Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №2, Том 6 / 2019, No 2, Vol 6 <https://t-s.today/issue-2-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/12SATS219.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS219 (<http://dx.doi.org/10.15862/12SATS219>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

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

For citation:

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

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

Колебания неразрезного плитного железобетонного моста при проезде трехосного автомобиля

Аннотация. Постановка задачи. Излагаются методика и ее апробация на реконструированном транспортном сооружении натурных динамических испытаний неразрезного плитного пролетного строения автодорожного моста с использованием уточненного алгоритма динамического расчета на подвижную инертную нагрузку.

Результаты. Анализируются современные методики и алгоритмы расчета транспортных сооружений на подвижную автомобильную нагрузку, которые можно использовать при проектировании и натурных динамических испытаниях автодорожных мостов. Затрагиваются многочисленные факторы влияния, включающие конструктивные особенности несущей системы моста и движущегося экипажа, наличие неровностей на проезжей части и др., которые необходимо учитывать при оценке динамических качеств транспортного сооружения.

Описывается методика проведения и обработки данных натурных динамических испытаний автодорожного моста, при которых изучается динамическая реакция плитного железобетонного пролетного строения на проезд трехосного грузового автомобиля через искусственную одиночную неровность. Выполняется спектральный анализ зарегистрированных виброграмм колебаний, результаты которого сопоставляются со спектром собственных частот пролетного строения.

Выполняется расчетный анализ ситуации проезда автомобиля по проезжей части моста с выделением квазистатической и динамической составляющих колебаний. Для последней

используются низшие собственные формы мостового сооружения, которыми определяются динамические качества транспортного сооружения.

Выводы. Выполненная апробация предлагаемой методики может быть эффективно использоваться как при проведении динамических испытаниях построенных или эксплуатируемых мостов, так и при проектировании новых транспортных сооружений.

Ключевые слова: автодорожный мост; плитное железобетонное пролетное строение; натурные динамические испытания; моделирование; измерения; виброграмма прогибов; спектральный анализ; алгоритм расчётного моделирования; квазистатические и динамические составляющие колебаний

Введение

Современная тенденция роста масс и скоростей движущихся по автомобильным дорогам грузовых автотранспортных средств и появление благодаря использованию высокопрочных материалов облегченных несущих конструкций приводит к повышению важности динамических качеств транспортных сооружений, которые необходимо учитывать при организации движения.

При проектировании новых или на этапе эксплуатации существующих транспортных сооружений действующими нормативными документами не регламентируются динамические качества мостов, от которых зависит реакция несущих конструкций на проезд автомобилей. При приемке вновь построенного сооружения рекомендуется проведение натурных динамических испытаний, однако не разработаны обоснованные методики, с помощью которых можно оценить эксплуатационные качества сооружения и установить режим безопасной эксплуатации. В настоящее время актуальной становится развитие представленной в многочисленных публикациях теории динамического действия подвижной нагрузки на деформируемые системы, основы которой заложены в посвященной математическому решению задачи о движении неинертного груза по шарнирно-опертой балке статье академика А.Н. Крылова [1].

Основные этапы развития теории динамического воздействия до настоящего времени, применяемые модели несущих систем и подвижных нагрузок в работах российских и зарубежных ученых [2–5] описаны в публикации [7]. Интенсивное развитие теории динамического расчёта автодорожных мостов получила на кафедре строительной механики Воронежского инженерно-строительного института. Подробное изложение созданной в Воронеже теории динамического действия подвижной нагрузки на автодорожные мосты приведено в известной монографии [4] и опубликованном в Стройиздате под редакцией проф. Б.Г. Коренева справочнике по динамическому расчету специальных инженерных сооружений и конструкций [5]. Применительно к мостовым сооружениям с нелинейно деформируемыми висячими и вантовыми несущими системами особенности теории изложены в монографии [6].

Выполненные исследования для автодорожных мостов различных несущих систем показывают, что наиболее адекватные действительным колебаниям могут быть получены при использовании динамических моделей нагрузки в виде систем упруго соединенных твердых тел, опирающихся на проезжую часть через односторонние связи. Такие модели позволяют учесть наличие неровностей на проезжей части и влияние связанности в динамической системе «мост-нагрузка». Именно такие представления используются в настоящей статье для оценки динамических качеств транспортного сооружения из сопоставления расчетных и записанных при натурных динамических испытаниях виброграмм колебаний.

