

УДК 625.7+519.2+519.85

Майстренко Игорь Юрьевич

кандидат технических наук, доцент

E-mail: igor_maystr@mail.ru

Зиннуров Тагир Альмирович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: leongar@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Султангирова Айназ Айратовна

инженер-проектировщик

E-mail: tyls_tyls@mail.ru

Майстренко Татьяна Игоревна

специалист по промышленной безопасности

E-mail: maystrenko1496@mail.ru

ООО Научно-производственный центр «Строй-Экспертиза»

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Калинина, д. 48, офис 506А

Статистическое моделирование доминирующих параметров транспортного потока для оценки числа расчетных циклов нагружений за период эксплуатации технической системы

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – разработать принципиальный алгоритм и основные процедуры обработки доступных статистических данных о параметрах транспортного потока на подходах к автодорожному мосту, позволяющих с заданным уровнем достоверности дать оценку приспособленности основных конструктивных элементов автодорожного моста к явлению усталости в условиях нестационарного нагружения моста подвижной нагрузкой.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в разработке концепции статистического описания системы «автомобиль-мост», включающей описание основных процедур и приемов практического использования доминирующих параметров транспортного потока в условиях ограниченности исходных параметров.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в совершенствовании и оптимизации процедур расчета стальных конструкций автодорожных мостов на выносливость.

Ключевые слова: автодорожный мост, стальная конструкция, выносливость, имитационный, статистический, моделирование, транспортный поток, доминирующий параметр.

Введение

Для сложных технических систем, работающих в условиях их нестационарного нагружения подвижной нагрузкой, с количеством циклов нагружения 10^5 и более, определяющим показателем сохранения несущей способности элементов стальных конструкций и их соединений является показатель приспособленности системы к явлению усталости. Широкий спектр теоретических разработок и натурных исследований, направленных на оптимизацию расчета стальных конструкций на выносливость [1, 2], показал, что одним из наиболее значимых факторов является количество циклов нагружений за период эксплуатации технической системы.

Разработке статистических моделей транспортного потока посвящены работы А.Г. Барченкова [3], А. Валанчюнас [4] и А.А. Изюмского, С.Л. Надирына, И.С. Сенина [5] других авторов [6, 7, 8]. При этом отмечено, что транспортные потоки отличаются своей нестационарностью в силу непрерывных изменений скорости и интервала между автомобилями, различных размеров и динамических свойств транспортных средств, влияния дорожных помех, ограждений, колонн автомобилей попутного и встречного направлений, неровностей, погодных условий и т.п., что затрудняет создание адекватной модели потока.

На современном этапе развития вычислительной техники (персональных ЭВМ, автоматизированных систем контроля и др.) и при оптимальном использовании накопленной статистической информации об основных функциональных взаимодействиях в системе «автомобиль-мост», представляется возможным модифицировать систему расчета на выносимость стальных конструкций автодорожных мостов на основе статистического моделирования доминирующих параметров транспортного потока. Процесс модификации предусматривает использование статистических входных параметров (оценок математических ожиданий и дисперсий), обладающих заданными требованиями к надежности (уровень достоверности, вероятностная мера опасности по критерию отказа, степени точности и др.), предъявляемыми к сложной технической системе на соответствующей стадии жизненного цикла.

Основные процедуры статистического моделирования доминирующих параметров транспортного потока

Для получения статистических характеристик транспортного потока, имеющих определяющее значение для последующего расчета на выносимость стальных конструкций автодорожных мостов, потребуется выполнить задачи четырех основных этапов.

Задачей первого этапа является выполнение расчета минимального объема числовых множеств, необходимого для достижения требуемого уровня достоверности доминирующих параметров. Для решения задачи первого этапа следует определиться с требуемым уровнем надежности, предъявляемым к технической системе. При этом следует учитывать общие правила назначения нормативных значений [9], допустимый уровень конструктивной безопасности системы (например, по критерию отказа), а также максимально допустимое различие между выборочным средним и генеральным средним – для достижения требуемой степени точности имитационной модели. В последующем предусматривается процедура расчета приемлемых характеристик имитационного (статистического) моделирования: приемлемый объем отдельных числовых множеств расчетных параметров и приемлемого числа прогонов имитационной модели. Одной из значимых процедур данного этапа является интегрирование в среду моделирования генераторов случайных чисел [10], обладающих статистическим соответствием законам распределения, предполагаемых к дальнейшему использованию.

