

На правах рукописи

Косауров

Косауров Артем Петрович

**МЕТОД ПАССИВНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МОСТОВЫХ
СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛАБЫХ ПРИРОДНЫХ И
ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ).

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, профессор
Курбацкий Евгений Николаевич

Официальные оппоненты:

Овчинников Игорь Георгиевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», кафедра «Транспортное строительство», профессор;

Агеев Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), кафедра «Мосты, тоннели и строительные конструкции», доцент.

Ведущая организация: ОАО «Институт Гипростроймост».

Защита состоится 12 марта 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 999.183.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9 (Минаевский переулок, д. 2, ГУК-7, аудитория 7618).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miiit.ru

Автореферат разослан «___» февраля 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета, кандидат технических наук

Зайцев Андрей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Из содержания программ развития автомобильных дорог, проводимых в последние годы правительствами отдельных областей РФ, по состоянию на начало 2016 г. до 40% мостовых сооружений на автомобильных дорогах отдельных регионов страны находятся в неудовлетворительном состоянии. Также, согласно содержанию проекта, разрабатываемого правительством РФ, «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года»: «На сети железных дорог ОАО «РЖД» эксплуатируется более 30 тыс. мостов, виадуков и путепроводов, из которых 45,2% построены еще в период 1861-1931 гг». Таким образом для мостового хозяйства России сохраняется общая негативная оценка состояния. Данная проблема характерна для большинства развитых стран, размеры мостового хозяйства которых не позволяют своевременно выявлять и устранять дефекты в конструкции. Одним из способов решения данной проблемы является переход от планового подхода к индивидуальному: обслуживание и ремонту каждого моста, на основе данных о его текущем состоянии и динамики изменения состояния в прошлом. При таком подходе, для достижения наилучшего результата, оценка технического состояния сооружения должна даваться с малой периодичностью, поэтому целесообразным является использование постоянной пассивной вибродиагностики технического состояния мостовых сооружений. Данный вид мониторинга не требует применения специальных средств возбуждения колебаний сооружения, позволяет своевременно выявлять повреждения, рассчитать остаточный срок службы мостового сооружения, а также повысить безопасность его эксплуатации. Однако на сегодняшний день применение систем постоянного мониторинга в значительной степени ограничено, что обусловлено недостаточно проработанной нормативной базой, отсутствием методов, позволяющих точно определять место и степень повреждения моста, а также сложностью разработки подобных систем.

Таким образом разработка методов постоянного вибрационного пассивного мониторинга технического состояния мостовых сооружений является в настоящее время актуальной проблемой.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области постоянного вибрационного пассивного мониторинга сооружений занимались следующие авторы: Живаев А.А., Редченко В.П., Кадомцев М.И., Шатилов Ю.Ю., Голубова Т.А., Londono N.A., Neitzel F., Patel S.G., Kim C.W., Wenzel H., Reisharm P.H., Brownjohn J.M., Cury A., Omenzetter P., Lu K., Li Z.X., Chan T.H.T., Fujino Y., Ko J.M., Fu Y., De Wolf J.T. а также специалисты организации «Институт Гипростроймост-СПб».

Методы оценки состояния сооружений при проведении пассивного мониторинга, часто совпадают с теми, которые применяются при проведении активного мониторинга, с использованием специальных систем возбуждения конструкции. В связи с этим следует отметить также следующих авторов, занимавшихся исследованиями в области активного вибрационного мониторинга: Агафонов В.М., Донец Н.А., Цернант А.А., Звягинцева А.Н., Павлова Е.И., Казакевич М.И., Коргина М.А., Лазебник Г.Е., Савин С.Н., Демишин С.В., Ситников И.В., Лянин А.А., Mehmet C., Mufti A., Chowdhury F.H., Raihan M.T., Michael L., Matthias W., Andrea E., Pines D., Emin A., Sikorsky C., Rohrmann R.G., Benzoni G., Bonessio N., Brownjohn J.M., Doebling S.W., Farrar C.R., Ko J.M., Sun Z.G., Aktan A.E., Catbas F.N., Chang S.P., Lee J., Kim S., Tang J., Leu K., Fu Y., Wolf J.T., Mazurek D.F., DeWolf, J.T., Jang S.

На основании проведённого обзора и анализа литературных источников были сформулированы цель и задачи исследования.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка метода постоянной пассивной вибродиагностики технического состояния мостовых сооружений с использованием данных об их колебаниях, вызванных случайными или регулярными слабыми воздействиями природного или техногенного характера.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **основные задачи исследования**:

- анализ нормативных документов, регулирующих проведение пассивного и активного вибрационных мониторингов сооружений;
- анализ и сравнение опыта применения прогрессивных методов пассивного мониторинга технического состояния мостовых сооружений;
- разработка метода мониторинга технического состояния мостовых сооружений по данным об их колебаниях под действием слабых природных и техногенных воздействий;
- разработка расчетной программы для моделирования работы мостовых сооружений под действием случайных или регулярных слабых воздействий природного или техногенного характера;
- исследование влияния температурных изменений и принятых допущений на точность оценки технического состояния мостовых сооружений;
- моделирование движения случайного автомобильного потока по мосту;
- исследование возможности применения данных о колебании мостовых сооружений под действием слабых землетрясений для проведения пассивного вибрационного мониторинга технического состояния конструкции.

В работе представлены результаты теоретических исследований, выполнен анализ и сравнение решений, полученных разными математическими методами.

