



Майстренко И.Ю., Юсупов И.И., Зиннуров Т.А.

АНАЛИЗ ПРОЕКТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ УЗЛОВ АРОЧНОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ ПЕШЕХОДНОГО ПУТЕПРОВОДА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННЫХ И ИМИТАЦИОННЫХ МЕТОДОВ

В данной работе рассматривается анализ проектной надежности узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» в пролетном строении проектируемого пешеходного путепровода. При оценке надежности, потребовалось выполнение ряда отдельных процедур имитационного эксперимента, который включает в себя пять основных ступеней. Критерием принятия решения об отказе являлось исчерпание удельной прочности в одном из элементов ответственного узла «арка – затяжка – домкратная балка».

Ключевые слова: проектная надёжность, имитационный эксперимент, пешеходный путепровод, нагрузки, доверительные интервалы.

Введение

Уровень надежности конструктивной системы обычно выбирается на стадии концепции и формирования требований к продукции. При проектировании мостовых конструкций в черте крупных городов конструирование, как правило, ведут с учетом создания архитектурной выразительности сооружений, что неизбежно приводит к намеренному усложнению узлов сопряжений отдельных элементов. Это обстоятельство влечет необходимость всестороннего обоснования принятых проектных решений, так как ошибочные конструктивные решения могут приводить к катастрофическим последствиям с большим числом пострадавших.

В данной работе приведены результаты анализа надежности на стадии компоновки ответственного узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» в пролетном строении пешеходного путепровода на дороге I-ой технической категории в Московской области. По конструктивному решению пролетная часть пешеходного перехода выполнена в виде однопролетной наклонной арки переменного коробчатого сечения размером от 1600x500 мм до 1000x500 мм с подвесками из трубы $\varnothing 203 \times 10$ мм, в поперечном сечении две плоскости арок имеют наклон внутрь на 14 градусов к вертикали, домкратная балка коробчатого сечения размером 750x1000 мм. Длина арочного пролета пешеходного перехода составляет 77 м, ширина проходной части 4 м. Для изготовления конструктивных элементов узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» используется сталь 15ХСНД по ГОСТ 6713. Проектный срок службы сооружения не менее 100 лет.

Для анализа проектной надежности узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» в пролетном строении проектируемого пешеходного путепровода потребовалось выполнение ряда отдельных процедур, включающих пять основных ступеней.

На **первой ступени**, с использованием детерминированных характеристик входных параметров, выполнена оценка ожидаемых границ изменчивости нагрузок на основе метода доверительных интервалов с надежностью $\beta = 0,995$. Статистические характеристики отдельных компонент нагрузок получены на основе статистической информации, обобщенной в работах [1, 2], и общих правил применения нормативных значений и системы коэффициентов в разрешающих уравнениях метода предельных состояний, изложенных в работах [3, 4].

Для получения границ изменчивости суммарной постоянной нагрузки авторами проведен комплекс имитационных экспериментов. В ходе многократных прогонов имитационной модели для создания выборок из реализаций случайных величин отдельных компонент постоянной нагрузки использованы генераторы случайных чисел вычислительной системы MathCAD и разработанные авторами программные модули во взаимодействии с рациональными алгоритмами построчной трансформации числовых множеств, преимущества которых доказаны в работе [5]. На основании проведенного комплекса имитационных экспериментов, к дальнейшему расчету приняты наиболее невыгодные границы изменчивости суммарной постоянной нагрузки $[q_{\Sigma, \text{inf}}; q_{\Sigma, \text{sup}}] \sim F_{q_{\Sigma}} [60,69; 83,91]$ кН/м.