Задачей второго этапа является ввод/расчет статистических характеристик входных параметров. Предусматривается ряд процедур, объем которых зависит от наличия/отсутствия достоверной статистической информации об общих параметрах, характеризующих транспортный поток, о физических характеристиках мостового сооружения, численности населения в корреспондирующих населенных пунктах (районах), об установленных объектах регулирования движения и др. Для расчета статистических оценок процесса изменчивости транспортного потока по однородному участку дороги предусматривается использование функции распределения случайной величины по закону Рэлея [10]. Для проверки адекватности выбранных моделей, генераторов, других входных параметров предусматривается выполнение пробных прогонов с последующим статистическим анализом параметров отклика.

Задачей третьего этапа является оценка числа циклов возможных нагружений путем многократных прогонов имитационной статистической модели транспортного потока с последующим выполнением доверительной оценки событий в условиях нестационарного напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов. Основные процедуры данного этапа включают: первая группа – создание с помощью генераторов случайных чисел массива псевдослучайных реализаций скорости движения транспортного потока по однородному участку дороги, расстояния между автомобилями в потоке (без столкновения); вторая группа – вычисление статистических характеристик (оценок математических ожиданий и дисперсий) числа автомобилей, которые могут одновременно находиться на расчетном отрезке, и вероятности попадания определенного числа автомобилей на расчетный отрезок при движении в свободном потоке и с учетом эффекта стеснения [2], а также моделирование числа ожидаемых событий одновременного нахождения определенного числа автомобилей на расчетном отрезке с учетом эффекта стеснения за установленный промежуток времени. Указанные выше

процедуры третьего этапа проводятся для определенной стадии жизненного цикла (времени эксплуатации) технической системы. В том случае, если плотности распределения доминирующих параметров, для которых вычислены оценки математических ожиданий и дисперсий, не будут подчиняться нормальному закону распределения случайной величины, оценку вероятностей больших отклонений предполагается проводить с помощью неравенства П.Л. Чебышева [11, 12].

Задачей четвертого этапа является проверка статистической значимости и доверительных пределов выходных параметров модели, а также соответствие имитационной модели вычислительным возможностям персональных (серийных) компьютеров и приемлемости времени, затраченного на процедуры имитационного моделирования.

Приемы практического использования процедур статистического моделирования доминирующих параметров транспортного потока

Для рассмотрения описанных выше основных процедур статистического моделирования доминирующих параметров транспортного потока, выбран объект исследования – автодорожный мост с физической длиной $L_{\Sigma} = 200$ м на дороге общего пользования категории IB по ГОСТ Р 52398-2005, соединяющий два корреспондирующих внутригородских района, расположенных в крупном населенном пункте с численностью населения более 1,2 млн. человек.

На первом этапе выполнены расчеты минимальных объемов числовых множеств, необходимых для достижения требуемого уровня достоверности доминирующих параметров: требуемый уровень достоверности β с учетом общих правил назначения нормативных значений принимался от 0,95 до 0,999; вероятностная мера опасности по критерию отказа $[Q]$ назначена от 10^{-4} до 10^{-6} ; степень точности α , учитывающая максимальное различие между выборочным средним и генеральным средним, принята равной 0,05 и 0,1.

Расчеты приемлемого объема отдельных числовых множеств N_Q расчетных параметров, требуемое число прогонов n_Q статистической модели и t – статистики (для неравенства Чебышева) выполнен по формулам:

$$N_w = \frac{\ln(1 - \beta)}{\ln(1 - [Q])}, \quad (1)$$

$$n_w = \frac{1 + \beta}{1 - \beta}, \quad (2)$$

$$t_{\alpha} = \alpha^{-1/2}. \quad (3)$$

Для интегрирования в среду моделирования алгоритма генерирования случайных величин с непрерывным равномерным распределением в интервале $[a, b]$ и распределением Вейбулла $F(x) = 1 - e^{-(x/\beta)^{\alpha}}$ с параметром формы $\alpha=2$ (распределение Релея) и масштабным параметром β – использован метод обратного преобразования:

а) Для генерирования значений случайной величины X с функцией распределения $U(a, b)$, необходимо решить уравнение: $u = F(x)$, для $0 \leq u \leq 1$, $x = F^{-1}(u) = a + (b - a)u$. Решение: генерируем $U \sim U(0, 1)$; возвращаем $X = a + (b - a)U$, здесь $(b - a)$ – константа, вычисляемая и сохраняемая заранее для использования в данном алгоритме.

б) Для генерирования значений случайной величины X с функцией распределения $Weibull(2, \beta)$, необходимо решить уравнение: $x = F^{-1}(u) = \beta[-\ln(1 - u)]^{1/2}$. Решение: генерируем $U \sim U(0, 1)$; возвращаем $X = \beta(-\ln U)^{1/2}$.