Научная новизна результатов исследования, полученных автором диссертации, состоит в следующем:

1) предложен метод постоянного пассивного вибрационного мониторинга технического состояния мостовых сооружений с использованием данных об их колебании под действием слабых природных и техногенных воздействий, отличающийся от существующих подходов тем, что позволяет выявить те элементы моста, техническое состояние которых следует определять с использованием индивидуальных датчиков для достижения требуемой точности;

2) исследована возможность проведения постоянного пассивного вибрационного мониторинга мостовых сооружений в случае использования данных об их колебаниях под действием слабых землетрясений;

3) разработан метод оценки технического состояния опор и опорных устройств мостов по данным о колебаниях этих сооружений под действием тормозной автомобильной нагрузки;

4) предложен метод учета влияния изменения температуры на модальные параметры мостовых сооружений при проведении постоянного пассивного вибрационного мониторинга их состояния;

5) разработаны методы построения балочных конечных элементов на двухпараметрическом упругом основании и трехмерных конечных элементов, с использованием теории разработанной д.т.н. Е.Н. Курбацким. Методы отличаются от существующих тем, что в них отсутствует необходимость использования нелогичного моделирования континуума и элементов конструкции моста, сосредоточенными массами и пружинами. На основе этих методов была разработана программа для определения динамических характеристик мостовых сооружений.

Теоретическая значимость работы. Результаты исследований позволяют:

- научно обосновывать применение данных о колебаниях мостов во время землетрясений для оценки технического состояния сооружений;

- моделировать колебания мостовых транспортных сооружений под действием случайных или регулярных слабых воздействий природного или техногенного характера.

Практическая значимость работы. Полученные результаты, выводы и предложения, изложенные в работе, могут быть использованы при проведении постоянного пассивного мониторинга технического состояния мостовых сооружений Российской Федерации.

Методология и методы исследований. В работе использованы методы математической статистики, построение математических моделей рассматриваемых систем, их численный и аналитический анализ, сопоставление результатов, полученных разными методами.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанный метод постоянного пассивного мониторинга мостовых сооружений с использованием данных об их колебании под действием слабых природных и техногенных воздействий;
- разработанный метод оценки технического состояния опор и опорных устройств транспортных мостовых сооружений при проведении постоянного пассивного вибрационного мониторинга;
- предложенные методы построения балочных и трехмерных конечных элементов;
- модель движения случайного автомобильного потока по мосту, позволяющая генерировать функции искусственных транспортных нагрузок на модели автомобильных мостов, с любым требуемым шагом дискретизации по времени;
- предложенный метод учета влияния температуры на модальные параметры сооружений при проведении постоянного пассивного вибрационного мониторинга мостовых сооружений;
- результаты исследования возможности применения данных о колебаниях мостовых сооружений под действием слабых землетрясений для проведения постоянного пассивного мониторинга.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью применения апробированных научных методов. В диссертации используются известные положения теории упругости и теории распространения волн, интегральное преобразование Фурье.

Достоверность исследований подтверждается достаточной сходимостью результатов, полученных с использованием численных методов с результатами более ранних исследований другими авторами. Разработанная модель движения случайного автомобильного потока по мосту базируется на данных отраслевой статистической информации.

Основные научные результаты докладывались:

- на заседании кафедры «Мосты и тоннели» РУТ (МИИТ);

- на второй международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в образовании и науке» г. Чебоксары 10 сентября 2017;
- на всероссийской конференции с международным участием «Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки» г. Москва 19 декабря 2017.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 7 печатных работ, в том числе 4 статьи – в рецензируемых ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения с изложением основных результатов и выводов, списка использованных источников из 153 наименований и содержит 140 страниц, 37 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены степень достоверности и апробация результатов исследования.

В первой главе содержится обзор положений современных нормативных документов, регулирующих проведение вибрационного мониторинга технического состояния мостовых сооружений, а также обзор научных работ, посвященных данному вопросу. Отмечена необходимость учета влияния температурных изменений на модальные параметры мостовых сооружений при проведении вибродиагностики.

Рассмотрены существующие методы определения модальных параметров сооружений, применимые в случае проведения пассивной вибродиагностики мостовых сооружений.

Представлены возможные подходы при проведении постоянной пассивной вибродиагностики мостов, а также сформулированы ее основные этапы.

Во второй главе, разработаны методы построения балочных конечных элементов на двухпараметрическом упругом основании (Уравнение 1) и трехмерных конечных элементов (Уравнение 2), для создания конечно-элементных моделей мостовых сооружений, применимых для проведения их пассивной вибродиагностики. Решения получены с использованием теории разработанной д.т.н. Е.Н. Курбацким.

$$\begin{vmatrix} S_1 & -S_1 \cdot e^{ivh_j} & & & & \\ & S_2 & -S_2 \cdot e^{ivh_j} & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ & & & S_N & -S_N \cdot e^{ivh_j} & \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \dots \\ f_N \\ f_{N+1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_N \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $v_{1,2,3,4} = \pm \sqrt{\frac{s_{1,j} \pm \sqrt{s_{1,j}^2 - 4E_j I_j \cdot s_{2,j}}}{2E_j I_j}}$; $f_j = \begin{vmatrix} \tilde{u}_j \\ \tilde{\varphi}_j \\ \tilde{M}_j \\ \tilde{Q}_j \end{vmatrix}$; $p_j = - \begin{vmatrix} \tilde{p}_{g,j}(v_1) \\ \tilde{p}_{g,j}(v_2) \\ \tilde{p}_{g,j}(v_3) \\ \tilde{p}_{g,j}(v_4) \end{vmatrix}$; $s_2 = bk_{S2}^* - i\omega c_P - \omega^2 \rho A$;

$$s_1 = P - k_T b + \omega^2 \rho I; S_j = \begin{vmatrix} iv_1^3 E_j I_j - iv_1 (P_j - k_{T,j} b_j + \omega^2 \rho_j I_j) & -k_{T,j} b_j - v_1^2 E_j I_j & iv_1 & -1 \\ iv_2^3 E_j I_j - iv_2 (P_j - k_{T,j} b_j + \omega^2 \rho_j I_j) & -k_{T,j} b_j - v_2^2 E_j I_j & iv_2 & -1 \\ iv_3^3 E_j I_j - iv_3 (P_j - k_{T,j} b_j + \omega^2 \rho_j I_j) & -k_{T,j} b_j - v_3^2 E_j I_j & iv_3 & -1 \\ iv_4^3 E_j I_j - iv_4 (P_j - k_{T,j} b_j + \omega^2 \rho_j I_j) & -k_{T,j} b_j - v_4^2 E_j I_j & iv_4 & -1 \end{vmatrix};;$$

