

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/08SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/08SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/08SATS220>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Сафронов В.С., Антипов А.В. Апробация эффективной методики динамического расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/08SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/08SATS220

For citation:

Safronov V.S., Antipov A.V. (2020). Approbation of an effective method for dynamic calculation of the steel and concrete bridge span. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/08SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/08SATS220

УДК 624.04

Сафронов Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия
Профессор кафедры «Строительной механики»
Доктор технических наук, профессор
E-mail: vss22@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=620340

Антипов Андрей Владимирович

ООО «Дортранспроект», Воронеж, Россия
Ведущий инженер проектного отдела
E-mail: dron_a77@mail.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1067058

Апробация эффективной методики динамического расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста

Аннотация. Постановка задачи. Описываются ориентированная на использование конечно-элементных вычислительных комплексов методика и результаты определения динамической реакции неразрезного сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста на проезд тяжелых автотранспортных средств. Данные динамических расчетов сопоставляются с полученными при натуральных динамических испытаниях эксплуатируемого сооружения.

Результаты. Анализируются современные алгоритмы динамического расчета неразрезных мостовых сооружений на действие подрессоренных автотранспортных средств, позволяющих учитывать неровности на проезжей части, влияние перемещений точек опирания колес на колебания движущихся транспортных средств.

Описывается последовательность выполнения динамических расчетов с помощью блоков модального анализа и динамического расчета КЭ-комплексов на систему движущихся неинертных грузов с последующим вычислением динамической составляющей прогибов и усилий элементов мостового сооружения, учитывающей инертность автотранспортного средства и неровности на проезжей части.

По данным модального анализа сталежелезобетонного пролетного строения эксплуатируемого автодорожного моста с помощью пространственной конечно-элементной

расчетной схемы определяются собственные формы несущей конструкции, которые используются затем для динамических расчетов на подвижную инертную нагрузку.

Приводятся результаты динамических расчетов эксплуатируемого автодорожного моста на действие движущегося с постоянной скоростью трехосного грузового автомобиля. Расчетные прогибы сопоставляются с полученными при натуральных статических испытаниях моста. В численных расчетах оценивается влияние скорости движения, неровностей на проезжей части и обратной связи между колебаниями моста и движущегося автомобиля.

Выводы. Предлагаемая методика динамического расчета мостовых сооружений позволяет на стадии проектирования оценивать динамические качества транспортного сооружения и принимать оптимальные проектные решения.

Ключевые слова: автодорожный мост; неразрезное сталежелезобетонное пролетное строение; динамический расчет на подвижную инертную нагрузку; неровности на проезжей части; обратная связь; сопоставление расчетных и натуральных прогибов; резонансные режимы колебаний

Введение

При проектировании конструкций современных большепролетных мостовых сооружений существенную роль имеет динамический расчет несущих конструкций на подвижную нагрузку в виде инертных моделей автомобилей. Это связано с имеющейся в нашей стране и за рубежом тенденцией увеличения грузоподъемности и роста скоростей разнообразных автотранспортных средств с одновременным снижением материалоемкости строящихся в последние годы конструкций мостовых сооружений.

Несмотря на стремительное развитие применения вычислительной техники, реализующей наиболее прогрессивные алгоритмы динамических задач строительной механики, остаются недоработанными ориентированные на использование многочисленных конечно-элементных комплексов эффективные алгоритмы динамического расчета мостовых сооружений разнообразных несущих систем.

Проблема динамического расчета мостов имеет более чем вековую историю с момента опубликования в 1905 году статьи А.Н. Крылова [1] о колебаниях балок при движении по ней вертикальной сосредоточенной силы. Дальнейшие исследования по развитию проблемы динамического воздействия подвижной нагрузки на мостовые сооружения приведены в работах А. Шалленкампа [2], В.В. Болотина [3], В.А. Киселева [4]. Подробное описание последующих достижений по учету скорости движения и инертности нагрузки представлены в книге [5]. Следует также отметить результаты по рассматриваемой проблеме исследователя из Чехословакии Л. Фрыбы [6].

Существенное теоретическое и практическое развитие получила теория динамического действия подвижной нагрузки на автодорожные мосты на основе использования подрессоренных инертных моделей автотранспортных средств [7], так как такие системы позволили не только моделировать динамические особенности воздействия разнообразных автотранспортных средств и имеющиеся на проезжей части неровности, но и учитывать влияние связанности в динамической системе «мост-нагрузка» и вероятностный характер их взаимодействия. Такая постановка получила интенсивное развитие в известной научной школе, созданной в Воронежском ИСИ под руководством проф. А.Г. Барченкова [8–12].

Аналогичные подходы развивались в МИИТе Н.Н. Шапошниковым [13] и Г.Б. Муравским [14], однако эти перспективные алгоритмы не нашли практического применения в инженерной практике, что объясняется отсутствием специализированных

расчетных блоков динамического расчета мостовых сооружений в известных реализующих метод конечного элемента вычислительных комплексах ЛИРА, MIDAS, STARK, ANSYS и др. Мостовая тематика в них ограничивается блоками построения статических поверхностей влияния прогибов и усилий в наиболее напряженных элементах несущих мостовых конструкций. Нам известен лишь реализованный в американской программе SAP2000 блок динамического расчета транспортного сооружения на действие движущейся с постоянной скоростью системы вертикальных неинертных сил. Этот блок имеет ограниченное применение, так как не позволяет моделировать совместные колебания движущегося по неровной поверхности проезжей части подрессоренного инертного автотранспортного средства и мостового сооружения.

Необходимость дальнейшего развития теории динамического действия подвижной нагрузки на автодорожные мосты возникла в последние десятилетия в связи с массовым строительством большепролетных мостовых сооружений с выполненными из облегченных тонкостенных несущих конструкций пролетными строениями [15], для которых возможно возникновение резонансных колебаний при неблагоприятных динамических качествах.

В работе [16] нами был предложен и апробирован на модельном примере уточненный алгоритм динамического расчета на действие подвижной инертной нагрузки. При этом выполняется последовательное использование конечно-элементного комплекса SAP2000 и специализированной математической программы Mathcad, в которой используются полученные при модальном анализе по программе SAP2000 несущей конструкции её нормированные собственные формы.