На втором этапе осуществлен ввод в среду моделирования нормированных и статистических характеристик входных параметров. На первой ступени данного этапа определены общие нормированные характеристики транспортного потока для рассматриваемой категории автомобильной дороги общего пользования – использованы нормативные требования СП 34.13330.2012: расчетной скорости движения v_{tr} , средней скорости свободного движения грузовых автотранспортных средств v_{gr} , расчетной интенсивности движения u_{tr} , числа полос движения n_{tr} и других определяющих параметров. На второй ступени, с использованием известных статистических и аналитических зависимостей транспортных потоков [3, 11], выполнены расчеты:

суммарной приведенной численности населения в корреспондирующих населенных пунктах (районах) $N_{\Sigma V}$, средней скорости движения по однородному участку дороги v_m , приведенной длины мостового сооружения L_{ef} , параметров изменчивости размеров автотранспорта l_{tr} , плотности движения транспортного потока d_{tr} :

$$N_{SV} = N_{V, \min} \times \frac{N_{V, \max}}{N_{V, \min}} \times \frac{v_m}{v_{gr}} + 2 \times \frac{v_m}{v_{gr}} \quad (4)$$

где $N_{V, \min}$, $N_{V, \max}$ – наименьшая и наибольшая численность населения в корреспондирующих районах соответственно по результатам статистических исследований;

$$v_{\mu} = v_{gr} \cdot d_R \cdot d_V, \quad (5)$$

где d_R , d_V – показатели снижения скорости движения вследствие наличия объектов регулирования движения и обращения внутреннего транспорта в населенном пункте соответственно [3];

$$L_{ef} = L_s \times \frac{1}{d_R \times d_V} \times \frac{v_m^{0,4}}{v_{gr}^{0,4}}, \quad (6)$$

$$l_{tr} \sim f(\mu_{tr}, D_{tr}), \quad (7)$$

где μ_{tr} , D_{tr} – оценки математических ожиданий и дисперсий параметров изменчивости размеров автотранспорта.

На следующей ступени второго этапа выполнен расчет статистических оценок процесса изменчивости скорости движения транспортного потока по однородному участку объекта исследования: мода $u_s = \frac{u_m}{\sqrt{p/2}} = 44,076 \text{ км/ч}$; медиана

$u_d = u_s \sqrt{\ln(4)} = 51,895 \text{ км/ч}$; стандарт $u_D = \sqrt{u_s^2 (2 - p/2)} = 28,876 \text{ км/ч}$.

Пробные прогоны и статистический анализ параметров отклика моделей, генераторов и других входных параметров показали приемлемость использования генераторов случайных чисел, интегрированных в среду вычислительной системы MathCad, в соответствии с требуемой точностью и ожидаемой трудоемкостью задачи исследования.

На третьем этапе проведены основные процедуры данного этапа, описанные выше, для входных параметров, соответствующих определенному времени эксплуатации технической системы: по истечении 6, 8 и 10 лет с начала эксплуатации в проектном режиме. Фрагменты прогонов имитационной статистической модели транспортного потока для рассматриваемого объекта исследования показаны на рис. 1.

Для имитационного моделирования и оценки числа ожидаемых событий l_j одновременного нахождения j автомобилей на расчетном отрезке с учетом эффекта стеснения за $t = 1$ час, (рис. 2), использована гипотеза закона распределения – стационарного пуассоновского потока событий, а также функций взаимодействия расчетных параметров, предложенных в работе [3]. Применительно к рассмотренной имитационной модели, с учетом дискретно-переменной интенсивности и скорости движения автомобилей во времени на расчетном участке и усеченного закона Пуассона, корректирующего стеснение транспортного потока, для множества возможных загрузок моста автомобилями, обусловленного принятым объемом отдельных числовых множеств N_Q расчетных параметров и числом прогонов n_Q статистической модели, можно записать:

$$l_j(N_i, n_k) = P_{tr,c}(N_i) \times n_{tr,c}(N_i) | n_k, \quad (8)$$

где $P_{tr}(N_i)$ – массив случайных реализаций $N_i = 1 \dots N_Q$ вероятности попадания j автомобилей ($j \neq 0$) на расчетный отрезок с учетом коррекции на стеснение;

$n_{tr,c}(N_j)$ – массив случайных реализаций числа возможных загрузок расчетного отрезка автомобилями за промежуток времени $t = 1$ час с учетом эффекта стеснения;

$n_k = 1 \dots n_Q$.

