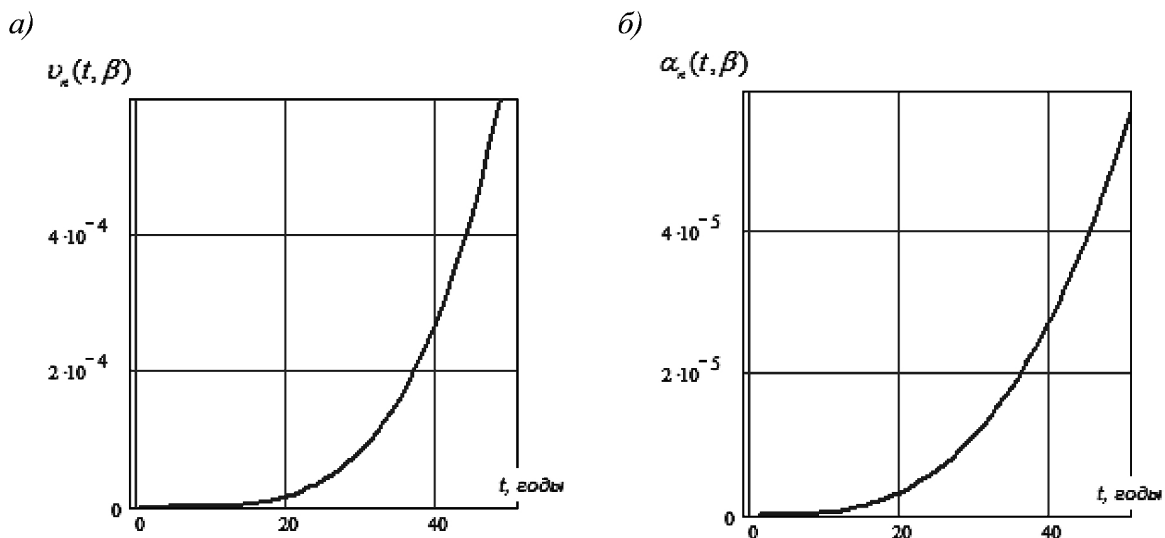


Рис. 5. Прогнозные модели показателей эксплуатационной надежности для комбинации нагрузка – прочность – износ – среда:

а) скорость нарастания отказов  $u_n(t, b)$ ; б) ускорение нарастания отказов  $a_n(t, b)$

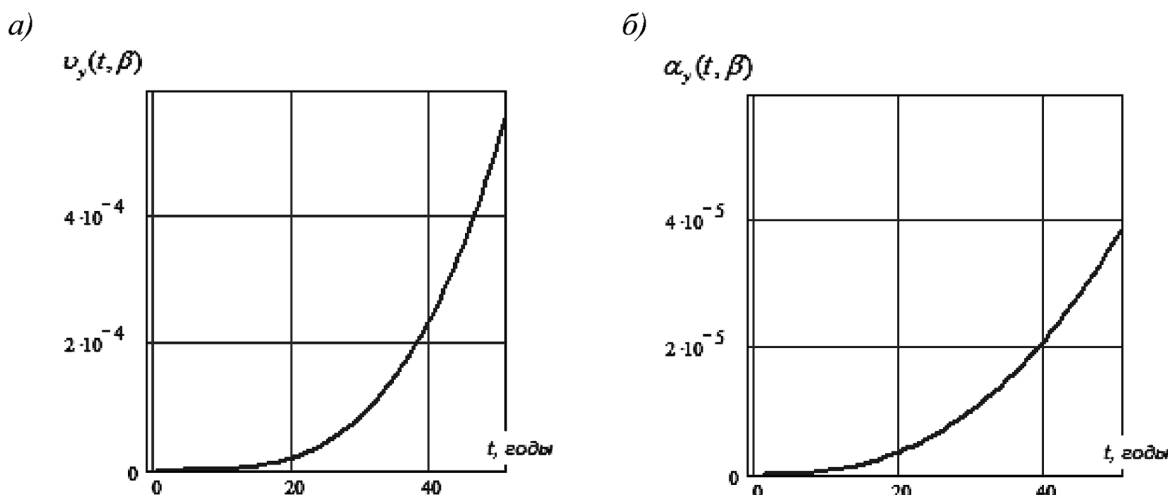


Рис. 6. Прогнозные модели показателей эксплуатационной надежности для комбинации циклы нагрузки – усталостная прочность:

а) скорость нарастания отказов  $u_y(t, b)$ ; б) ускорение нарастания отказов  $a_y(t, b)$

Определение вероятности отказа «слабых» звеньев цепи расчетного элемента, при числе статистических испытаний  $N(t) \rightarrow \infty$ , выполнено по формуле [7]:

$$Q_i(t) = \frac{n_{Q,i}|N(t)}{N(t)}, Q_i(t_k) \geq Q_i(t_{k-1}). \quad (3)$$

Используя зависимость (3), проведено статистическое моделирование вероятности отказов  $Q_n(t)$  и  $Q_y(t)$  соответственно для динамических систем: нагрузка – прочность – износ – среда; циклы нагрузки – усталостная прочность. Полученные результаты представлены в виде столбчатых диаграмм на рисунках 3 и 4.

Для сглаживания статистических рядов данных, полученных в ходе имитационного эксперимента, выбраны аппроксимирующие функции  $f_{Q,i}(Q_i(t_k), \Delta_{Q,i,k})$ , которые учитывают вероятностные отклонения  $\Delta_{Q,i,k}$  случайных точек  $Q_i(t_k)$ :

$$\begin{aligned} f_{Q,i}(Q_i(t_k), \Delta_{Q,i,k}) &\approx f_{Q,i}(t, b) = \\ &= f_i(t) \pm e_{Q,i}(t, b), \end{aligned} \quad (4)$$

где:  $f_i(t)$  и  $e_{Q,i}(t, b)$  – соответственно детерминированная и случайная составляющие процесса отказов  $Q_i(t)$ .