Ожидаемые границы изменчивости временной нагрузки от пешеходов представлены интервалом $[p_{\text{inf}}; p_{\text{sup}}] \sim F_p [3,15; 28,85]$ кН/м. Ожидаемые границы изменчивости прочих нагрузок [6, 7] оценены интервалами: ветровое давление для района строительства $[w_{0, \text{inf}}; w_{0, \text{sup}}] \sim F_w [0,000; 1,581]$ кН/м²; вес снегового покрова – $[S_{0, \text{inf}}; S_{0, \text{sup}}] \sim F_S [0,096 \cdot \mu; 1,864 \cdot \mu]$ кН/м², μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке.

На **второй ступени**, с использованием ожидаемых границ изменчивости нагрузок, полученных на первой ступени, методом конечного элемента в перемещениях в программном комплексе «ЛИРА», выполнен комплекс статических расчетов пролетного строения пешеходного путепровода. При оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» учитывались компоненты напряженного состояния в самих элементах

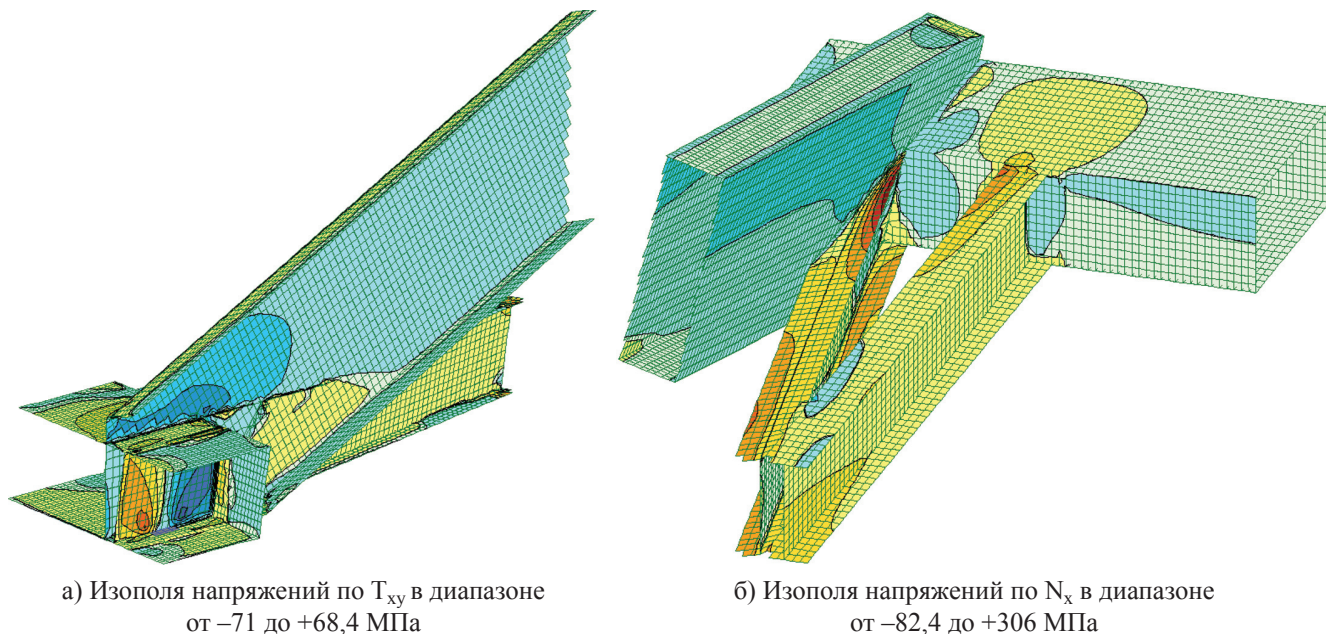


Рис. 1. Фрагменты отдельных вариантов загрузок с изополями напряжений в элементах узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка»

сопряжения и в прилегающих к ним участках: верхний и нижний пояса арки, верхний и нижний пояса затяжки, нижний пояс и стенка (диафрагма) домкратной балки, элементы поперечных связей в опорном сечении. В комплексе статических расчетов задействовано 138 наиболее характерных комбинаций загрузки, как отдельными видами нагрузок, так и их возможными сочетаниями в пределах ожидаемых границ изменчивости.