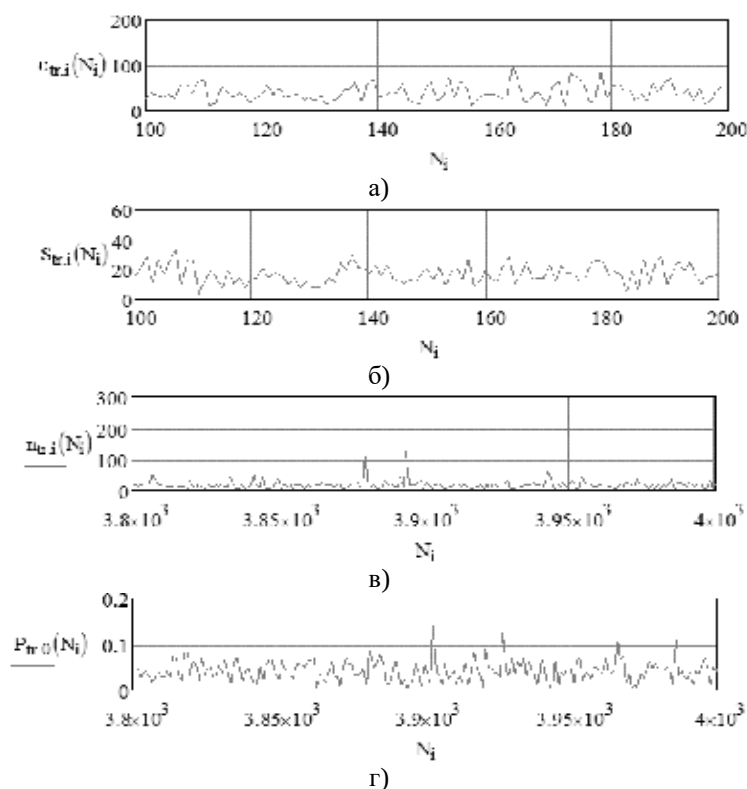


Рис. 1. Фрагменты прогонов имитационной статистической модели транспортного потока. Массивы псевдослучайных реализаций: а) скорости движения транспортного потока;

б) расстояния между автомобилями в потоке (столкновение исключается);
 в) числа автомобилей, которые могут одновременно находиться на расчетном отрезке при движении в свободном потоке;
 г) вероятности попадания j автомобилей на расчетный отрезок при движении в свободном потоке (обгон автомобилей на мосту исключается, влияние соседних и встречных колонн не учитывается)

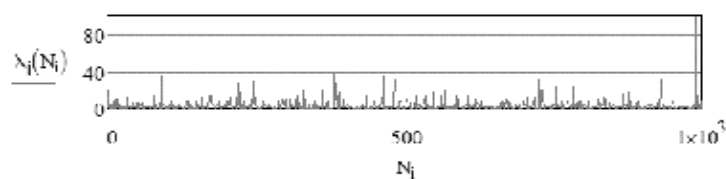


Рис. 2. Фрагменты прогонов имитационной статистической модели для получения числа ожидаемых событий одновременного нахождения j автомобилей на расчетном отрезке за промежуток времени $t = 1$ час с учетом эффекта стеснения

С использованием аналитической модели взаимодействия между расчетными параметрами, выраженной формулой (8), проведен комплекс имитационных экспериментов с целью выявления изменчивости событий одновременного нахождения j автомобилей на расчетном отрезке с учетом эффекта стеснения за 1 час – в качестве выходных характеристик использованы оценки математических ожиданий $\bar{m}_j$ и дисперсий S_j , вычисленных по формулам:

$$\bar{m}_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_w} \sum_{k=1}^{n_w} a_i a_k \lambda_j(N_i, n_k)}{N_w \times n_w}, \quad (9)$$

$$\bar{S}_l = \frac{\sum_{i=1}^{N_W} \sum_{k=1}^{n_W} (\bar{m}_l - l_j(N_i, n_k))^2}{N_W \times n_W}. \quad (10)$$

Вычисление выходных статистических характеристик модели проводилось по формулам (9) и (10) для различных уровней достоверности β и меры опасности по критерию отказа $[Q]$, при этом использованы достоверные статистические данные по численности населения в корреспондирующих населенных пунктах (районах) в соответствующие моменты времени эксплуатации технической системы.

Таблица 1

**Результаты комплекса имитационных экспериментов
по оценке статистических характеристик числа расчетных циклов нагружений
объекта исследования**