Подробное описание апробации предложенной в работе [16] методики динамического расчета для железобетонного моста с плитным неразрезным пролетным строением и сопоставление ее результатов с данными натурных динамических испытаний эксплуатируемого моста приведено в статье [17]. Такие же экспериментально-теоретические исследования представлены применительно к мостовому сооружению с металлическим пролетным строением в статье [18]. При этом доказана возможность применения предлагаемой методики для любых несущих систем мостовой конструкции и произвольных автотранспортных средств, включая многоосные автопоезда.

В настоящей статье предложенная методика применяется для динамического расчета неразрезного сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста с целью определения реакции несущей конструкции на проезд одиночного трехосного грузового автомобиля. Результаты динамических расчетов сопоставляются с данными натурных динамических испытаний эксплуатируемого транспортного сооружения.

1. Краткое описание расчетного алгоритма

Подробное обоснование алгоритма расчета совместных колебаний подвижной инертной подрессоренной нагрузки выполнено нами в статье [16]. Здесь приведем лишь краткое описание последовательности вычислений.

1. С использованием динамической конечно-элементной расчетной схемы мостового сооружения, построенной с помощью библиотеки конечных элементов вычислительного комплекса, определяются ограниченное число низших частот и соответствующих им собственных форм.

2. Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений для вектора обобщенных координат $X(t)$ мостовой конструкции:

$$M_m \ddot{X}(t) + B_m \dot{X}(t) + C_m X(t) = P(t), \quad (1)$$

с использованием блока квазистатического расчета конечно-элементного комплекса на действие отвечающих статической системе движущегося с заданной скоростью автомобиля вертикальных сосредоточенных сил с архивацией массивов ординат $y_{\text{стат}}(t)$ наиболее важных параметров напряженно-деформированного состояния в характерных сечениях мостовой конструкции.

3. Численное интегрирование совместной системы дифференциальных уравнений для автотранспортного средства:

$$M_a \dot{Z}(t) + B_a Z(t) + C_a Z(t) = \sum R_k(Z, y(vt, \eta), h(vt, \eta)) \quad (2)$$

и преобразованных дифференциальных уравнений для мостовой конструкции на основе разложения по собственным формам:

$$\begin{aligned} \ddot{T}_v(t) + K_0 \cdot \omega_v^2 \cdot \dot{T}_v + \omega_v^2 \cdot T_v &= \sum_k R_k(\phi_v(vt, \eta) / (\phi_v M_m \cdot \phi_v)) \\ (v = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (3)$$

с архивацией набора ординат $y_1(t)$, описывающих колебания моста с учетом инертности и неровностей дорожного покрытия и обратной связи при проезде автомобиля.

4. Численное интегрирование системы типовых уравнений (3) на действие статического веса автомобиля с архивацией набора ординат $y_2(t)$, описывающих квазистатическое изменение прогибов и усилий моста при движении неинертной модели автомобиля.

5. Определение динамической составляющей реакции моста на проезд автомобиля по неровной поверхности проезжей части по полученным ранее расчетным данным:

$$u_{\text{дин}}(t_i) = y_1(t_i) - y_2(t_i). \quad (4)$$

6. Определение уточненной полной реакции моста на проезд инертного автомобиля по неровной поверхности проезжей части моста сложением статической и динамической составляющих:

$$u_{\text{полн}}(t_i) = u_{\text{стат}}(t_i) + u_{\text{дин}}(t_i). \quad (5)$$

В уравнениях (1)–(3) введены следующие обозначения:

$Z(t)$ и $X(t)$ – вектора обобщенных координат динамических расчетных моделей автотранспортного средства и несущей мостовой конструкции;

M_a, B_a, C_a – матрицы инертности, демпфирования и жесткости транспортного средства;

M_m, B_m, C_m – матрицы инертности, демпфирования и жесткости несущей мостовой конструкции;

$y(vt, \eta), h(vt, \eta)$ – перемещение несущей конструкции и ордината микропрофиля дорожного покрытия под местом опирания k -ой упругой связи транспортного средства.

Отметим, что совершенствование расчета полной динамической реакции мостовой конструкции выполняется за счет уточнения расчета квазистатической составляющей $u_{\text{стат}}(t_i)$ на первом этапе расчета, где используется прямое интегрирование уравнений движения.

2. Описание объекта исследования

Рассматривается мост со сталежелезобетонным неразрезным пролетным строением через реку Вычегду на км 3+800 автомобильной дороги Усть-Кулом – Керчомья в республике Коми, построенный в 1998 году по проекту института УралгипроДорНИИ, г. Екатеринбург под временные нагрузки А11 и НК-80. Общий вид эксплуатируемого более 20 лет автодорожного моста представлен на рис. 1.

Пролетные строения моста представляют собой три стальные сплошностенчатые неразрезные двутавровые балки с высотой стенки 3600 мм, объединенные с помощью жестких упоров с железобетонной плитой проезжей части. Статическая схема пролетного строения – (63,0+2×105,0+63,0) м.

Шаг главных балок в поперечном направлении равен 3,8 м. Поперечные связи между главными стальными балками в виде плоских ферм поставлены с шагом по длине моста 7,0 м. Монтажные стыки главных балок – комбинированные: пояса на сварке, стенки – на высокопрочных болтах и сварке.

Железобетонная плита проезжей части толщиной 16 см выполнена из сборных блоков, которые опираются на главные балки, образуя продольный шов над средней балкой.

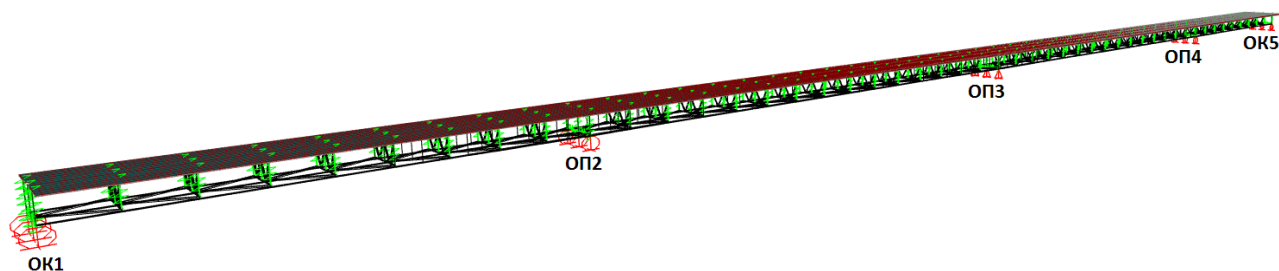


Рисунок 1. Общий вид мостового перехода с левой стороны от конца сооружения (разработано авторами при выполнении натурного обследования)

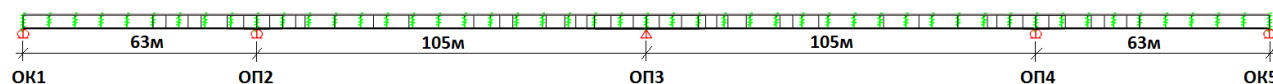
3. Динамическая модель пролетного строения и результаты модального анализа

Динамическая пластинчато-стержневая пространственная расчетная схема сталежелезобетонного пролетного строения рассматриваемого моста через реку Вычегда, составленная на основе описанной в монографии [19] библиотеки конечных элементов вычислительного комплекса SAP2000, представлена на рис. 2. Деформативность опор моста в расчетной схеме не учитывалась.