На рис. 1 приведены фрагменты отдельных загрузок с изополями напряжений в элементах узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка».

На **третьей ступени** проведен статистический анализ результатов оценки НДС узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» на основании выборочных данных, полученных в ходе задействованных на второй ступени комбинаций загрузки.

Таблица 1. Статистические характеристики отдельных компонент НДС в узлах сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка»

№ п.п.	Компоненты НДС	Статистические характеристики						
		Объем выборки	Среднее арифметическое значение	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	Экцентриситет	Наименьшее значение	Наибольшее значение
1.	Нормальные напряжения вдоль вертикальной оси	138	122,4 МПа	23,9 МПа	0,195	-0,857	90,0 МПа	155,6 МПа
2.	Нормальные напряжения вдоль горизонтальной оси	138	130,1 МПа	27,1 МПа	0,208	-0,832	102,0 МПа	174,9 МПа
3.	Касательные напряжения	138	82,3 МПа	17,3 МПа	0,210	-0,838	58,0 МПа	90,4 МПа

Общий взгляд на полученные статистические характеристики отдельных компонент НДС (табл. 1) показывает, что имеет место деформация формы итогового распределения вероятностей в части её сравнения со статистическими характеристиками для нормального закона распределения случайной величины.

Для оценки вероятности возможных «выбросов» случайной величины каждого k -го промежуточного параметра (отдельной компоненты НДС) за уровень невыгодной границы энтропийного интервала неопределенности, авторами разработаны логические и аналитические программные модули в среде MathCAD. Для этого рассчитана частота $\phi_k | N$ ожидаемых «выбросов» случайной величины k -го параметра, которая определялась путем регистрации случаев отдельных превышений i -ых реализаций k -го параметра $\sigma_{k,i}(N)$ уровня верхней границы энтропийного интервала неопределенности $\sigma_{k,sup}$ для того же параметра в течение имитационного эксперимента объемом N :

$$\phi_k | N = \frac{n_k | (\sigma_{k,i}(N) > \sigma_{k,sup})}{N}, \quad (1)$$

$$\sigma_{k,sup} = \bar{\sigma}_k + \varepsilon_{k,\beta}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{k,\beta}$ – точность оценки k -го параметра, рассчитанная с достоверностью β .

С использованием статистических характеристик отдельных компонент НДС в узлах сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» (табл. 1) проведены тестовые прогоны имитационных моделей для определения требуемого объема моделирования напряжений в расчетных сечениях. Объем исходных числовых множеств (отдельных компонент НДС) задан на уровне $N \sim 10^4 \dots 10^7$ реализаций. В качестве критерия, подтверждающего адекватность принятой имитационной модели, принята сходимость по вероятности P_β :

$$\phi_k | N \xrightarrow{P_\beta} Q_{k,lim}(t), t \leq T_\Theta \quad (3)$$

где $Q_{lim}(t)$ – предельное значение фактора риска, оцениваемое исходя из требований к сохранению надежности системы за время эксплуатации t в пределах ожидаемого проектного срока службы сооружения T_Θ .

Тестовые прогоны имитационных моделей показали, что для удовлетворения требований к адекватности плана имитационного эксперимента требуется искусственно регулировать объем исходных числовых множеств N , зависящий от принимаемого уровня достоверности расчетного параметра. В рамках решения задачи исследования к дальнейшей разработке принят план имитационного эксперимента с объемом исходных числовых множеств $N = 10^7$ реализаций при уровне достоверности $\beta = 0,995$, при этом требование к предельному значению фактора риска на уровне $Q_{lim}(t) = 5 \cdot 10^{-6}$ соблюдается.