b	[Q]	N_W / n_W	$N_{V,\min} / N_{V,\max}$	$l_j(N_i, n_k)$		t_i , час	t_k , час
				m_l	S_l		
0,950	$1 \cdot 10^{-4}$	29956 / 39	85451 / 131096 ^[1]	3,689	31,492	0,03	1,17
	$1 \cdot 10^{-5}$	299572 / 39		2,494	14,981	0,23	8,97
	$1 \cdot 10^{-6}$	2995731 / 39		2,456	14,415	2,92	113,88
	$1 \cdot 10^{-4}$	29956 / 39	87183 / 131338 ^[2]	3,694	31,612	0,03	1,17
	$1 \cdot 10^{-5}$	299572 / 39		2,622	17,105	0,23	8,97
	$1 \cdot 10^{-6}$	2995731 / 39		2,457	14,525	2,93	114,27
	$1 \cdot 10^{-4}$	29956 / 39	88293 / 132074 ^[3]	3,705	32,099	0,03	1,17
	$1 \cdot 10^{-5}$	299572 / 39		2,863	19,583	0,24	9,36
	$1 \cdot 10^{-6}$	2995731 / 39		2,459	14,914	2,95	115,05
0,990	$1 \cdot 10^{-4}$	46049 / 199	85451 / 131096 ^[1]	3,435	28,202	0,05	9,95
	$1 \cdot 10^{-5}$	460515 / 199		2,864	19,586	0,37	73,63
	$1 \cdot 10^{-6}$	4605168 / 199		1,913	8,777	4,79	953,21
	$1 \cdot 10^{-4}$	46049 / 199	87183 / 131338 ^[2]	3,478	28,448	0,05	9,95
	$1 \cdot 10^{-5}$	460515 / 199		2,904	19,874	0,38	75,62
	$1 \cdot 10^{-6}$	4605168 / 199		2,129	10,863	4,80	955,20
	$1 \cdot 10^{-4}$	46049 / 199	88293 / 132074 ^[3]	3,523	28,955	0,05	9,95
	$1 \cdot 10^{-5}$	460515 / 199		2,953	20,111	0,40	79,60
	$1 \cdot 10^{-6}$	4605168 / 199		2,397	13,777	4,83	961,17
0,995	$1 \cdot 10^{-4}$	52981 / 399	85451 / 131096 ^[1]	2,912	20,279	0,05	9,95
	$1 \cdot 10^{-5}$	529829 / 399		2,679	17,269	0,46	183,94
	$1 \cdot 10^{-6}$	5298315 / 399		2,378	13,558	5,30	2114,70
	$1 \cdot 10^{-4}$	52981 / 399	87183 / 131338 ^[2]	3,108	22,032	0,05	9,95
	$1 \cdot 10^{-5}$	529829 / 399		2,707	18,002	0,47	187,53
	$1 \cdot 10^{-6}$	5298315 / 399		2,381	13,664	5,32	2122,68
	$1 \cdot 10^{-4}$	52981 / 399	88293 / 132074 ^[3]	3,215	24,388	0,05	9,95
	$1 \cdot 10^{-5}$	529829 / 399		2,855	19,589	0,48	191,52
	$1 \cdot 10^{-6}$	5298315 / 399		2,398	13,800	5,38	2146,62
0,999	$1 \cdot 10^{-4}$	69074 / 1999	85451 / 131096 ^[1]	3,091	22,768	0,05	99,95
	$1 \cdot 10^{-5}$	690772 / 1999		2,419	14,090	0,63	1259,37
	$1 \cdot 10^{-6}$	6907752 / 1999		2,375	13,514	6,25	12493,75
	$1 \cdot 10^{-4}$	69074 / 1999	87183 / 131338 ^[2]	3,116	23,307	0,05	99,95
	$1 \cdot 10^{-5}$	690772 / 1999		2,442	14,109	0,64	1279,36
	$1 \cdot 10^{-6}$	6907752 / 1999		2,430	13,715	6,29	12573,71
	$1 \cdot 10^{-4}$	69074 / 1999	88293 / 132074 ^[3]	3,200	24,823	0,05	99,95
	$1 \cdot 10^{-5}$	690772 / 1999		2,465	14,323	0,65	1299,35
	$1 \cdot 10^{-6}$	6907752 / 1999		2,415	13,925	6,35	12693,65

Примечания: ^[1], ^[2], ^[3] – численность населения по истечении 6, 8 и 10 лет с начала эксплуатации соответственно.

В качестве меры трудоемкости использован показатели времени, затраченные на один прогон имитационной модели t_i и на всю группу плана t_k , при этом использовался

персональный (серийный) компьютер с процессором Intel®Core™ i7-4770, ОЗУ 16,0 ГБ. Результаты проведенного комплекса имитационных экспериментов приведены в табл. 1.