Ниже приводится в краткой форме описание этапов предлагаемой методики обработки материалов натурных динамических испытаний мостового сооружения и анализируются результаты ее апробации для реконструированного железобетонного плитного пролетного строения. При ее реализации используются возможности широко распространенной вычислительной программы Mathcad и оснащенного блоком динамического расчета на неинертную подвижную нагрузку конечно-элементного комплекса SAP2000, который реализует современные алгоритмы динамического расчета сооружений и конструкций [10–11].

1. Методика оценки динамических качеств мостовых сооружений по данным натурных динамических испытаний

В соответствии с СП 79 13330.2012 «...динамические испытания проводят с целью выявления величин динамических воздействий, создаваемых реальными подвижными нагрузками или для определения основных динамических характеристик сооружения – периодов и форм собственных колебаний, характеристик декремента затухания колебаний. При испытаниях динамическое воздействие подвижной нагрузки может быть усилено применением искусственных неровностей: порожков высотой 4–5 см, выполненных из досок и уложенных поперек проезда. Заезды выполняются с различными скоростями для выявления характера работы сооружения в диапазоне возможных скоростей движения нагрузки. При этом осуществляется запись показаний электронных измерительных приборов в цифровом виде с обоснованным шагом дискретизации в течение времени, достаточного для получения устойчивых диаграмм колебаний и возможности их анализа.

Разработка программы динамических испытаний и выбор измеряемых параметров колебаний выполняется руководителем работ в зависимости от конструктивных особенностей транспортного сооружения.

По предлагаемой методике анализ записанных виброграмм динамических испытаний включает два этапа. На первом этапе осуществляется определение спектральных плотностей для зарегистрированных виброграмм с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье. После их получения методом исключения отдельных гармоник спектра строятся графики статических деформаций в течение нахождения испытательной нагрузки на мосту и изменения динамических коэффициентов для параметров колебаний путем сопоставления динамических и статических значений изучаемых колебаний.

На втором этапе анализа с помощью обоснованной динамической модели сооружения определяются 3–10 низших частот и соответствующих им форм свободных колебаний незагруженного транспортного сооружения. Сопоставление спектральных плотностей динамических реакций сооружения на проезд с расчетным спектром собственных частот транспортного сооружения позволяет дать предварительную оценку динамических качеств транспортного сооружения.

Окончательный вывод о динамических качествах транспортного сооружения, возможности возникновения резонансных колебаний при эксплуатации осуществляется путем моделирования на ЭВМ ситуаций проезда по транспортному сооружению конкретных автотранспортных средств с использованием методики, предложенной нами в публикации [7]. Ниже в краткой форме приводятся основные положения этой методики.

Сначала, используя образованную на предварительном этапе динамическую конечно-элементную модель моста и оснащенную блоком динамического расчета на неинертную подвижную нагрузку вычислительную программу (например, SAP2000) выполняется расчет моста на действие отвечающих конкретному автомобилю системы вертикальных сосредоточенных сил наиболее важных параметров напряженно-деформированного состояния

в характерных сечениях мостовой конструкции. При этом для получения квазистатической составляющей используется прямое интегрирование уравнений движения с помощью численной пошаговой процедуры методом Ньюмарка [11]. Полученные данные архивируются в виде дискретных массивов для $y_{\text{стат}}(t)$ с заданным шагом.

Далее с использованием найденных ранее методом модального анализа n низших собственных форм $\phi_i(x), i = 1, \dots, n$ моста, дифференциальных уравнений для модели автомобиля [7]:

$$M_a \ddot{Z}(t) + B_a \dot{Z}(t) + C_a Z(t) = \sum_k R_k(Z, y(vt, \eta), h(vt, \eta)), \quad (1)$$

а также типовых дифференциальных уравнений для моста [10]:

$$\ddot{T}_v(t) + K_0 \cdot \omega_v^2 \cdot \dot{T}_v + \omega_v^2 \cdot T_v = \sum_k R_k(\phi_v(vt, \eta) / (\phi_v M_m, \phi_v)) \quad (2)$$

($v = 1, 2, \dots, n$)

вычисляем динамическую составляющую реакции моста на проезд автотранспортного средства.