$\tilde{u}_{g,j}(\omega)$ - изображение Фурье функции колебания грунта на границе слоя;

$$k_{S2}^* = k_S \left[1 + \frac{\sqrt{k_t}}{b\sqrt{k_s}} \right] (1 - i\xi_S); \tilde{p}_{g,j}(\omega) = \frac{b_j k_{S2,j}^*}{2} \cdot [\tilde{u}_{g,j}(\omega) + \tilde{u}_{g,j+1}(\omega)] \frac{e^{ivh_j} - 1}{iv};$$

N - число конечных элементов; k_S - первый коэффициент постели; j - номер конечного элемента балки; k_T - второй коэффициент постели, для учета непрерывности деформаций грунта; b_j - ширина j -го конечного элемента балки; E_j , I_j , ρ_j - модуль упругости, момент инерции и плотность материала j -го конечного элемента балки; P_j - величина продольной силы в j -м конечном элементе;

$\tilde{u}_j(\omega), \tilde{u}_{j+1}(\omega), \tilde{\varphi}_j(\omega), \tilde{\varphi}_{j+1}(\omega), \tilde{M}_j(\omega), \tilde{M}_{j+1}(\omega), \tilde{Q}_j(\omega), \tilde{Q}_{j+1}(\omega)$ - изображение Фурье функций перемещений, угла поворота, изгибающего момента и поперечной силы на границах j -го конечного элемента соответственно; ξ_S - относительный коэффициент демпфирования грунта.

Уравнение 2, было получено в предположении малых размеров конечных элементов.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 bc \cdot [\sigma_{11}^+ - \sigma_{11}^-] + ac \cdot [\sigma_{21}^+ - \tilde{\sigma}_{21}^-] + ab \cdot [\sigma_{31}^+ - \sigma_{31}^-] + abcD^2 \mu \cdot [U_{C1}^+ + U_{C1}^-] = 0 \\
 bc \cdot [\sigma_{12}^+ - \sigma_{12}^-] + ac \cdot [\sigma_{22}^+ - \sigma_{22}^-] + ab \cdot [\sigma_{32}^+ - \sigma_{32}^-] + abcD^2 \mu \cdot [U_{C2}^+ + U_{C2}^-] = 0 \\
 bc \cdot [\sigma_{11}^+ - \sigma_{11}^-] + ab \cdot [\sigma_{31}^+ - \sigma_{31}^-] + ac \cdot [\sigma_{21}^+ - \tilde{\sigma}_{21}^-] + abcD^2 \mu \cdot [U_{B1}^+ + U_{B1}^-] = 0 \\
 bc \cdot [\sigma_{13}^+ - \sigma_{13}^-] + ab \cdot [\sigma_{33}^+ - \sigma_{33}^-] + ac \cdot [\sigma_{23}^+ - \sigma_{23}^-] + abcD^2 \mu \cdot [U_{B3}^+ + U_{B3}^-] = 0 \\
 ac \cdot [\sigma_{22}^+ - \sigma_{22}^-] + ab \cdot [\sigma_{32}^+ - \sigma_{32}^-] + bc \cdot [\sigma_{12}^+ - \sigma_{12}^-] + abcD^2 \mu \cdot [U_{A2}^+ + U_{A2}^-] = 0 \\
 ac \cdot [\sigma_{23}^+ - \sigma_{23}^-] + ab \cdot [\sigma_{33}^+ - \sigma_{33}^-] + bc \cdot [\sigma_{13}^+ - \sigma_{13}^-] + abcD^2 \mu \cdot [U_{A3}^+ + U_{A3}^-] = 0 \\
 a \cdot Dc \cdot [\sigma_{31}^+ + \sigma_{31}^-] - \mu D [a \cdot [U_{C1}^+ - U_{C1}^-] + c \cdot [U_{A3}^+ - U_{A3}^-]] = 0 \\
 b \cdot Dc \cdot [\sigma_{32}^+ + \sigma_{32}^-] - \mu D [b \cdot [U_{C2}^+ - U_{C2}^-] + c \cdot [U_{B3}^+ - U_{B3}^-]] = 0 \\
 a \cdot Db \cdot [\sigma_{21}^+ + \tilde{\sigma}_{21}^-] - \mu D [a \cdot [U_{B1}^+ - U_{B1}^-] + b \cdot [U_{A2}^+ - U_{A2}^-]] = 0 \\
 c \cdot Db \cdot [\sigma_{23}^+ + \sigma_{23}^-] - \mu D [c \cdot [U_{B3}^+ - U_{B3}^-] + b \cdot [U_{C2}^+ - U_{C2}^-]] = 0 \\
 b \cdot Da \cdot [\sigma_{12}^+ + \sigma_{12}^-] - \mu D [b \cdot [U_{A2}^+ - U_{A2}^-] + a \cdot [U_{B1}^+ - U_{B1}^-]] = 0 \\
 c \cdot Da \cdot [\sigma_{13}^+ + \sigma_{13}^-] - \mu D [c \cdot [U_{A3}^+ - U_{A3}^-] + a \cdot [U_{C1}^+ - U_{C1}^-]] = 0 \\
 bc \cdot [\sigma_{13}^+ - \sigma_{13}^-] + ac \cdot [\sigma_{23}^+ - \sigma_{23}^-] + ab \cdot [\sigma_{33}^+ - \sigma_{33}^-] + abcS^2 (\lambda + 2\mu) \cdot [U_{C3}^+ + U_{C3}^-] = 0 \\
 bc \cdot [\sigma_{12}^+ - \sigma_{12}^-] + ab \cdot [\sigma_{32}^+ - \sigma_{32}^-] + ac \cdot [\sigma_{22}^+ - \sigma_{22}^-] + abcS^2 (\lambda + 2\mu) \cdot [U_{B2}^+ + U_{B2}^-] = 0 \\
 ac \cdot [\sigma_{21}^+ - \tilde{\sigma}_{21}^-] + ab \cdot [\sigma_{31}^+ - \sigma_{31}^-] + bc \cdot [\sigma_{11}^+ - \sigma_{11}^-] + abcS^2 (\lambda + 2\mu) \cdot [U_{A1}^+ + U_{A1}^-] = 0 \\
 abcS [\sigma_{33}^+ + \sigma_{33}^-] - abS (\lambda + 2\mu) [U_{C3}^+ - U_{C3}^-] - cS \lambda [b \cdot (U_{A1}^+ - U_{A1}^-) + a \cdot (U_{B2}^+ - U_{B2}^-)] = 0 \\
 abcS [\sigma_{22}^+ + \sigma_{22}^-] - acS (\lambda + 2\mu) [U_{B2}^+ - U_{B2}^-] - bS \lambda [c \cdot [U_{A1}^+ - U_{A1}^-] + a \cdot [U_{C3}^+ - U_{C3}^-]] = 0 \\
 abcS [\sigma_{11}^+ + \sigma_{11}^-] - bcS (\lambda + 2\mu) [U_{A1}^+ - U_{A1}^-] - aS \lambda [c \cdot [U_{B2}^+ - U_{B2}^-] + b \cdot [U_{C3}^+ - U_{C3}^-]] = 0
 \end{array} \right. , (2)$$