Полученные результаты комплекса имитационных экспериментов, представленные в табл. 1, показали, что при выборе плана эксперимента его трудоемкость может оказать решающее значение наряду с уровнем требований, предъявляемых к надежности технической системы на соответствующей стадии её жизненного цикла. Оптимальными входными показателями плана эксперимента ($t_k < 200$ ч) для рассматриваемого объекта исследования, относящегося к высоконадежным техническим системам ($\beta \geq 0,95$, $[Q] \leq 1 \cdot 10^{-5}$), можно считать сочетания требований: первое – $\beta = 0,95$, $[Q] = 1 \cdot 10^{-6}$; второе – $\beta = 0,99$, $[Q] = 1 \cdot 10^{-5}$; третье – $\beta = 0,995$, $[Q] = 1 \cdot 10^{-5}$. Для выбранных оптимальных сочетаний проследим изменчивость (табл. 2) числа расчетных циклов нагружений $l_j(N_i, n_k)$ за период эксплуатации технической системы с использованием оценок $\bar{m}_l$ и $\bar{S}_l$, вероятностной меры опасности по критерию отказа $[Q]$ и степени точности α :

$$l_j(N_i, n_k) | t_Q \sim F[l_{b,[Q],a}^{\inf}; l_{b,[Q],a}^{\sup}] | t_Q, \quad (11)$$

где $l_{b,[Q],a}^{\inf} = \bar{m}_l - t_a \times \sqrt{\bar{S}_l}$ и $l_{b,[Q],a}^{\sup} = \bar{m}_l + t_a \times \sqrt{\bar{S}_l}$ – соответственно нижняя и верхняя граница доверительного интервала, покрывающего неизвестный параметр (число событий одновременного нахождения j автомобилей на расчетном отрезке с учетом эффекта стеснения) в соответствующий момент времени эксплуатации технической системы t_Q .

Анализ выходных данных табл. 2 показал, что рассмотренные планы имитационных моделей по сочетаниям 1, 2 и 3 имеют логичные результаты, не противоречащих физическому смыслу процесса функционирования технической системы в условиях роста интенсивности транспортного потока. При этом имеется возможность дать оценку приращения выходной функции числа событий одновременного нахождения j автомобилей на расчетном отрезке с учетом эффекта стеснения, в зависимости от приращения аргумента – времени эксплуатации технической системы.

Таблица 2

Изменчивость числа расчетных циклов нагружений за период эксплуатации системы

План сочетаний $\beta, [Q]$	$\frac{a}{t_a}$	t_Q , годы	$l_j(N_i, n_k)$		$l_{b,[Q],a}^{\inf}$	$l_{b,[Q],a}^{\sup}$
			$\bar{m}_l$	$\bar{S}_l$		
Сочетание 1: $\beta = 0,95$, $[Q] = 1 \cdot 10^{-6}$	$\frac{0,10}{3,162}$	6	2,456	14,415	0	14,461
		8	2,457	14,525	0	14,508
		10	2,459	14,914	0	14,670
	$\frac{0,05}{4,472}$	6	2,456	14,415	0	19,435
		8	2,457	14,525	0	19,501
		10	2,459	14,914	0	19,729
Сочетание 2: $\beta = 0,99$, $[Q] = 1 \cdot 10^{-5}$	$\frac{0,10}{3,162}$	6	2,864	19,586	0	16,858
		8	2,904	19,874	0	17,000
		10	2,953	20,111	0	17,133
	$\frac{0,05}{4,472}$	6	2,864	19,586	0	22,655
		8	2,904	19,874	0	22,840
		10	2,953	20,111	0	23,008
Сочетание 3: $\beta = 0,995$, $[Q] = 1 \cdot 10^{-5}$	$\frac{0,10}{3,162}$	6	2,679	17,269	0	15,819
		8	2,707	18,002	0	16,123
		10	2,855	19,589	0	16,850
	$\frac{0,05}{4,472}$	6	2,679	17,269	0	21,263
		8	2,707	18,002	0	21,681
		10	2,855	19,589	0	22,648

Выполним обработку полученных выходных данных с целью проведения относительного сравнения альтернативных конфигураций системы (сочетания 1, 2 и 3).

Сравнение выполняется посредством регрессионного анализа выборок параметров отклика, полученных в соответствующих точках времени эксплуатации технической системы t_q по верхней границе доверительного интервала $I_{b,[Q],a}^{\sup}$. Результаты регрессионного анализа представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты регрессионного анализа выборок параметров отклика, полученных в соответствующих точках времени эксплуатации технической системы