В уравнениях (1) и (2) введены следующие обозначения:

$Z(t)$ – вектор обобщенных координат динамической модели автомобиля;

$R_k(t)$ – давление k -ой оси автомобиля на мост;

M_m – матрица инертности моста;

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

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

K_0, ω_v – коэффициент неупругого сопротивления и частота собственной формы свободных колебаний несущей мостовой конструкции

Отметим, что для оценки правильности выполняемых расчетов можно использовать близость полученных из эксперимента и расчетов графиков статических составляющих различных параметров (прогибы, напряжения, усилия и т. п.) напряженно-деформированного состояния.

2. Аprobация предлагаемой расчетной методики на примере реконструируемого моста

2.1 Описание объекта исследования

Для апробации описанной выше методики обработки данных динамических испытаний принято реконструируемое под современные временные нагрузки А14 и Н14 неразрезное сборно-монолитное железобетонное плитное пролетное строение моста над водозаборами плотины Нижегородской ГЭС. Пролетное строение реконструированной части автодорожного перехода на участке водозаборов – сборно-монолитное плитное неразрезное, состоящее из 8-и однотипных сборных плит индивидуального изготовления со стержневой арматурой. Ширина сборных плит – 0.9 м, высота – 0.25 м, полная длина сборных плит от 6.2 до 8.2 м. Поперечное объединение сборных плит произведено обетонированием выпусков арматуры через стык «Передерия». Средние монолитные участки образованы за счет перехлеста выпусков из

сборных плит и дополнительно армированы продольной арматурой. Для устройства служебного прохода шириной 0.75 м изготовлен консольный монолитный участок шириной 0.75 м. Кроме того, для повышения несущей способности пролетного строения и создания неразрезной статической схемы над сборными плитами устроена монолитная плита усиления толщиной $12,5 \div 44,0$ см, которая с помощью арматурных выпусков из сборных плит объединена с ними в совместную работу. Сборные плиты установлены на резиновые опорные части: по две РОЧ с каждой стороны плиты. Поперечное сечение неразрезного пролётногo строения по середине одного из однотипных пролётов представлено на рис. 1. Армирование сборных плит, промежуточных участков между сборными плитами, а также консольной плиты с правой стороны приведены в нашей публикации [9], посвященной детерминированной оценке прочности и приближенной оценке риска разрушения пролетного строения реконструируемого моста.

Рисунок 1. Поперечный разрез железобетонного сборно-монолитного плитного неразрезного моста (рисунок разработан авторами по данным натурных измерений)

2.2 Методика проведения динамических испытаний моста

В качестве испытательной нагрузки использовался полностью загруженный самосвал КАМАЗ – 65115 массой 25 т. По результатам взвешивания нагрузка на переднюю ось 4,647 тс, нагрузка на заднюю тележку 20,354 тс. В качестве измеряемых параметров были приняты вертикальные прогибы несущей железобетонной плиты в середине 4-го пролета неразрезного пролётногo строения.

Регистрация колебаний несущей плиты осуществлялась с помощью электронного измерительного комплекса с использованием триангуляционного лазерного датчика серии РФ603 производства ООО «РИФТЕК» республики Беларусь.

При измерениях колебаний регистрация осуществлялась в цифровом виде с частотой $25 \div 28$ Гц. По каналам проводочной связи между измерительными датчиками и портативным компьютером данные регистрации сохранялись массивами десятичных чисел в текстовом файле. При анализе зарегистрированных данных строились графики изменения перемещений плиты в зависимости от времени при проезде по пролетному строению моста грузового автомобиля, а также определялись спектральные плотности амплитуд колебаний с помощью

численной процедуры дискретного прямого быстрого преобразования Фурье (БПФ), реализованной в функциях программного комплекса Mathcad.

2.3 Расчётная схема для определения динамической реакции плиты пролётного строения на проезд тяжёлого транспортного средства

Для пояснения особенностей предлагаемого алгоритма приведем результаты численных исследований совместных колебаний движущегося с постоянной скоростью по проезжей части трёхосного автотранспортного средства и неразрезного плитного пролётного строения моста.

Для моделирования неразрезного плитного пролётного строения используется плоская балочная неразрезная схема из классических стержневых конечных элементов без учёта сдвиговых деформаций в соответствии с балочной моделью Бернулли-Эйлера. Подробное описание дифференциальных уравнений для плоской модели трёхосного грузового автомобиля приведено в нашей публикации [7].