Таблица 2

Результаты оценки долговечности главной балки

Модель оценки	Обеспеченность, $b$	$\hat{S}$	$\hat{S} \cdot [u_i(t_0) + e_{u,i}(t_0, b)]$	$t_k$ , годы	Резерв долговечности, годы
Нагрузка – прочность – износ – среда	0,99	$10^2$	$3,913 \cdot 10^{-8}$	14	отсутствует
		$10^3$		24	6
		$10^4$		43	25
		$10^5$		77	59
	0,999	$10^2$	$5,138 \cdot 10^{-8}$	15	отсутствует
		$10^3$		26	8
		$10^4$		46	28
		$10^5$		82	64
	0,9999	$10^2$	$6,252 \cdot 10^{-8}$	16	отсутствует
		$10^3$		27	9
		$10^4$		49	31
		$10^5$		86	68
Циклы нагрузки – усталостная прочность	0,99	$10^2$	$6,328 \cdot 10^{-8}$	14	отсутствует
		$10^3$		27	9
		$10^4$		52	34
		$10^5$		101	83
	0,999	$10^2$	$8,308 \cdot 10^{-8}$	15	отсутствует
		$10^3$		29	11
		$10^4$		56	38
		$10^5$		109	91
	0,9999	$10^2$	$1,011 \cdot 10^{-7}$	16	отсутствует
		$10^3$		31	13
		$10^4$		60	42
		$10^5$		116	98

Используя аналитические функции системы MathCAD и составленные блоки статистической обработки результатов, определены аппроксимирующие функции  $f_{Q,i}(t, b)$ , в которых детерминированные составляющие представлены соответствующими степенными функциями  $f_n(t)$  и  $f_y(t)$  – сплошные линии на рисунках 3 и 4, а составляющие  $e_{Q,i}(t, b)$  – характеризуются уровнем достоверности интервальной оценки  $b$ , равным 0,99.

Выполнен прогноз изменения таких показателей эксплуатационной надежности, как скорость

нарастания отказов  $u_i(t, b) = \frac{d}{dt} f_{Q,i}(t, b)$  и

ускорение нарастания отказов  $a_i(t, b) = \frac{d^2}{dt^2} f_{Q,i}(t, b)$ .

Полученные результаты оценки  $u_i(t, b)$  и  $a_i(t, b)$  для главной балки пролетного строения моста, взятого в качестве примера, приведены на рисунках 5 и 6.



Предложенные показатели эксплуатационной надежности: скорость нарастания отказов и ускорение нарастания отказов являются более чувствительным и информативным инструментом оценки долговечности конструкции.

На шестой ступени проводим анализ результатов имитационного эксперимента с целью выявления наличия или отсутствия резервов несущей способности и долговечности. Для реализации этой ступени нам потребуется определить минимально допустимый (или требуемый) уровень надёжности элемента (или конструкции в целом).

Запишем условие, при котором обеспечивается несущая способность конструктивного элемента на отрезке времени от  $t_0$  до  $t_k$ :

$$\begin{aligned} \max u_i(t, b) &= u_i(t_k, b) + e_{u,i}(t_k, b) \leq \\ &\leq \hat{S} \cdot [u_i(t_0) + e_{u,i}(t_0, b)], \end{aligned} \quad (5)$$

$[t_0; t_k]$

где:  $\hat{S} > 0$  – нормированный диагностический признак системы, характеризующий минимально допустимый уровень надежности и целесообразность выполнения ремонтно-восстановительных работ;  $e_{u,i}(t_k, b)$  и  $e_{u,i}(t_0, b)$  – случайные составляющие прогнозной модели скорости нарастания отказов  $u_i(t, b)$ .

Руководствуясь условием (5), выполнена оценка долговечности главной балки пролетного строения моста, рассматриваемого в качестве примера, при  $t_0 = 0$ . Полученные результаты сведены в таблицу 2.

#### Выводы:

1. Рассмотрен пример оценки несущей способности и долговечности моста с учетом

индивидуальных особенностей режима эксплуатации на основании имитационного статистического моделирования процесса нагружения. Предложенный подход позволяет выполнять обоснованное ранжирование эксплуатируемых мостов по минимально допустимому уровню надежности и целесообразности выполнения ремонтно-восстановительных работ.

2. Для оценки резервов несущей способности и долговечности несущих элементов конструкций мостов предлагается использовать численные значения вероятности отказов, скорости нарастания отказов и ускорения нарастания отказов.

#### Литература

- ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения.
- СНиП 2.05.03-84\*. Мосты и трубы. Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1998. – 214 с.
- Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. – 12-е изд., перераб. – М.: Высшее образование, 2006. – 479 с.
- СТ СЭВ 4940-84. Дороги автомобильные международные. Учет интенсивности движения.
- ОДН 218.017-2003. Руководство по оценке транспортно-эксплуатационного состояния мостовых конструкций.
- Кошутин Б.Н., Уваров Б.Ю. Статистическое исследование механических свойств некоторых строительных сталей. // Сб. трудов №96 МИСИ им. В.В. Куйбышева / Под общ. ред. Е.И. Беленя. – М., 1973. – С. 13-22.
- Манапов А.З., Майстренко И.Ю. Динамические модели расчета вероятности отказов в строительных конструкциях // Материалы первой международной конференции «Оценка риска и безопасность строительных конструкций». Т.1. – Воронеж, 2006. – С. 140-142.