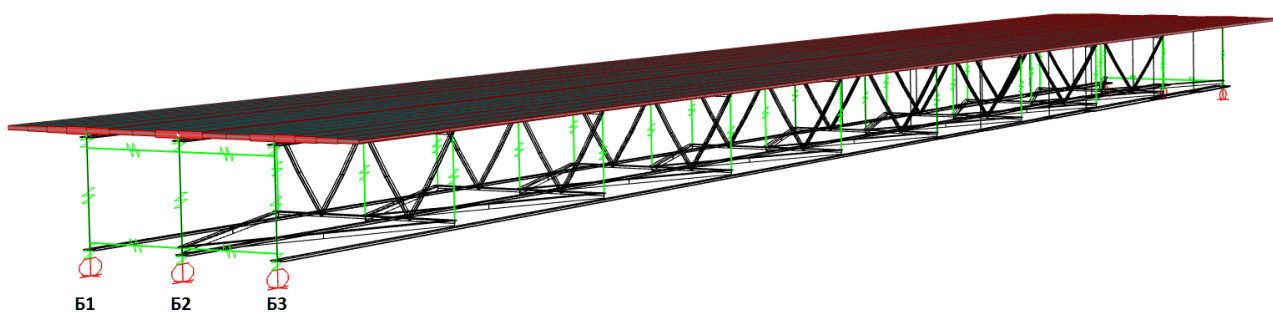
Трёхмерное изображение с закреплениями и связями



Вид с фасада



Фрагмент КЭ модели пролётного строения – первый пролёт



Вид с торца

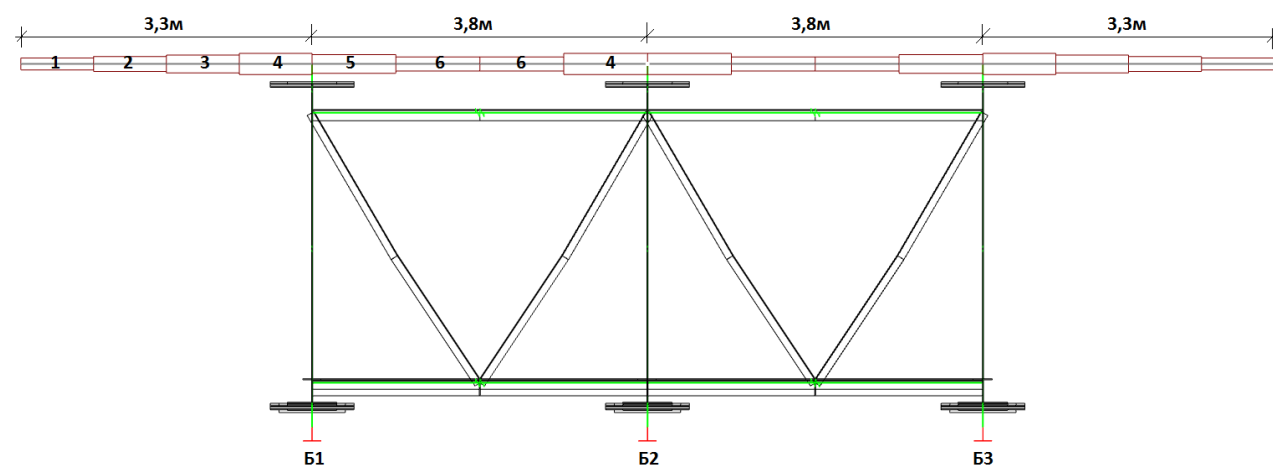


Рисунок 2. Пространственная КЭ-ая модель неразрезного пролётного строения (разработано авторами по данным натурных измерений)

Дискретизация конструкций рассматриваемого пролётного строения выполнялась с использованием следующих типов конечных элементов (КЭ):

- универсальные стержневые КЭ без учета сдвиговых деформаций для моделирования главных стальных балок пролётного строения;
- универсальные прямоугольные плоские оболочечные КЭ (тонкая плита по теории Кирхгофа) для моделирования железобетонной плиты проезжей части;

- специальные двухузловые элементы упругой связи между узлами с характеристиками жестких вставок.

В КЭ-ой модели пролетного строения плоскость узлов принята в уровне срединной поверхности плиты проезжей части. Жесткие вставки использовались для учета отклонений центров тяжести главных балок относительно плоскости узлов плиты проезжей части.

Результаты модального анализа динамической расчетной схемы пролетного строения, выполненные по ПК SAP2000 с использованием представленной на рис. 2 КЭ-ой модели, приведены в табл. 1. Они содержат значения 13 низших собственных частот и описание собственных форм при колебаниях по этим частотам.

Таблица 1

**Собственные частоты и описание деформирования
главных балок при свободных колебаниях пролетного строения**

Номер формы	Период, с	Техническая частота, Гц	Частота, рад/с	Описание деформированного состояния главных балок моста при свободных колебаниях
1	1,271	0,787	4,945	Изгибные деформации главных балок по одной полуволне синусоиды с разными направлениями движения в средних пролетах
2	0,826	1,211	7,611	Изгибные деформации главных балок по одной полуволне синусоиды с одинаковыми направлениями движения в средних пролетах
3	0,526	1,901	11,944	Изгибные деформации главных балок по одной полуволне синусоиды в крайних пролётах и двум полуволнам синусоиды в средних пролётах
4	0,468	2,138	13,432	Изгибные деформации главных балок по одной полуволне синусоиды в крайних пролётах и трём полуволнам синусоиды в средних пролётах
5	0,430	2,324	14,602	Изгибно-крутильные деформации пролетного строения в средних пролётах длиной 105 м
6	0,420	2,381	14,961	Изгибно-крутильные деформации пролетного строения в средних пролётах длиной 105 м
7	0,339	2,950	18,532	Изгибные деформации главных балок по двум полуволнам синусоиды
8	0,321	3,112	19,551	Изгибно-крутильные деформации пролетного строения моста во всех пролётах
9	0,312	3,201	20,109	Изгибно-крутильные деформации пролетного строения моста во всех пролётах
10	0,261	3,830	24,067	Изгибные деформации главных балок по двум полуволнам синусоиды
11	0,234	4,275	26,858	Изгибно-крутильные деформации пролетного строения в крайних пролётах длиной 63 м
12	0,234	4,276	26,867	Изгибно-крутильные деформации пролетного строения в крайних пролётах длиной 63 м
13	0,233	4,295	26,984	Изгибные деформации главных балок по двум полуволнам синусоиды в крайних пролётах и трём полуволнам синусоиды в средних пролётах