где $D = \pm \frac{\omega}{\beta}$; $S = \pm \frac{\omega}{\alpha}$; $\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ - скорость продольной волны; $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ - скорость поперечной волны; λ - коэффициент Пуассона; μ - модуль сдвига; a, b, c - длины сторон элемента; σ - напряжения на гранях элемента; U - перемещение граней элементов.

Для моделирования автомобильной нагрузки (Рисунок 1) на пролетное строение мостов, при движении произвольного автомобильного потока по проезжей части, использовалась модифицированная модель Нагеля-Шрекенберга. Скорость автомобиля «n» определялась согласно следующему уравнению:

$$V_n(t_k) = V_n(t_k - t_{r,n} - k \cdot \Delta t) + \sum_{k=0}^N \frac{V_{n-1}(t_k - t_{r,n} - N \cdot \Delta t) - V_{n,k}(t_k - t_{r,n} - N \cdot \Delta t)}{t_b / \Delta t}, \quad (3)$$

где $V_{n-1}(t_k - t_{r,n} - k \cdot \Delta t)$ - скорость едущего впереди автомобиля номер «n-1» в момент времени $t_k - t_{r,n} - k \cdot \Delta t$; $N = 1, 2, 3 \dots N_0$; $N_0 = t_b / \Delta t$; $t_{r,n}$ - время реакции водителя автомобиля машины номер «n»; Δt - шаг дискретизации функции скорости

во времени; $t_b = \frac{\Delta V + \sqrt{\Delta V^2 + 2a_N \Delta D}}{a_N}$ - время за которое дистанция между

машинами номер «n» и «n-1» примет значение равное «D»; ΔD - расстояние равное разнице между текущим расстоянием между автомобилями и «D»; $\Delta V = V_{N-1} - V_N$;

$$a_N = \pm 2 \frac{\Delta D - D}{D}, \quad (m / c^2).$$

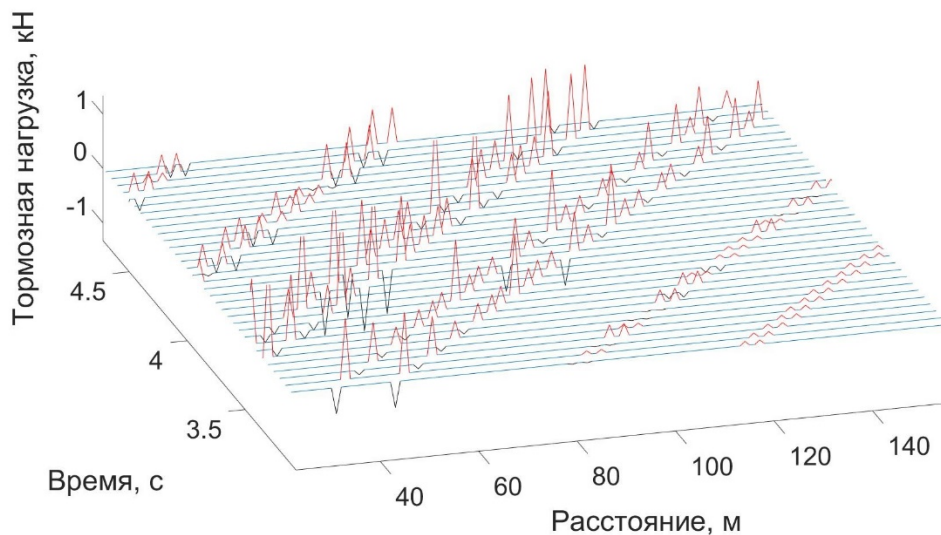


Рисунок 1 – График изменения тормозной нагрузки на пролетное строение моста

В третьей главе, определены средние и максимальные уровни колебания пролетных строений автомобильных мостов. Показана справедливость допущения о

линейной работе автомобильных мостов в случае действия на них эксплуатационных автомобильной и ветровой нагрузок.