План сочетаний	Степень точности	Уравнение регрессии	Индексы корреляции детерминации	Средняя ошибка аппроксимации, %
Сочетание 1: $\beta = 0,95$, $[Q] = 1 \cdot 10^{-6}$	0,05	линейная $\hat{y} = 0,0735 \cdot x + 18,967$	$\frac{0,9529}{0,9081}$	0,1842
		степенная $\hat{y} = 18,4384 \cdot x^{0,0286}$	$\frac{0,9291}{0,8633}$	0,2240
		показательная $\hat{y} = 18,9761 \cdot 1,0038^x$	$\frac{0,9536}{0,9093}$	0,1830
		экспоненциальная $\hat{y} = e^{2,9432 + 0,0038 \cdot x}$	$\frac{0,9536}{0,9093}$	0,1830
	0,10	линейная $\hat{y} = 0,0522 \cdot x + 14,1283$	$\frac{0,9531}{0,9083}$	0,1758
		степенная $\hat{y} = 13,7515 \cdot x^{0,0273}$	$\frac{0,9292}{0,8635}$	0,2139
		показательная $\hat{y} = 14,1345 \cdot 1,0036^x$	$\frac{0,9537}{0,9095}$	0,1747
		экспоненциальная $\hat{y} = e^{2,6486 + 0,0036 \cdot x}$	$\frac{0,9537}{0,9095}$	0,1747
Сочетание 2: $\beta = 0,99$, $[Q] = 1 \cdot 10^{-5}$	0,05	линейная $\hat{y} = 0,0882 \cdot x + 22,1283$	$\frac{0,9996}{0,9992}$	0,0165
		степенная $\hat{y} = 21,4591 \cdot x^{0,0302}$	$\frac{0,9991}{0,9982}$	0,0254
		показательная $\hat{y} = 22,1386 \cdot 1,0039^x$	$\frac{0,9995}{0,9991}$	0,0179
		экспоненциальная $\hat{y} = e^{3,0973 + 0,0039 \cdot x}$	$\frac{0,9995}{0,9991}$	0,0179
	0,10	линейная $\hat{y} = 0,0687 \cdot x + 16,447$	$\frac{0,9998}{0,9996}$	0,0118
		степенная $\hat{y} = 15,9279 \cdot x^{0,0316}$	$\frac{0,9987}{0,9973}$	0,0320
		показательная $\hat{y} = 16,4554 \cdot 1,0041^x$	$\frac{0,9998}{0,9995}$	0,0132
		экспоненциальная $\hat{y} = e^{2,8007 + 0,004 \cdot x}$	$\frac{0,9998}{0,9995}$	0,0132
Сочетание 3: $\beta = 0,995$, $[Q] = 1 \cdot 10^{-5}$	0,05	линейная $\hat{y} = 0,3462 \cdot x + 19,094$	$\frac{0,9748}{0,9502}$	0,5595
		степенная $\hat{y} = 17,0423 \cdot x^{0,1209}$	$\frac{0,9585}{0,9187}$	0,7114
		показательная $\hat{y} = 19,2649 \cdot 1,0159^x$	$\frac{0,9768}{0,9541}$	0,5376
		экспоненциальная $\hat{y} = e^{2,9583 + 0,0158 \cdot x}$	$\frac{0,9768}{0,9541}$	0,5376
	0,10	линейная $\hat{y} = 0,2577 \cdot x + 14,202$	$\frac{0,9731}{0,9469}$	0,5795
		степенная $\hat{y} = 12,6773 \cdot x^{0,1209}$	$\frac{0,9563}{0,9145}$	0,7315
		показательная $\hat{y} = 14,3296 \cdot 1,0159^x$	$\frac{0,9751}{0,9508}$	0,5577
		экспоненциальная $\hat{y} = e^{2,6623 + 0,0158 \cdot x}$	$\frac{0,9751}{0,9508}$	0,5577

Заключение

1. Сравнительный регрессионный анализ альтернативных конфигураций системы и выборок параметров отклика, полученных в соответствующих точках времени эксплуатации технической системы, показал, что для выбранного объекта исследования наиболее оптимальным оказался план имитационной модели, предусматривающей основные функциональные взаимодействия в системе «автомобиль-мост» при уровне достоверности 0,99, степени точности 0,1 и вероятностной меры опасности по критерию отказа на уровне $1 \cdot 10^{-5}$.

2. Проведенное исследование позволило апробировать на конкретном примере концепцию статистического описания системы «автомобиль-мост», включающей основные процедуры и приемы практического использования доминирующих параметров транспортного потока в условиях ограниченности исходных данных.

3. Полученные результаты позволяют оптимизировать процессы оценки числа расчетных циклов нагружений за период эксплуатации технической системы, что, в свою очередь, позволяет оптимизировать процедуры расчета стальных конструкций на выносливость для соответствующей стадии её жизненного цикла.