На **четвертой ступени** проведен комплекс имитационных экспериментов по оценке проектной надежности узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» по критерию отказа вследствие исчерпания удельной прочности. Под отказом понимается событие, состоящее в превышении значения случайной реализации отдельных или совместно действующих напряжений в расчетных сечениях над случайной реализацией значения удельной прочности материала.

Предварительно, после изучения результатов статистических исследований механических свойств использованного конструкционного материала, к дальнейшему использованию приняты статистические данные 969 контрольных испытаний на растяжение стандартных образцов, представленных в работе [8]. В комплексе имитационных экспериментов по оценке надежности узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» использованная сталь 15ХСНД представлена следующими статистическими характеристиками: предел текучести – выборочное среднее 386,9 МПа, коэффициент вариации 0,0835, стандартное отклонение 32,4 МПа; временное сопротивление – выборочное среднее 558,5 МПа, коэффициент вариации 0,0745, стандартное отклонение 41,7 МПа.

Таблица 2. Расчетные интервальные оценки для компонентов НДС узла сопряжения

№ п.п.	Компоненты НДС	Расчетные интервальные оценки	
		Нижняя граница (inf)	Верхняя граница (sup)
1.	Нормальные напряжения вдоль вертикальной оси, $\sigma_x \sim f[\sigma_{x,inf}; \sigma_{x,sup}]$	90,0 МПа	280,9
2.	Нормальные напряжения вдоль горизонтальной оси, $\sigma_y \sim f[\sigma_{y,inf}; \sigma_{y,sup}]$	102,0 МПа	590,6
3.	Касательные напряжения, $\tau_{xy} \sim f[\tau_{xy,inf}; \tau_{xy,sup}]$	58,0 МПа	183,5

Для решения задач этой ступени с использованием результатов статистического анализа результатов оценки НДС рассматриваемого узла сопряжения, полученных на третьей ступени расчета, составлены расчетные интервальные оценки для компонентов НДС в соответствии принятого

плана имитационного эксперимента (табл. 2). При этом нижняя граница принята по наименьшему значению соответствующей компоненты НДС (см. табл. 1), которое получено при загрузке только постоянными нагрузками, а верхняя граница рассчитана исходя из характеристик плана имитационного эксперимента (по верхней границе доверительного интервала с обеспеченностью 0,995 при объеме выборки 138, квантиль 2,853, число прогонов модели 400).

Условие оценки по критерию отказа вследствие исчерпания удельной прочности:

$$Q_{\Omega} \Rightarrow \begin{cases} R_y(j) < \sigma_x(j) \\ R_y(j) < \sigma_y(j) \\ R_s(j) < \tau_{xy}(j) \\ R_y(j) < \sqrt{|\sigma_x(j)^2 - \sigma_x(j) \cdot \sigma_y(j) + \sigma_y(j)^2 + 3 \cdot \tau_{xy}(j)^2|} \end{cases}, \text{ при } j \in [1; N], (4)$$

где $R_y(j)$, $R_s(j) = 0,58 \cdot R_s(j)$ – массивы случайных реализаций предела текучести и сопротивления стали сдвигу; $\sigma_x(j)$, $\sigma_y(j)$, $\tau_{xy}(j)$ – массивы случайных реализаций отдельных компонент НДС (нормальных и касательных напряжений).

В результате проведения имитационного эксперимента по оценке проектной надежности узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» по критерию отказа вследствие исчерпания удельной прочности не выявлено случаев превышения значений случайных реализаций отдельно моделируемых нормальных и касательных напряжений над случайными реализациями значений удельной прочности материала. Установлено, что при учете совместного действия напряжений в ходе оценки по четвертой модели в условии (4), наблюдается устойчивая регистрация отказов с наибольшей частотой появления $2,4 \cdot 10^{-6}$, что не противоречит предельному значению фактора риска на уровне $Q_{\text{lim}}(t) = 5 \cdot 10^{-6}$.

Таким образом, с позиции достаточности показателей надежности для стадии проектирования, можно оставить принятые конструктивные решения без изменений.