Исследовано влияние изменения температуры элементов мостовых сооружений на их модальные параметры. На примере модели неразрезного трехпролетного автомобильного моста на дороге «Адлер – горноклиматический курорт Альпика-сервис», показано влияние изменения температуры материалов моста на его собственные частоты (Рисунок 2). Дальнейшие расчеты проводились с использованием уравнений (1) и (2).

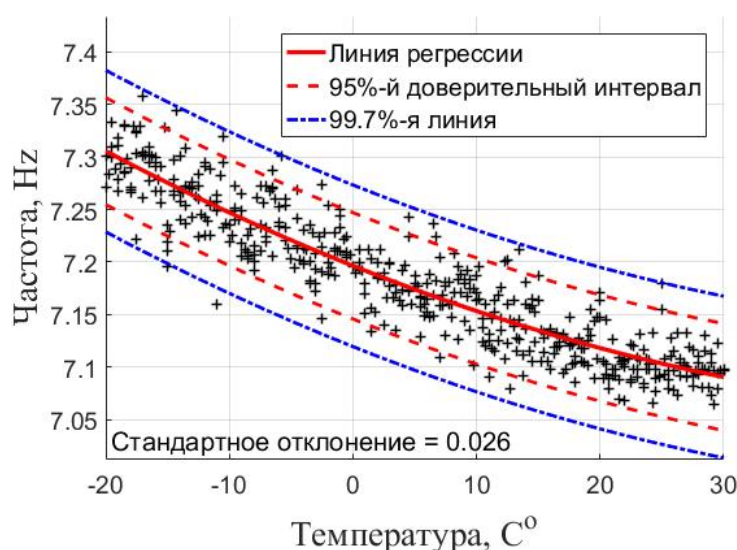


Рисунок 2 – График зависимости значения собственной частоты колебания модели автомобильного моста от температуры

Предложен метод учета влияния температуры на модальные параметры мостовых сооружений при проведении постоянной пассивной вибродиагностики. Метод основан на предположении о малом изменении формы линии регрессии графиков зависимости модальных параметров мостовых сооружений от температуры, в течении всего периода его эксплуатации, без учета проводимых ремонтных работ.

На примере модели моста показано, что для оценки влияния температуры на модальные параметры моста, недостаточно учитывать только изменение параметров

опорных устройств и, следовательно, заранее спрогнозировать приращение модальных параметров моста невозможно (Таблица 1).

Таблица 1 – Значения собственных частот модели моста при изменении температуры его отдельных элементов

Температура	Элементы моста, параметры которых изменялись в зависимости от температуры					
	Всё		Опорные устройства		Всё, кроме опорных устройств	
	f_1 , Hz	f_2 , Hz	f_1 , Hz	f_2 , Hz	f_1 , Hz	f_2 , Hz
-20 °С	7.31	20.90	7.24	20.73	7.16	20.78
30 °С	7.10	20.52	7.09	20.57	7.10	20.56
Величина приращения температуры	0.21	0.38	0.15	0.16	0.06	0.22
Примечание – f_1, f_2 обозначают собственные частоты модели моста.						

Исследовано влияние спектрального состава функций внешних силовых воздействий на точность определения модальных параметров автомобильных мостов, по данным пассивной вибродиагностики. В таблице 2 показаны значения двух собственных частот поперечных колебаний промежуточной опоры модели моста с целым и поврежденным свайным основанием.

Таблица 2 – Значения собственных частот моста с поврежденными сваями

Параметры ряда измерений	$A_p = 1.00 A_0$		$A_p = 0.90 A_0$		$A_p = 0.80 A_0$	
	f_1 , Hz	f_2 , Hz	f_1 , Hz	f_2 , Hz	f_1 , Hz	f_2 , Hz
Среднее значение ряда измерений	7.16	20.64	7.11	20.23	7.06	19.70
Стандартное отклонение измерений	0.04	0.06	0.05	0.07	0.05	0.08
Доверительный интервал	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04
Вероятность наличия повреждения в конструкции сооружения, %	-	-	99	99.9	99.9	99.9
Примечания 1 A_p - площадь верхнего конечного элемента свай в текущем состоянии. 2 A_0 - площадь верхнего конечного элемента свай в целом состоянии.						

В таблице 3 представлены значения отношения амплитуд собственных форм колебания верхней и нижней точек тела промежуточной опоры моста.

Таблица 3 – Значение амплитуд форм колебания промежуточной опоры моста

Параметры ряда измерений	$A_p = 1.00 A_0$		$A_p = 0.90 A_0$		$A_p = 0.80 A_0$	
	f_1, Hz	f_2, Hz	f_1, Hz	f_2, Hz	f_1, Hz	f_2, Hz
Среднее значение	1.28	10.51	1.30	11.87	1.31	12.34
Стандартное отклонение	0.04	0.08	0.05	0.09	0.05	0.10
Доверительный интервал	0.02	0.03	0.03	0.05	0.03	0.06
Вероятность факта наличия повреждения сооружения, %	-	-	<95	99.9	<95	99.9

В таблице 4 представлены значения двух модальных коэффициентов демпфирования модели моста.