Составлено авторами по данным расчетов

4. Результаты динамического расчета моста на подвижную нагрузку

В качестве инертной подвижной нагрузки принят трёхосный автомобиль КАМА3-6520 полной массой $M = 31,75$ т, который был использован при проведении динамических испытаний моста. При вычислении квазистатической составляющей реакции главных балок пролетного строения на проезд подвижной нагрузки использовалось прямое интегрирование

уравнений движения с помощью численной пошаговой процедуры методом Ньюмарка. При этом решении подрессоренный автомобиль рассматривался только как силовое воздействие.

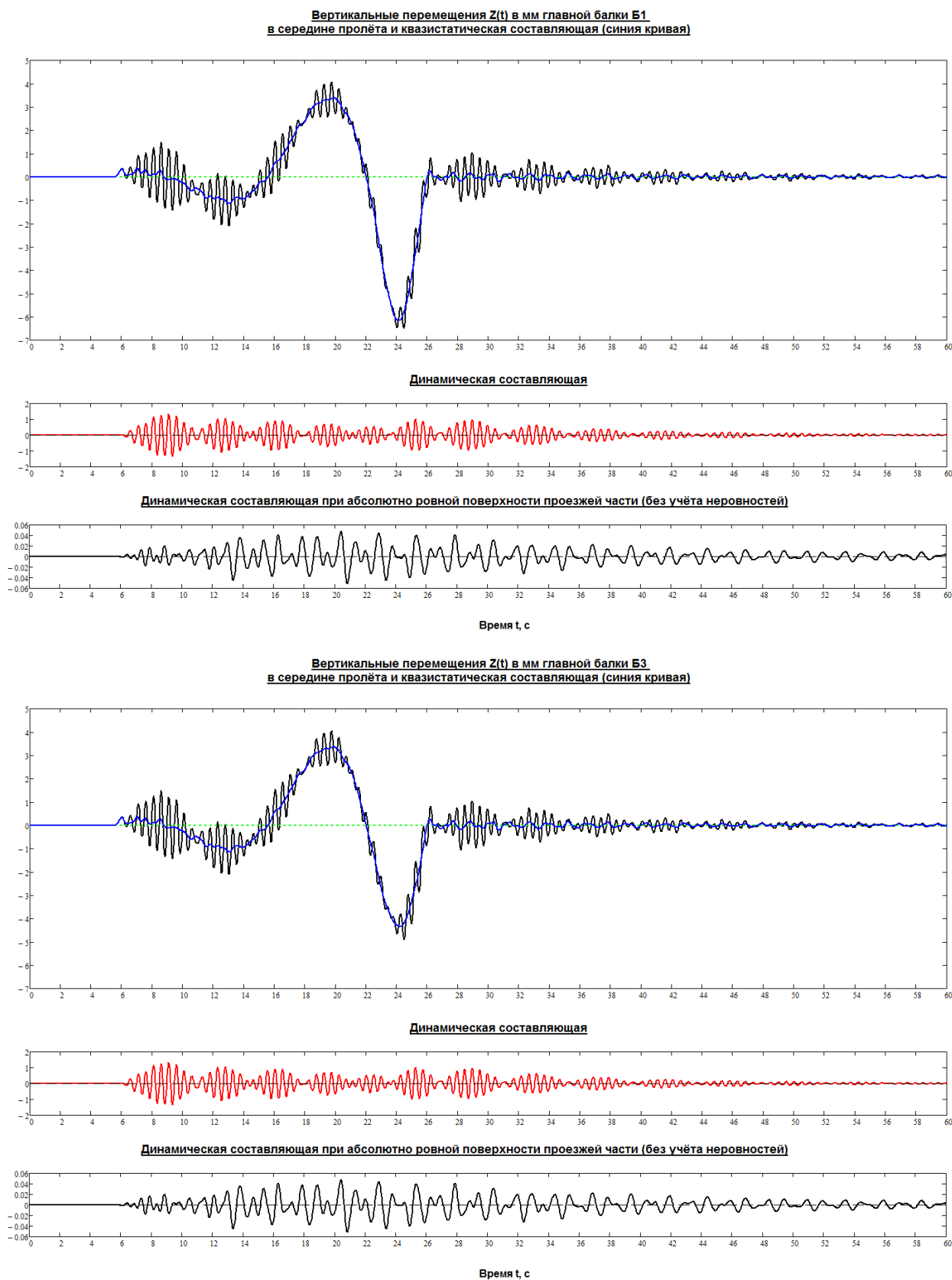


Рисунок 3. Расчетные графики прогибов средних сечений балок Б1 и Б3 в пролете №4 моста (выполнено авторами по данным численных расчетов)

Для получения динамической составляющей реакции главных балок от совместного взаимодействия движущегося автомобиля с конструкцией моста выполнялось совместное решение дифференциальных уравнений для автотранспортного средства (2) и для несущей мостовой конструкции (3) в программном комплексе Mathcad с использованием встроенной функции, реализующей метод Рунге-Кутты с постоянным шагом интегрирования. Шаг дискретизации по времени 0,03 с.

Динамическая расчетная схема трехосного автомобиля с задней балансирной тележкой представлялась в виде пространственной системы соединенных между собой и с проезжей частью моста нелинейными упругими связями абсолютно твердых тел, имеющей девять степеней свободы [9]. Подробное описание динамической модели автомобиля и дифференциальных уравнений движения по колеблющемуся мосту приведено нами в статье [17]. В алгоритме учитывается возможность отрыва колес от колеи проезда. Начальные условия для автомобиля принимаются статическими, для несущих конструкций моста – нулевыми. Изучение колебаний мостовой конструкции продолжается и после съезда автомобиля с моста.