Список библиографических ссылок

1. Манапов А. З. Расчет надежности и ресурса строительных конструкций методом статистического моделирования. Казань : КГАСУ, 2010. 131 с.
2. Мыщик В. С. Анализ методов расчета на выносливость элементов проезжей части стальных автодорожных мостов. М.: ОАО ЦНИИС, 2007. Вып. 238. С. 24–34.
3. Барченков А. Г. Динамический расчет автодорожных мостов. М. : Транспорт, 1976. 199 с.
4. Valinevicius A., Balsys K., Eidukas B. Imitation model of traffic // Electronics and electrical engineering. Kaunas : technologija. 2011. № 6 (112). P. 65–68.
5. Изюмский А. А., Надирян С. Л., Сенин И. С. Применение имитационного моделирования в сфере моделирования транспортных потоков // Наука. Техника. Технология (Политехнический вестник). 2016. № 1. С. 52–54.
6. Treiber M., Kesting A. Traffic Flow Dynamics. Data, Models and Simulation. Springer, 2013. 506 p.
7. Elefteriadou L. An Introduction to Traffic Flow Theory. Springer Science+Business Media New York, 2014. 251 p.
8. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiyatullin M. H., Makhmutov M. M. Risk management model in road transport systems // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 738. № 1. P. 1–10.
9. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1994. 288 с.
10. Кельтон В. Д., Лоу А. М. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. СПб. : Питер, 2004. 847 с.
11. Майстренко И. Ю. Оценка выносливости элементов стальных конструкций автодорожных мостов на основе метода имитационного статистического моделирования // Известия КГАСУ, 2013. № 3 (25). С. 115–124.
12. Димов Э. М., Маслов О. Н., Трошин Ю.В. Снижение неопределенности выбора управленческих решений с помощью метода статистического имитационного моделирования // Информационные технологии. 2014. № 6. С. 51–57.

Maystrenko Igor Iurevich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: igor_maystr@mail.ru**Zinnurov Tagir Almirovich**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: leongar@mail.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Sultangirova Ainaz Airatovna

project engineer

E-mail: tyls_tyls@mail.ru**Maystrenko Tatiana Igorevna**

specialist on industrial safety

E-mail: maystrenko1496@mail.ru**LTD Scientific and production center «Stroy-Expertiza»**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Kalinina st., 48, off., 506A

**Statistical modeling of the transport stream dominant parameters
for estimating the number of design load cycles
for the period of the technical system operation**

Abstract

Problem statement. The purpose of the study is to develop a basic algorithm and basic procedures for processing available statistical data on the parameters of the transport flow on approaches to the road bridge, which allow assessing the fitness of the main structural elements of the road bridge to the fatigue phenomenon under conditions of unsteady loading of the bridge by a mobile load.

Results. The main results of the research consist in the development of the "car-bridge" system statistical description concept, which includes a description of the basic procedures and techniques for the practical use of the transport stream dominant parameters in conditions of limited initial parameters.

Conclusions. The results significance obtained for the design of road bridges is to improve and optimize the procedures for calculating steel structures for endurance.

Keywords: road bridge, steel construction, endurance, imitation, statistical, modeling, traffic flow, dominant parameter.

References

1. Manapov A. Z. Calculation of reliability and life of building structures by statistical modeling. Kazan : KGASU, 2010. 131 p.
2. Mytcik V. S. Analysis of methods for calculating the endurance of elements of the carriageway of steel road bridges. M. : JSC CKIIS, 2007. Vol. 238. P. 24–34.
3. Barchenkov A. G. Dynamic calculation of road bridges. M. : Transport, 1976. 199 p.
4. Valinevicius A., Balsys K., Eidukas B. Imitation model of traffic // Electronics and electrical engineering. Kaunas : technologija. 2011. № 6 (112). P. 65–68.
5. Iziumskii A. A., Nadirian S. L., Senin I. S. The use of simulation modeling in the field of modeling traffic flows // Nauka. Tehnika. Tehnologija (Politehnichskii vestnik). 2016. № 1. P. 52–54.

6. Treiber M., Kesting A. Traffic Flow Dynamics. Data, Models and Simulation. Springer, 2013. 506 p.
7. Elefteriadou L. An Introduction to Traffic Flow Theory. Springer Science+Business Media New York, 2014. 251 p.
8. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiyatullin M. H., Makhmutov M. M. Risk management model in road transport systems // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 738. № 1. P. 1–10.
9. Shpete G. Reliability of load-bearing building structures. M.: Stroiisdat, 1994. 288 p.
10. Kelton V. D., Loy A. M. Imitation modeling. Classika CS. 3-rd vol. SPb. : Piter, 2004. 847 p.
11. Maystrenko I. Y. Estimation of endurance of elements of steel structures of road bridges on the basis of the method of simulation statistical modeling // Izvestia KGASU № 3 (25), 2013. P. 115–124.
12. Dimov Ia. M., Maslov O. N., Troshin Y. V. Reduction of uncertainty in the choice of management decisions using the method of statistical simulation // Informacionnyeologii. № 6. 2014. P 51–57.