Таблица 4 – Значение модального коэффициентов демпфирования, в зависимости от степени повреждения свай

Параметры ряда измерений	$\xi = 0.7\%$		$\xi = 2\%$		$\xi = 4\%$	
	f_1, Hz	f_2, Hz	f_1, Hz	f_2, Hz	f_1, Hz	f_2, Hz
Среднее значение	1.16	0.90	1.16	0.92	1.18	0.95
Стандартное отклонение	0.13	0.14	0.12	0.11	0.15	0.11
Доверительный интервал	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05
Вероятность факта наличия повреждения сооружения, %	-	-	0	<95	<95	<95

Результаты расчетов свидетельствуют о необходимости проведения серии измерений колебаний сооружения для точного определения наличия повреждений в его конструкции и дальнейшей корректировки математической модели. Определение значений модальных коэффициентов демпфирования с точностью достаточной для установления факта наличия повреждений невозможно.

Предложен метод определения технического состояния опор и опорных устройств автомобильных мостов. Для этого были приняты допущения о малой

интенсивности ветровой нагрузки, действующей на опоры вдоль оси моста, и малой величине поперечных прогибов опоры под действием изгибающего момента, действующего в верхней точке опоры. В таком случае передаточную функцию $H_p(\omega)$ верхней точки опоры можно определить используя следующее уравнение:

$$\frac{\tilde{X}_p(\omega)}{\tilde{X}_b(\omega) - \tilde{X}_p(\omega)} \approx H_p(\omega) \cdot [K_b - i\omega C_b], \quad (4)$$

где $\tilde{X}_b(\omega)$ - изображение Фурье функции перемещения пролетного строения; $\tilde{X}_p(\omega)$ - изображение Фурье функции перемещения верха опоры; K_b - жесткость опорного устройства; C_b - коэффициент демпфирования опорного устройства; ω - круговая частота.

Уравнение (4), может быть использовано, для решения следующих задач:

1. Определение значений собственных частот и собственных форм колебания опоры моста, как если бы она была отдельно стоящей без влияния пролетного строения и других опор (Таблица 5).

Таблица 5 – Значения собственных частот поперечных колебаний модели опоры

Параметры ряда измерений	$A_p = 1.00 A_0$.		$A_p = 0.90 A_0$.		$A_p = 0.80 A_0$.	
	f_1 , Hz	f_2 , Hz	f_1 , Hz	f_2 , Hz	f_1 , Hz	f_2 , Hz
Точное значение	6.68	20.19	6.61	19.75	6.53	19.24
Среднее значение	6.68	20.17	6.61	19.70	6.49	19.22
Стандартное отклонение	0.04	0.06	0.12	0.06	0.11	0.05
Доверительный интервал	0.02	0.03	0.08	0.03	0.08	0.03

2. Определение технического состояния опорного устройства. Значение K_b и C_b , входящие в уравнение (4), в случае малой интенсивности воздействий, являются константами, поэтому изменение значения правой части данных уравнений, в случае повреждения опорного устройства, будет отличаться незначительно на всем диапазоне частот, в то время как повреждение опоры главным образом повлияет на значения резонансных частот.

3. Определение положения поврежденного участка опоры. Для этого необходимо дополнительно провести измерение ее колебаний в точках, расположенных ниже верхней, и решить задачу обратную задаче об определении модальных параметров опоры.

В четвертой главе исследована возможность применения данных о колебании мостовых сооружений во время слабых землетрясений для проведения их постоянной пассивной вибродиагностики. Для этого был использован вероятностный метод оценки сейсмической опасности района и получен график (Рисунок 3) зависимости вероятности слабых землетрясений от их периода повторяемости для заданного пикового ускорения колебания скального грунта в районе строительства моста через Керченский пролив.

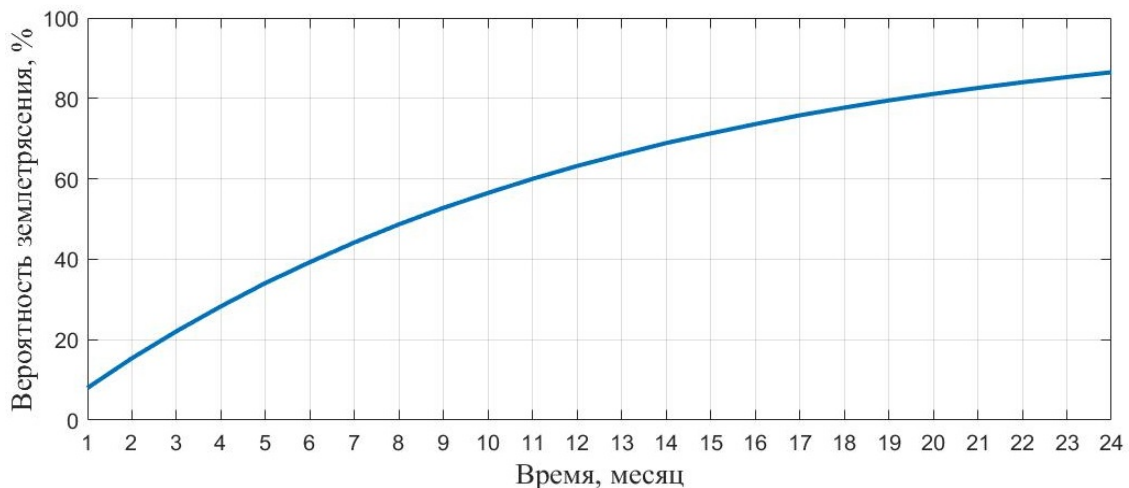


Рисунок 3 – График зависимости вероятности землетрясения с пиковым ускорением на скальном грунте равным 0.025 м/с^2 от периода повторяемости

Район Керченского пролива был выбран, поскольку, согласно картам ОСР-2016, он входит в число наиболее сейсмически опасных районов России и характеризуется высокой современной тектонической активностью (Рисунок 4).