В расчетах удерживалось 13 низших собственных форм пролётного строения моста (табл. 1). Демпфирование для сталежелезобетонного пролётного строения задавалось пропорциональным по Рэлею для всех удерживаемых в расчёте собственных форм колебаний, исходя из условия получения логарифмического декремента равным зафиксированной при испытаниях величине $\delta = 0,05$.

Для описания неровного пути по левой и правой колеям движения грузового автомобиля использовались гармонические функции с частотой, отвечающей заданной длине волны неровности:

$$h(t) = H \cdot \sin\left(\frac{\pi v t}{L_n}\right), \quad (6)$$

где $H = 5$ мм, $L_n = 4$ м.

Результаты динамических расчетов колебаний пролетного строения для варианта проезда автомобиля со скоростью $v = 16$ м/с = 57,6 км/ч представлены на рис. 3. С целью изучения особенностей колебаний для каждой из главных балок Б1 и Б3 приведены полные прогибы в средних сечениях пролета 4, динамические и квазистатические составляющие, а также графики, иллюстрирующие различие между полными прогибами тех же сечений с учетом и без учета обратной связи между колебаниями пролетного строения и колебаниями движущегося по неровной проезжей части загруженного автомобиля.

Анализ представленных графиков показывает, что основную роль в возбуждении колебаний пролетного строения при проезде тяжелого грузового автомобиля играет наличие неровностей на проезжей части. Динамическая составляющая колебаний пролетного строения, обусловленная обратной связью, незначительна.

5. Сопоставление динамических расчетов с данными динамических испытаний

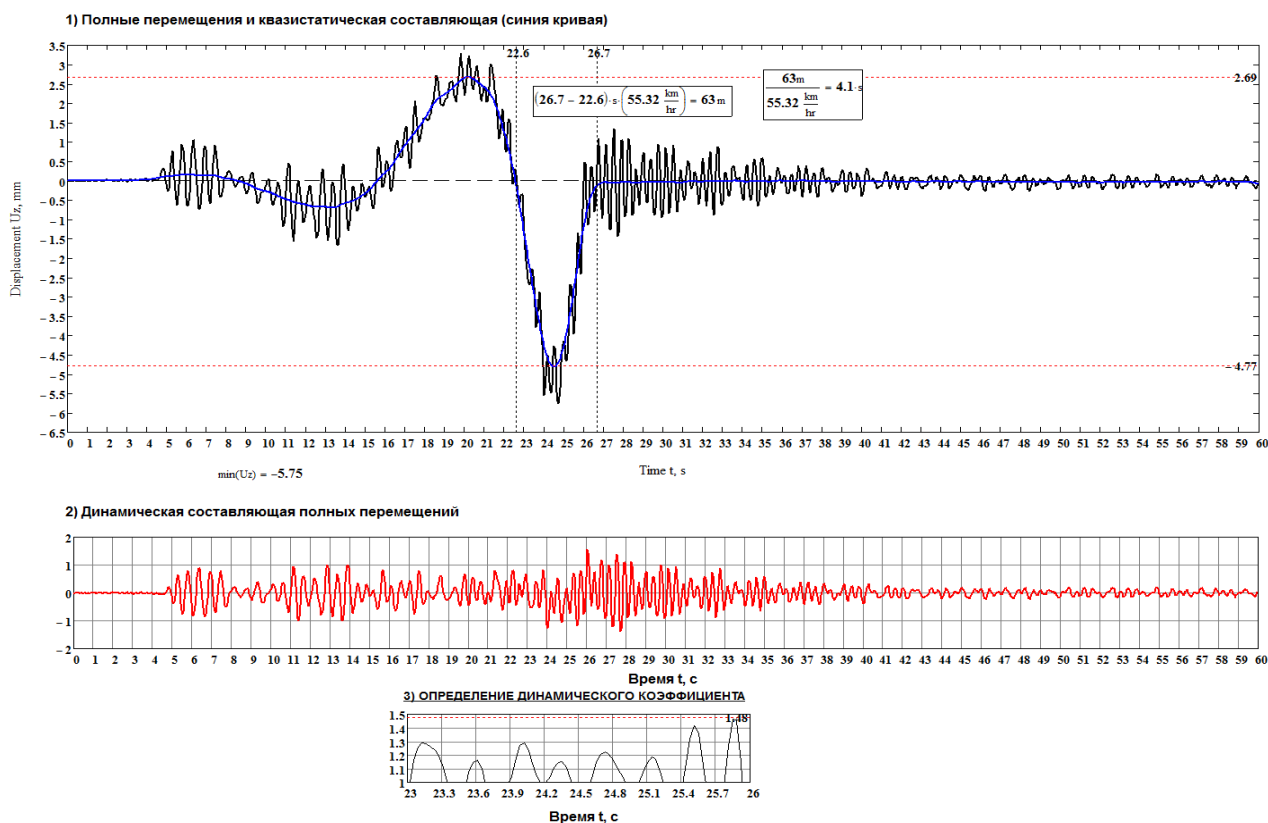
При проведении натурных динамических испытаний моста использовался полностью загруженный трехосный грузовой автомобиль КАМАЗ-6520 массой 31,75 т (рис. 4).

В качестве измеряемых параметров приняты вертикальные прогибы в средних сечениях главных металлических балок Б1 и Б3 пролетного строения в крайнем пролете №1 моста длиной 63 м. Регистрация колебаний главных балок пролетного строения осуществлялась с помощью электронного измерительного комплекса с использованием двух триангуляционных лазерных датчиков серии РФ603 производства ООО «РИФТЕК» республики Беларусь.

Установленные под мостом электронные датчики измеряли вертикальные прогибы в среднем сечении балки Б1 и среднем сечении балки Б3 в пролете №1 моста.