На **пятой ступени** проведен комплекс имитационных экспериментов по оценке возможной изменчивости показателей надежности узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» на стадии эксплуатации.

Очевидно, что при эксплуатации технической системы неизбежно влияние различных неблагоприятных процессов (например, деградация элементов, недостаточно качественное и/или несвоевременное выполнение ремонтно-восстановительных мероприятий). Как правило, на этапе проектирования конструктор сталкивается с некоторыми внешне непреодолимыми сложностями, в частности, с самим отсутствием проектируемой конструкции, а иногда и с отсутствием её аналогов. В таких условиях дать идеальный прогноз изменения надежности системы за проектный срок службы затруднительно, а порой и невозможно. Для решения задач этой ступени использованы аналитические модели формализации процесса изменчивости показателей надежности, изложенные в работе [9], а также модели описания процессов износа стальных конструкций в смежных областях науки, например, в работе [10].

При разработке модели изменчивости показателей надежности в течение проектного срока эксплуатации важным показателем является конечное значение определяющего показателя надежности (например, вероятность отказа) к моменту исчерпания ресурса безопасной эксплуатации. Запишем условие, при котором техническая система не исчерпала свой ресурс за время эксплуатации t :

$$Q_{\Omega}(t) \leq [Q(t)], t \leq T_{\Theta}, (5)$$

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

С учетом условия (5) формула оценки (4) по критерию отказа вследствие исчерпания удельной прочности переписывается в виде:

$$\{Q_{lim}(t)\} \leq Q_{\Omega}(t) \Rightarrow \begin{cases} R_{yt}(j) < \sigma_{xt}(j) \\ R_{yt}(j) < \sigma_{yt}(j) \\ R_{st}(j) < \tau_{xyt}(j) \\ R_{yt}(j) < \sqrt{[\sigma_{xt}(j)^2 - \sigma_{xt}(j) \cdot \sigma_{yt}(j) + \sigma_{yt}(j)^2 + 3 \cdot \tau_{xyt}(j)^2]} \end{cases}, \quad (6)$$

где $R_{yt}(j)$, $R_{st}(j)$ – области случайных реализаций предела текучести и сопротивления стали сдвигу с разверткой во времени t ; $\sigma_{xt}(j)$, $\sigma_{yt}(j)$, $\tau_{xyt}(j)$ – тоже, отдельных компонент НДС.

Рассмотрим простую линейную модель, характеризующую изменчивость отдельного i -го расчетного параметра, входящего в формулы (4):

$$\Phi_i(t) = \Phi_{i,0} \cdot (1 + t \cdot \Delta_t), \quad (7)$$

где $\Phi_{i,0}$ – значение отдельного i -го расчетного параметра в начальный момент времени ($t=0$); $\Delta_t = \frac{d}{dt} \Phi_i(t)$ – комплексный показатель, учитывающий влияние различных неблагоприятных процессов во времени t в пределах ожидаемого проектного срока службы сооружения.

На примере рассматриваемого узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» в пролетном строении пешеходного путепровода, рассмотрены различные значения комплексного показателя Δ_t , принятые в диапазоне значений $1 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-5}$, с использованием которых, выполнен комплекс имитационных экспериментов для определения изменчивости вероятности отказов системы во времени (рис. 2).