Рисунок 2. Плоская неразрезная балочная расчётная схема для определения динамической реакции плиты проезжей части пролётного строения на проезд тяжёлого транспортного средства (рисунок составлен авторами)

При вычислении квазистатической составляющей реакции несущей плиты на проезд трёхосной подвижной нагрузки использовалось прямое интегрирование уравнений движения с помощью численной пошаговой процедуры методом Ньюмарка [11]. При этом решении поддресоренный трёхосный автомобиль рассматривался только как силовое воздействие.

Для получения динамической составляющей реакции несущей плиты на проезд инертного трёхосного автомобиля от совместного взаимодействия автомобиля с несущей плитой моста, выполнялось совместное решение дифференциальных уравнений для автотранспортного средства и для несущей мостовой конструкции в программном комплексе Mathcad с использованием встроенной функции, реализующей универсальный гибридный метод Adams/BDF, применяемый для любых (как жестких, так и нежестких) систем ОДУ. Расчётный шаг дискретизации по времени $\Delta t = 0,005$ с. Скорость движения трёхосного грузовика по балке принимается постоянной $v = 40$ км/ч. За время в 5,5с грузовик со скоростью 40 км/ч преодолеет 61,1 м. Задняя 3-я ось грузовика сойдёт с балки по истечении 4,884 с. Начальные условия для находящегося в начале балки поддресоренного трёхосного автомобиля с балансирной подвеской принимаются статическими, для балки – нулевыми. Изучение колебаний мостовой конструкции продолжается и после съезда поддресоренного автомобиля с пролётного строения. В расчетах удерживалось 10 собственных форм. Демпфирование для железобетонных несущих конструкций задавалось по Релею. Логарифмический декремент для железобетонной балки – $\delta = 0,3$. Параметр затухания колебаний балки – $\xi = \delta / (2\pi) = 0,048$.

Неровный путь задавался в виде изолированной искусственной неровности, расположенной вблизи середины исследуемого 4-го пролёта. Длина неровности составляет 0,5 м, высота – 4 см.

Количественные параметры первых 10 собственных форм: периоды и частоты балки представлены в табл. 1, а вид этих собственных форм – на рис. 3.

Рисунок 3. Нормированные собственные формы балки (в динамическом расчёте удерживались наиболее значимые для 4-го пролёта собственные формы №3, №4, №9, №10) (рисунок составлен авторами по результатам модального анализа)

Таблица 1

Параметры удерживаемых собственных форм рассматриваемой балки

Номер формы	Период	Техническая частота	Круговая частота
	с	Гц	рад/с
1	0,113824	8,7855	55,201
2	0,113824	8,7855	55,201
3	0,079846	12,524	78,691
4	0,076675	13,042	81,946
5	0,068487	14,601	91,742

Номер формы	Период	Техническая частота	Круговая частота
	с	Гц	рад/с
6	0,068406	14,619	91,852
7	0,034983	28,585	179,6
8	0,034983	28,585	179,61
9	0,028636	34,921	219,41
10	0,02765	36,167	227,24

Отметим, что для определения динамической составляющей полной реакции в динамическом расчёте удерживались наиболее значимые для 4-го пролёта плиты собственные формы №3, №4, №9, №10.

2.4 Результаты натурных измерений при динамических испытаниях и динамических расчётов колебаний пролетного строения

На рис. 4 представлена зарегистрированная в процессе измерений колебаний прогибограмма наиболее загруженной железобетонной сборной плиты в 4-м пролёте моста, а также соответствующая ей спектральная плотность амплитуд колебаний.

На рис. 4–6 представлены результаты численных расчетов совместных колебаний неразрезной плиты пролетного строения и движущегося по нему с постоянной скоростью транспортного средства.

Квазистатическая составляющая при обработке данных натурных измерений колебаний определялась путем наложения на спектральные плотности амплитуд колебаний частотных прямоугольных окон в диапазоне от 0 до 3.0 Гц, за пределами которых амплитуды колебаний подавлялись, и выполнения обратного быстрого преобразования Фурье ограниченного спектра.

На рис. 4 и 5 плавная синяя сплошная линия соответствует квазистатической реакции несущей железобетонной плиты. Квазистатическая реакция получена при проезде по мосту без динамических воздействий со стороны транспортного средства: на очень низкой скорости, при выключенном двигателе, по мостовому полотну без неровностей и т. д.

На рис. 4 и 5 чёрная сплошная линия с большим количеством изломов соответствует полной динамической реакции несущей железобетонной плиты, для получения которой учитывается скорость движения, при которой автомобиль переезжает искусственную неровность в виде порожка и т. п.