*Рисунок 4. Проезд автомобиля при динамических испытаниях моста
(выполнено авторами при проведении натурных динамических испытаний)*



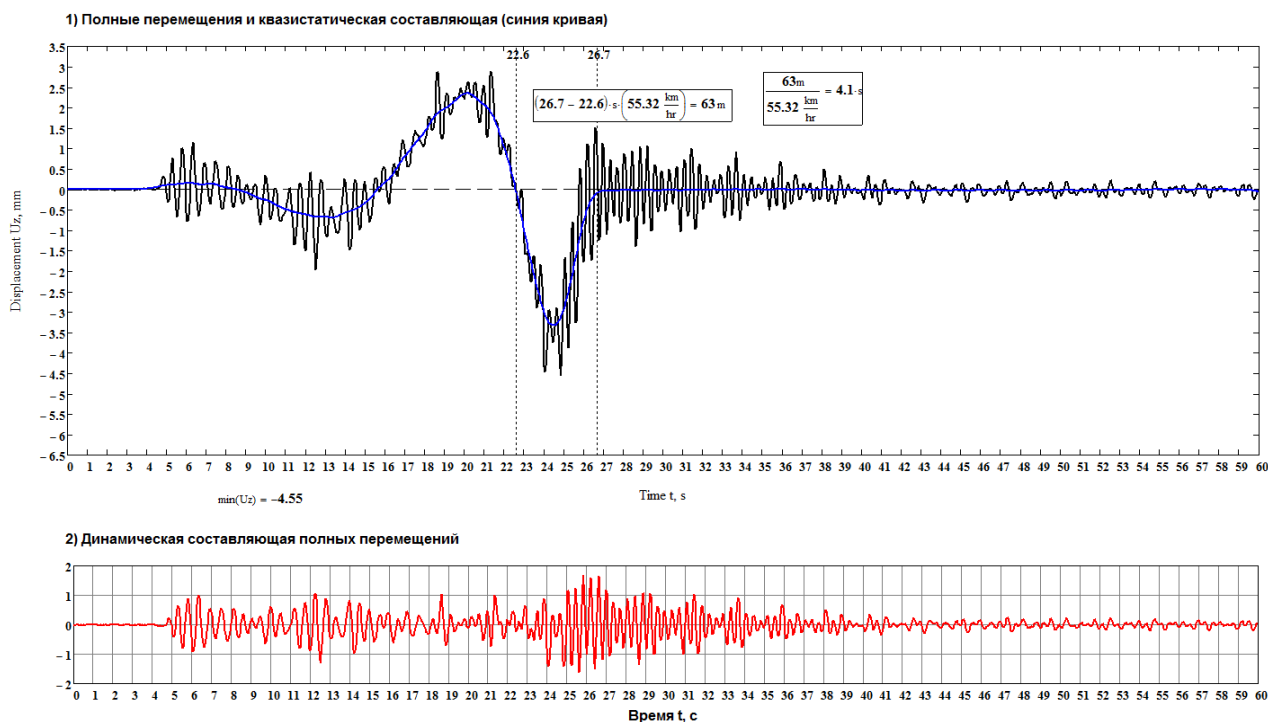


Рисунок 5. Зарегистрированные прогибограммы колебаний средних сечений балок Б1 и Б3 (рисунок выполнен авторами по данным натурных испытаний)

Зарегистрированные при натурных динамических испытаниях прогибограммы средних сечений балок Б1 и Б3 в пролете №1 при проезде автомобиля от конца моста к его началу со скоростью $v = 55,3$ км/ч представлены на рис 5. Используя данные спектрального анализа методом быстрого преобразования Фурье записанных при испытаниях прогибограмм получены кривые квазистатических прогибов балок Б1 и Б3 (показаны на рисунке синим цветом). Динамические составляющие прогибов, представленные на рис. 5 красным цветом, получены вычитанием из полных прогибов квазистатических составляющих. Графики изменения динамических коэффициентов, приведенные на рис. 5 только для прогибов балки Б1, построены последовательным делением полных прогибов на квазистатические составляющие для тех же моментов времени.

При проведении динамических испытаний эксплуатируемого моста со сталежелезобетонным пролетным строением с неудовлетворительным состоянием проезжей части на участках подходов к мосту выявлена существенная зависимость динамического коэффициента от скорости движения. Он возрастает от величины $1+\mu = 1,12-1,15$ для скорости $v = 20$ км/час до значения $1+\mu = 1,40-1,50$ при скорости, превышающей $v = 50$ км/час. Эта зависимость, полученная в натурных измерениях, сохраняется и при выполнении динамических расчетов.

Сопоставление представленных на рис. 4 расчетных графиков изменения прогибов в средних сечениях в пролете 1 главных балок пролетного строения с приведенными на рис. 5 зарегистрированными при натурных динамических испытаниях моста через реку Вычегда прогибограммами показывает их близость как по характеру, так и по амплитудам и проявляющимся гармоникам. Это свидетельствует об адекватности принятых в расчетной методике физических и математических моделей мостового сооружения и грузового автомобиля. Этот вывод подтверждается сравнением приведенных на рис. 6 и 7 спектральных плотностей для расчетных и записанных при испытаниях прогибограмм средних сечений в пролете 1 моста.

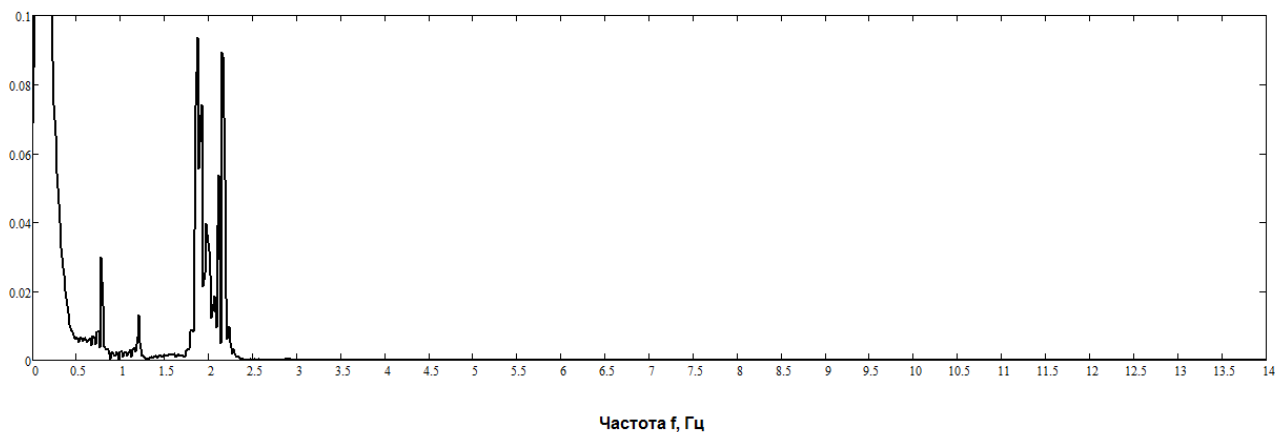


Рисунок 6. Спектральная плотность графика расчетных прогибов среднего сечения балки Б1 при проезде автомобиля КАМАЗ-6520 со скоростью $v = 57,6$ км/ч (выполнено авторами по данным численных расчетов)