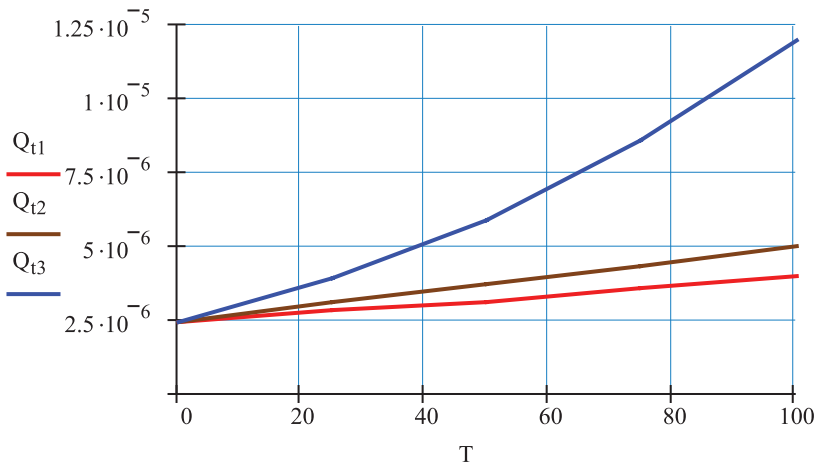


Рис. 2. Графики изменчивости вероятности отказов системы во времени T в зависимости от принятого значения комплексного показателя Δ_t , при $\Delta_{t1} = 5 \cdot 10^{-4}$ – вероятность отказов Q_{t1} , при $\Delta_{t2} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ – Q_{t2} и при $\Delta_{t3} = 1 \cdot 10^{-4}$ – Q_{t3}

Полученные результаты показали, что для сохранения показателей надежности на стадии эксплуатации при неизменности принятых конструктивных решений, изменчивость расчетных параметров во времени (увеличение напряжений) не должно превышать $\Delta_t = 2,5 \cdot 10^{-4}$ в год.

Выводы

По результатам проведенного анализа надежности ответственного узла сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» в пролетном строении пешеходного путепровода установлено, что при

уровне достоверности расчетных оценок $\beta = 0,995$, вид отказа по критерию исчерпания удельной прочности одного из элементов характеризуется как практически невероятный отказ.

Для критерия исчерпания удельной прочности от совместного действия напряжений в узлах сопряжения «арка – затяжка – домкратная балка» при имитации их загрузки характерными комбинациями внешних воздействий наблюдается устойчивая регистрация отказов с наибольшей частотой появления $2,4 \cdot 10^{-6}$, что не противоречит предельному значению фактора риска на уровне $Q_{\text{lim}}(t) = 5 \cdot 10^{-6}$.

Для оценки надёжности авторами были разработаны и апробированы на конкретной инженерной задаче специальные алгоритмы, основанные на структурных, статистических и имитационных методах, а также на приемах регрессионного анализа, позволяющие оценивать как проектную надёжность, так и прогнозировать допустимый уровень изменчивости показателей надёжности на стадии эксплуатации системы в зависимости от ответственности решаемой задачи.

Литература

1. **Манапов А.З.** Расчет надёжности и ресурса строительных конструкций методом статистического моделирования: Учебное пособие. Казань: КГАСУ, 2010. – 131 с.
2. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81 «Стальные конструкции») / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
3. **Шпете Г.** Надёжность несущих строительных конструкций / Пер. с нем. О.О. Андреева. – М.: Стройиздат, 1994. – 288 с.
4. **Райзер В.Д.** Методы теории надёжности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций / В.Д. Райзер; науч. изд. – М.: Стройиздат, 1986. – 192 с.
5. **Майстренко И.Ю., Манапов А.З.** Статистическое моделирование работы строительных конструкций методом Монте-Карло. Работа с числовыми множествами // Известия КГАСУ № 2 (20), 2012. – С. 84-93.
6. Свод правил СП.35.13339.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* // Утвержден Приказом Минрегиона России от 28 декабря 2010 г. №82.
7. Свод правил СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* // Утвержден Приказом Минрегиона России от 27 декабря 2010 г. №787.
8. **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.
9. **Майстренко И.Ю., Манапов А.З.** Моделирование процесса изменения во времени уровня надёжности конструктивной системы // Известия КазГАСУ № 1 (13), 2010. – С. 132-140.
10. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции / **Е.В. Горохов, Я. Брудка, М. Лубиньски** и др.; Под ред. Е.В. Горохова. – М.: Стройиздат, 1994. – 488 с.