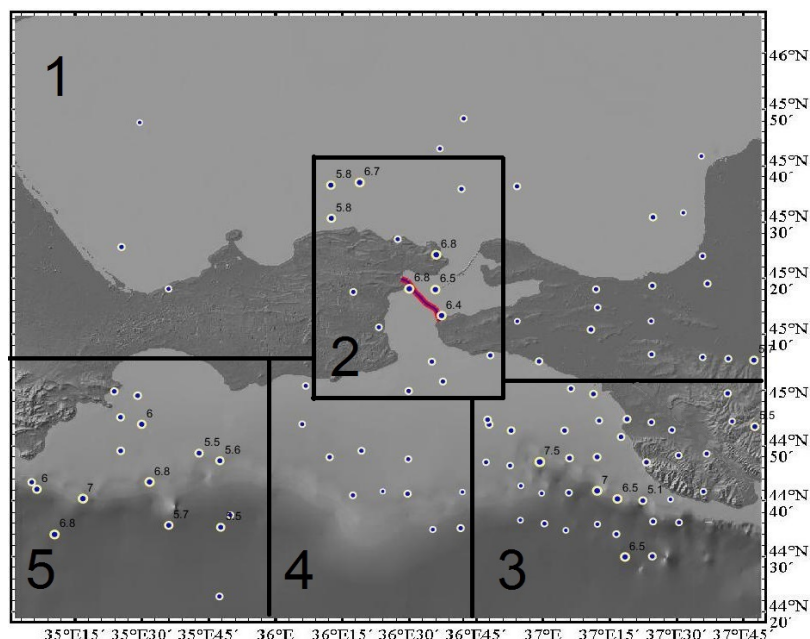


Рисунок 4 – Эпицентры зарегистрированных землетрясений и сейсмогенерирующие зоны

Достоверность проведенных расчетов, подтверждается небольшим расхождением полученных значений пикового ускорения поверхности грунта строительной площадки (Таблица 6) с нормативными значениями, определенными согласно СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» и ОСП-2016 (Таблица 7).

Таблица 6 – Значения ускорения колебаний грунта, определенные в результате проведенного расчета

Значение ускорения колебания грунта	Вероятность превышения пикового значения		
	10%	5%	1%
Средние значения пиковых ускорений	2.5	3.1	4.1
Максимальное значение пикового ускорения	2.8	3.6	5.5

Таблица 7 – Пиковые значения ускорений колебания грунта, определенные согласно положениям СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах»

Параметры землетрясений	Карта ОСП - 2016		
	А	В	С
Пиковое ускорение колебаний грунта (PGA), м/с ²	2.39	4.79	4.79

Проведенные расчеты показали, что использование данных о колебаниях мостов во время слабых землетрясений, для проведения пассивной вибродиагностики сооружений, затруднительно в виду большого периода повторяемости данных событий (Рисунок 3).

Исследовано влияние запаздывания сейсмической волны между опорами моста, а также различие в грунтовых условиях в их основании на точность определения модальных параметров мостов по данным о колебаниях сооружений во время слабых землетрясений. Показано, что запаздывание волны значительно сказывается на точности определения собственных форм колебания сооружения, в случае использования передаточных функций – ошибка может достигать 30% в случае задержки между опорами более 0.1 с. Вместе с тем, запаздыванием волны при определении значений собственных частот сооружений, даже в случае значительного расстояния между опорами, можно пренебречь (Таблица 8).

Таблица 8 – Значения собственных частот модели моста, в случае учета различных грунтовых условий и запаздывания волны

Параметры влияющие на точность определения собственных частот моста		Значения собственных частот моста, Hz					
		Точное значение			Результаты расчетов		
		f_1	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3
Запаздывание сейсмических волн между соседними опорами моста, с	0.05	3.43	7.18	20.64	3.44	7.15	20.63
	0.10				3.47	7.15	20.63
Отличие средних скоростей распространения поперечных сейсмических волн $V_{s,30}$ в грунте в основании опор моста, м/с	50	3.43	6.53	18.60	3.43	6.54	18.61
	100	3.43	5.82	16.50	3.43	5.89	16.57

На основе проведенных автором исследований был сформулирован метод проведения постоянной пассивной вибродиагностики, включающий следующие этапы:

1. Создается конечно-элементная модель сооружения.

2. Определяются типы источников силового и кинематического воздействия на мостовое сооружение, параметры которых позволяют проводить постоянную пассивную вибродиагностику.
3. Осуществляется мониторинг технического состояния наиболее вероятных участков повреждения сооружения:
 - определяются наиболее опасные источники внешнего силового и кинематического воздействия на мостовое сооружение;
 - проводится расчет модели мостового сооружения на возможные сценарии нагружения;
 - проводится анализ возможных повреждений сооружения и построение схемы последовательности повреждений;
 - строятся кривые зависимости вероятности превышения величины предела текучести материалов элементов конструкции или максимально допустимой величины напряжений при неупругих деформациях C_n при заданной величине A , характеризующей интенсивность силового или кинематического воздействия;
 - присваивается соответствующий «вес» каждому из элементов схемы последовательности повреждений конструкции и определяются наиболее вероятные сценарии повреждения сооружения;
 - определяются наиболее вероятные участки повреждения сооружения;
 - определяется чувствительность модальных параметров модели моста к наиболее вероятным повреждениям;
 - дается оценка необходимости осуществления индивидуального мониторинга отдельных наиболее вероятных участков повреждения;
 - определяются типы и места установки датчиков контроля состояния отдельных элементов, а также определяются пределы допустимого изменения их реакций или модальных параметров в зависимости от выбранного оборудования;