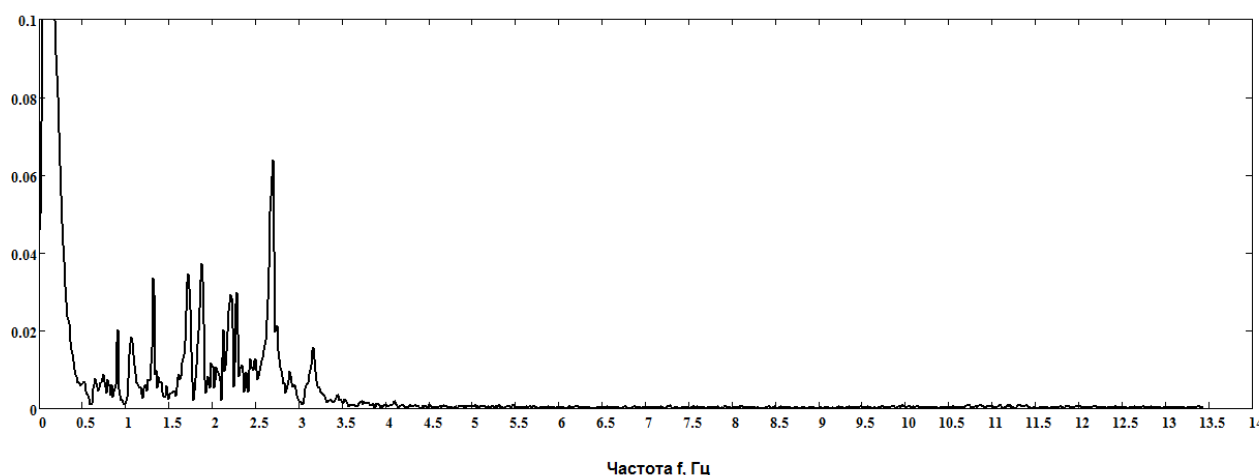


Рисунок 7. Спектральная плотность графика натуральных прогибограмм среднего сечения балки Б1 при проезде автомобиля КАМАЗ-6520 со скоростью $v = 55,3$ км/ч (выполнено авторами по данным натуральных испытаний)

Выводы

1. Выполненная апробация уточненной методики динамического расчета неразрезных пролетных строений мостовых сооружений на действие подвижной автотранспортной нагрузки путем сравнения результатов расчетов с использованием автоматизированных вычислительных комплексов с данными натуральных испытаний подтвердила адекватность получаемых расчетных результатов колебаний неразрезных мостов их действительным параметрам.
2. Вычисленные на основе расчетов динамические коэффициенты при различных скоростях движения и размерах неровностей на проезжей части близки к полученным при натуральных динамических испытаниях.
3. Динамическая составляющая колебаний рассматриваемого пролетного строения, обусловленная влиянием изменений прогибов в точках опирания колес автомобиля на проезжую часть (обратная связь), в сравнении с влиянием неровностей, незначительна.

4. Апробированная методика может эффективно использоваться как при проектировании новых транспортных сооружений, так и при обосновании оптимальных транспортных режимов на эксплуатируемых мостах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krilov A.N. Uber die zwungenen Swingungen von gleichformigen Staben // Mathematische Annalen. 1905. – №5.
2. Schallenkamp A. Swingungen vor Tragern beibewegte Lasten. Ing. Archiv, 1937.
3. Болотин В.В. О воздействии подвижной нагрузки на мосты. – М.: Трансжелдоиздат, 1950 (Труды МИИТ, вып. 74), С. 40–58.
4. Киселев В.А. Динамические линии влияния перемещений и внутренних сил в балках рамах и плитах простых и на упругом основании от груза, движущегося с равномерной скоростью. – М.: Автотрансиздат, 1956, С. 139–171 (Труды МАДИ, вып. 18).
5. Мучников В.М. Некоторые методы расчета упругих систем на колебания при подвижной нагрузке. – М., Л.: Гос. изд. лит. по строит. и архит., 1953. – 112 с.
6. Фрыба Л. Динамический расчет пролетных строений мостов // Строительная механика и расчет сооружений. – М. 1964, №2, С. 24–29.
7. Моргаевский А.Б. О влиянии рессор на динамическую величину динамического эффекта от подвижной нагрузки. В кн.: Исследования по теории сооружений. Вып. XIV. – М.: Стройиздат, 1965, с. 65–71.
8. Сафронов В.С., Барченков А.Г., Котуков А.Н., Мальцев Р.И. К динамическому расчету на АВМ рам и балок при движении подрессоренных грузов // Строительная механика и расчет сооружений. – М. 1968, №5. С. 34–36.
9. Барченков А.Г. Динамический расчет автодорожных мостов. – М.: Транспорт, 1976. – 198 с.
10. Ананьин А.И., Барченков А.Г., Сафронов В.С. Динамика автодорожных мостов. В кн.: Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций. Справочник проектировщика. Москва, 1986, С. 327–348.
11. Сафронов В.С. Расчет висячих и вантовых мостов на подвижную нагрузку. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. 1983. 196 с.
12. Гриднев С.Ю. Развитие динамического расчета автодорожных мостов на подвижную нагрузку. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ВГАСУ. Воронеж. 2013.
13. Шапошников Н.Н., Кашаев А.К., Бабаев В.Б. Расчет конструкций на действие подвижной нагрузки с использованием метода конечных элементов // Строит. механика и расчет сооружений. – 1986. – №1. – С. 50–54.
14. Муравский Г.Б., Поволоцкая М.Ф. К вопросу о действии подвижной нагрузки на деформируемые системы // Строительная механика и расчет сооружений. 1988. №3. – С. 38–43.

15. Сафронов В.С., Антипов А.В. Экспериментально-расчетный анализ резонансных колебаний сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста // Строительная механика и конструкции. – 2012. – Вып. 2(5). – С. 52–59.
16. Сафронов В.С., Антипов А.В. Современные алгоритмы динамического расчета стержневых систем на подвижную подрессоренную нагрузку // Строительная механика и конструкции. – 2018. – Т. 3. – № 18.
17. Сафронов В.С., Антипов А.В. Колебания неразрезного плитного железобетонного моста при проезде трехосного автомобиля // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №2, <https://t-s.today/PDF/12SATS219.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12SATS219.
18. Сафронов В.С., Антипов А.В. Оценка динамических качеств металлического автодорожного моста по данным натурных испытаний и поверочных расчетов // Строительная механика и конструкции. – 2020. – Т. 1. – № 24. – С. 39–53.
19. Бате К., Вилсон Е. Численные метода анализа и метод конечных элементов – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.