Экспериментальная прогибограмма $y(t)$ (мм) плиты в середине 4-го пролёта

(интервал времени между отсчетами $\Delta t = 0,0381$ с)

Расчётные изменения прогибов $y(t)$ (мм) плиты в середине 4-го пролёта

(интервал времени между отсчетами $\Delta t = 0,005$ с)

Рисунок 4. Экспериментальная и расчётная прогибограммы колебаний железобетонной неразрезной плиты пролётного строения в середине 4-го пролёта при проезде через порожек в виде деревянной доски высотой 4 см трёхосного грузового автомобиля через искусственную неровность (рисунок составлен авторами)

Изгибающий момент $M(t)$ в середине 4-го пролёта плиты в тсм

Давление R1(t) в тс

Давление R2(t) в тс

Рисунок 5. Изменение изгибающего момента $M(t)$ во времени в середине 4-го пролёта неразрезной плиты и динамические давления колёс $Rq(t)$ ($q = 1, 2, 3$) при проезде через порожек в виде деревянной доски высотой 4 см по пролётному строению инертного трёхосного грузового автомобиля через искусственную неровность (рисунок составлен авторами)

Рисунок 6. Расчётная динамическая составляющая прогибов в середине 4-го пролёта железобетонной плиты пролётного строения моста при проезде по нему через порожек в виде деревянной доски (рисунок составлен авторами)

Анализ полученных при апробации методики результатов, которые выборочно представлены в настоящей статье, позволяет дать оценку динамических качеств реконструированного транспортного сооружения. В экспериментах и расчетах не выявлены резонансные режимы колебаний во время и после проезда автомобиля, что позволяет дать удовлетворительную оценку динамических качеств реконструированного сооружения.

Выводы

1. Выполненная апробация предлагаемой методики обработки данных натурных динамических испытаний транспортных сооружений может быть эффективно использоваться как при проведении динамических испытаний построенных или эксплуатируемых мостов, так и при проектировании новых транспортных сооружений.
2. Для обоснования возможностей её применения для различных несущих систем мостовых конструкций и произвольных автотранспортных средств, включая многоосные автопоезда, необходимо продолжить исследования на реальных эксплуатируемых транспортных сооружениях.

3. Для расширения применения в инженерной практике предлагаемой методики следует рекомендовать в применяемых программных комплексах разработку блоков динамического расчета мостовых конструкций на действие движущихся сосредоточенных сил.
4. Применение предлагаемой методики для проектируемых транспортных сооружений позволит обоснованно оценивать динамическую реакцию мостов на проезд современных тяжелых автомобилей и принимать более обоснованные проектные решения, избегая резонансных колебаний мостовых конструкций как при совпадении частот свободных и вынужденных колебаний, так и в случаях появления известных из теории динамической устойчивости параметрических явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов. А.Н. Вибрации судов. – М.: ОНТИ, 1936, 310 с.
2. 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).
3. Болотин В.В. О воздействии подвижной нагрузки на мосты. –М.: Трансжелдоиздат, 1950 (Труды МИИТ, вып. 74), С. 40–58.
4. Барченков А.Г. Динамический расчет автодорожных мостов. – М.: Транспорт, 1976. – 198 с.
5. Барченков. А.Г. Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций. Динамика автодорожных мостов / А.И. Ананьин, А.Г. Барченков, В.С. Сафронов. Справочник проектировщика. Москва, 1986, С. 327–348.
6. Сафронов В.С. Расчет вантовых и висячих мостов на подвижную нагрузку. Воронеж, Изд-во ВГУ, 196 с.
7. Сафронов В.С. Современные алгоритмы динамического расчета стержневых систем на подвижную подресоренную нагрузку // В.С. Сафронов, А.В. Антипов // Строительная механика и конструкции. – 2018. – Т. 3. – № 18. – С. 81–92.
8. Сафронов В.С. Экспериментально-расчетный анализ резонансных колебаний сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста / В.С. Сафронов, А.В. Антипов // Строительная механика и конструкции. – 2012. – Вып. 2(5). – С. 52–59.
9. Сафронов, В.С. Надежность усиленного накладной плитой плитного пролетного строения автодорожного моста / В.С. Сафронов, А.В. Черников, А.В. Антипов, Н.В. Сафронов, А.С. Суханов // Строительная механика и конструкции. – 2017. – Т. 2. – № 15. – С. 85–94.
10. Бате К., Вилсон Е. Численные метода анализа и метод конечных элементов – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
11. Вилсон Е.Л. Пространственный статический и динамический анализ конструкций. Физический подход с акцентом на сейсмостойкое строительство. – Компьютеры и конструкции, 2002. – 423 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

Vibrations of continuous slab reinforced concrete bridge when driving a three-axle car

Abstract. Problem statement. The technique and its approbation on the reconstructed transport construction of full-scale dynamic tests of the continuous slab span of the road bridge using a refined algorithm of dynamic calculation of the mobile inert load are presented.