Safronov Vladimir Sergeevith

Voronezh state technical university, Voronezh, Russia
E-mail: vss22@mail.ru

Antipov Andrei Vladimirovith

ООО «Dortransproekt», Voronezh, Russia
E-mail: dron_a77@mail.ru

Approbation of an effective method for dynamic calculation of the steel and concrete bridge span

Abstract. Problem statement. The article describes the method and results of determining the dynamic response of a continuous steel-reinforced concrete span of a road bridge to the passage of heavy vehicles, which is focused on the use of finite element computing systems. The data of dynamic calculations are compared with those obtained during full-scale dynamic tests of the operated structure.

Results. Modern algorithms for dynamic calculation of continuous bridge structures on the action of sprung vehicles are analyzed, which allow taking into account the irregularities on the roadway, the influence of wheel bearing point movements on the vibrations of moving vehicles.

It describes the sequence of performing dynamic calculations using modal analysis blocks and dynamic calculation of KE-complexes for a system of moving non-inert loads, followed by calculating the dynamic component of deflections and forces of elements of the bridge structure, taking into account the inertia of the vehicle and unevenness on the roadway.

According modal analysis of steel-concrete span structures road bridge operated by means of spatial finite element calculation schemes are determined by their own shape supporting structure, which are then used for dynamic calculations in a moving inertial load.

The results of dynamic calculations of the operated road bridge on the action of a three-axle truck moving at a constant speed are presented. Calculated deflections are compared with those obtained during full-scale static tests of the bridge. Numerical calculations estimate the effect of speed, roadway irregularities, and feedback between the vibrations of the bridge and the moving vehicle.

Conclusion. The proposed method of dynamic calculation of bridge structures allows evaluating the dynamic quality of transport structures at the design stage and making optimal design decisions.

Keywords: road bridge; continuous steel-reinforced concrete superstructure; dynamic calculation for mobile inert load; roadway irregularities; feedback; comparison of calculated and full-scale deflections; resonant vibration modes

REFERENCES

1. Krilov A.N. (1905). About the forced vibrations of uniform bars. *Mathematical annals*, 5.
2. Schallenkamp A. (1937). *Vibrations in front of beams moving loads*. Ing. Archive.
3. Bolotin V.V. (1950). O vozdeystvii podvizhnoy nagruzki na mosty. [*On the effects of rolling load on bridges.*] Moscow: Transzheldoizdat, pp. 40–58.
4. Kiselev V.A. (1956). Dinamicheskie linii vliyaniya peremeshcheniy i vnutrennikh sil v balkakh ramakh i plitakh prostykh i na uprugom osnovanii ot gruzha, dvizhushchegosya s ravnomernoy skorost'yu. [*Dynamic lines of the effect of displacements and internal*

- forces in the beams of frames and plates simple and on an elastic base from a load moving at a uniform speed.*] Moscow: Auto Transit, pp. 139–171.
5. Muchnikov V.M. (1953). Nekotorye metody rascheta uprugikh sistem na kolebaniya pri podvizhnoy nagruzke. [*Some methods for calculating elastic systems for vibrations under a moving load.*] Moscow, Leningrad: State Publishing House of Literature on Construction and Architecture, p. 112.
 6. Fryba L. (1964). Dynamic calculation of bridge spans. *Structural mechanics and structural analysis*, 2, pp. 24–29 (in Russian).
 7. Morgaevskiy A.B. (1965). O vliyani ressor na dinamicheskuyu velichinu dinamicheskogo ehffekta ot podvizhnoy nagruzki. [*On the effect of springs on the dynamic value of the dynamic effect of a moving load.*] Moscow: Stroyizdat, pp. 65–71.
 8. Safronov V.S., Barchenkov A.G., Kotukov A.N., Mal'tsev R.I. (1968). To dynamic calculation on AVM frames and beams during the movement of sprung loads. *Structural Mechanics and Structural Analysis*, 5, pp. 34–36 (in Russian).
 9. Barchenkov A.G. (1976). Dinamicheskyy raschet avtodorozhnykh mostov. [*Dynamic calculation of road bridges.*] Moscow: Transport, p. 198.
 10. Anan'in A.I., Barchenkov A.G., Safronov V.S. (1986). Dinamika avtodorozhnykh mostov. [*The dynamics of road bridges.*] Moscow, pp. 327–348.
 11. Safronov V.S. (1983). Raschet visyachikh i vantovykh mostov na podvizhnuyu nagruzku. [*Calculation of suspension and cable-stayed bridges on a moving load.*] Voronezh: Publishing house Voronezh State University, p. 196.
 12. Gridnev S.Yu. (2013). Razvitie dinamicheskogo rascheta avtodorozhnykh mostov na podvizhnuyu nagruzku. [*The development of the dynamic calculation of road bridges on a moving load.*] Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering.
 13. Shaposhnikov N.N., Kashaev A.K., Babaev V.B. (1986). Structural analysis of the action of a moving load using the finite element method. *Structural mechanics and structural analysis*, 1, pp. 50–54 (in Russian).
 14. Muravskiy G.B., Povolotskaya M.F. (1988). To the question of the action of a moving load on deformable systems. *Structural Mechanics and Structural Analysis*, 3, pp. 38–43 (in Russian).
 15. Safronov V.S., Antipov A.V. (2012). Experimental and computational analysis of resonant vibrations of steel-reinforced concrete span of a road bridge. *Structural Mechanics and Structures*, 2(5), pp. 52–59 (in Russian).
 16. Safronov V.S., Antipov A.V. (2018). Modern algorithms for the dynamic calculation of rod systems for a mobile sprung load. *Structural Mechanics and Structures*, 18(3) (in Russian).
 17. Safronov V.S., Antipov A.V. (2019). Vibrations of continuous slab reinforced concrete bridge when driving a three-axle car. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/12SATS219.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/12SATS219.
 18. Safronov V.S., Antipov A.V. (2020). Assessment of the dynamic qualities of a metal road bridge according to field tests and verification calculations. *Structural Mechanics and Structures*, 24(1), pp. 39–53 (in Russian).
 19. Bate K., Vilson E. (1982). Chislennyye metoda analiza i metod konechnykh ehlementov. [*Numerical analysis method and finite element method.*] Moscow: Stroyizdat, p. 448.