Results. The modern methods and algorithms of calculation of transport facilities for mobile road load, which can be used in the design and full-scale dynamic tests of road bridges, are analyzed. Affected by many factors, including design features bearing system of the bridge and the moving crew, the presence of unevenness on the carriageway etc., which need to be considered in the evaluation of the dynamic characteristics of transport facilities.

Describes the methodology and processing of data from the field dynamic testing of a road bridge, which studied dynamic response of a slab of reinforced concrete spans for the passage of a three-axle truck through the artificial a single bump. The spectral analysis of the registered vibration patterns is performed, the results of which are compared with the eigen frequency spectrum of the superstructure.

The calculated analysis of the situation of the vehicle passage on the roadway of the bridge with the allocation of quasi-static and dynamic components of the oscillations is carried out. The latter is used for the lower self-forms a bridge, which defines the dynamic quality transport facilities.

Conclusion. The performed approbation of the proposed technique can be effectively used both in the dynamic tests of constructed or operated bridges, and in the design of new transport facilities.

Keywords: road bridge; slab reinforced concrete superstructure; full-scale dynamic tests; modeling; measurements; vibration deflection; spectral analysis; algorithm of computational modeling; quasi-static and dynamic components of vibrations

REFERENCES

1. Krylov A.N. (1936). Vibratsii sudov. [*Ship vibrations.*] Moscow: ONTI, p. 310.
2. 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 influence of displacements and internal forces in beams of frames and plates simple and on the elastic basis from the load moving with uniform speed.*] Moscow: Autotransmit, pp. 139–171.
3. Bolotin V.V. (1950). O vozdeystvii podvizhnoy nagruzki na mosty. [*On the impact of mobile load on bridges.*] Moscow: Transredes-dates, pp. 40–58.
4. Barchenkov A.G. (1976). Dinamicheskiy raschet avtodorozhnykh mostov. [*Dynamic calculation of road bridges.*] Moscow: Transport, p. 198.
5. Ananyin A.I., Barchenkov A.G., Safronov V.S. (1986). Dinamicheskiy raschet spetsial'nykh inzhenernykh sooruzheniy i konstruktsiy. Dinamika avtodorozhnykh mostov. [*Dynamic calculation of special engineering structures and structures. Dynamics of road bridges.*] Moscow, pp. 327–348.
6. Safronov V.S. (n.d.). Raschet vantovykh i visyachikh mostov na podvizhnuyu nagruzku. [*Calculation of cable-stayed and suspension bridges to moving load.*] Voronezh: Publishing house of Voronezh State University, p. 196.
7. Safronov V.S., Antipov A.V. (2018). Modern algorithms for dynamic calculation of rod systems on the moving padrecito load. *Structural mechanics and design*, 18(3), pp. 81–92 (in Russian).
8. Safronov V.S., Antipov A.V. (2012). Experimental and computational analysis of resonance oscillations of the hundred-legalisierung span structures road bridge. *Structural mechanics and design*, 2(5), pp. 52–59 (in Russian).
9. Safronov V.S., Chernikov A.V., Antipov A.V., Safronov N.V., Sukhanov A.S. (2017). Reliability of a road bridge reinforced with an overlay plate of a slab span structure of a highway bridge. *Construction mechanics and structures*, 15(2), pp. 85–94 (in Russian).
10. Bathe K.J., Wilson E.L. (1976). Chislennyye metoda analiza i metod konechnykh ehlementov [*Numerical analysis method and finite element method.*] Moscow.: Stroyizdat, p. 448.
11. Wilson E.L. (2002). Prostranstvennyy staticheskiy i dinamicheskiy analiz konstruktsiy. Fizicheskiy podkhod s aktsentom na seysmostoykoe stroitel'stvo. [*Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering.*] p. 423, ISBN 0-923907-00-9.