- проводится периодическое измерение реакций сооружения в выбранных точках или его модальных параметров, после чего данные параметры сравниваются с допускаемыми значениями.
4. Осуществляется мониторинг общего состояния мостового сооружения.
- проводится периодическое определение значений модальных параметров сооружения с использованием данных о его колебаниях под действием слабых природных и техногенных воздействий;
 - проводится сравнение текущих значений модальных параметров сооружения с эталонными значениями;
 - корректируется эталонная модель моста, с целью определения места и степени повреждения сооружения.
5. Производится поправка динамических параметров эталонной модели сооружения, для учета изменения температуры:
- определяются значения параметров эталонных линий регрессии графиков функций зависимости модальных параметров сооружения от температуры в течении первого полугодия после ввода сооружения в эксплуатацию, ремонтных работ или начала мониторинга;
 - корректируются параметры эталонной модели сооружения в соответствии с текущей температурой.
6. Определяется вероятность того, что отличие статистических параметров эталонной модели и сооружения в его текущем состоянии случайность, с использованием t-теста Стьюдента. Делается вывод о наличии изменений в параметрах конструкции сооружения и их причине.
7. Проводится сравнение максимальных реакций сооружения с допустимыми значениями.
8. В случае выявления наличия повреждения, принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации сооружения в текущем состоянии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый метод проведения пассивной вибродиагностики технического состояния мостовых сооружений. Данный метод позволяет давать оценку технического состояния мостовых сооружений, в случае действия на них слабых природных и техногенных воздействий: движение автомобильного потока, ветровая нагрузка, давление воды на опоры и слабые сейсмические воздействия.
2. Разработан метод оценки технического состояния опор и опорных устройств транспортных мостов, обладающий высокой чувствительностью к наличию повреждений, а также, при достаточном количестве установленных датчиков, позволяющий определить место и степень повреждения опор мостов.
3. Предложен метод учета влияния температурных изменений на модальные параметры мостовых сооружений. Данный метод основан на предположении о малом влиянии слабых повреждений на формы линий регрессии графиков зависимости модальных параметров сооружений от температуры, что подтверждается проведенными расчетами.
4. Разработаны методы построения балочных и трехмерных конечных элементов с использованием теории, описанной в докторской диссертации Е.Н. Курбацкого. Данные методы были использованы при написании программы для определения параметров колебаний моделей мостовых сооружений под действием слабых динамических воздействий природного и техногенного характера. Преимуществами предлагаемых решений являются отсутствие необходимости использования нелогичного моделирования континуума и элементов конструкции моста, сосредоточенными массами и пружинами, а также тот факт, что неизвестными параметрами систем уравнений в первом случае являются внутренние усилия и перемещения, а во втором напряжения и перемещения граней элементов.
5. Выявлена значительная ошибка при определении собственных форм колебания мостовых сооружений по данным об их колебаниях во время землетрясений в следствии запаздывания волны между опорами: ошибка может достигать 30%.

6. Использование допущения о постоянной спектральной мощности функций внешних силовых воздействий при проведении пассивного мониторинга, снижает точность измерений и затрудняет обнаружение наличия слабых повреждений при малом числе измерений.
7. При проведении вибрационного мониторинга технического состояния мостовых сооружений учет влияния температуры на их модальные параметры является обязательным: влияние температуры на собственные частоты может достигать 15% и более. В некоторых случаях, при отрицательных температурах, данное изменение происходит скачкообразно.
8. Определение значений модальных коэффициентов демпфирования мостовых сооружений с точностью достаточной для оценки их технического состояния при проведении пассивного мониторинга затруднительно.
9. Использование данных о колебаниях мостов под действием слабых землетрясений в сейсмоопасных районах, для проведения пассивного мониторинга, возможно только в случае совместного использования этих данных с данными о колебаниях сооружений под действием других типов слабых воздействий.
10. Перспективами дальнейшего развития темы диссертации являются исследование возможности проведения пассивного мониторинга железнодорожных мостов с использованием математических моделей, позволяющих учесть жесткость подвески и массу проходящего транспорта, а также учет, при проведении пассивной вибродиагностики, тех элементов мостовых сооружений, которые не включаются в работу при слабых динамических воздействиях.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций:

1. Курбацкий, Е. Н. К вопросу о пересчете балльности в ускорения колебаний грунта [Текст] / А. П. Косауров, Е. Н. Курбацкий // Инженерные изыскания. – 2016. – №14. – С. 50 – 60.
2. Косауров, А. П. Применение интегрального преобразования Фурье при расчёте конструкций [Текст] / А. П. Косауров // Мир транспорта. – 2016. – № 3(64). – С. 50 – 58.
3. Косауров, А. П. Уточнение исходной сейсмичности района Керченского пролива [Текст] / А. П. Косауров // Строительство и реконструкция. – 2017. – № 5(73). – С. 27 – 33.
4. Курбацкий, Е. Н. Метод защиты сооружений от вибраций и сейсмических воздействий [Текст] / Е. Н. Курбацкий, Е. Ю. Титов, О. А. Голосова, А. П. Косауров // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 1(75). – С. 55 – 67.

- в других изданиях:

5. Косауров, А. П. Расчет свайного фундамента мостов в сейсмоопасных районах [Текст] / А. П. Косауров // Инновационные технологии в образовании и наук. Сборник материалов II-й Международной научно-практической конференции. – Москва, 2017. – С. 291 – 295.
6. Косауров, А. П. Мониторинг состояния мостов во время землетрясения [Текст] / А.П. Косауров // Инновационные технологии в образовании и наук. Сборник материалов II-й Международной научно-практической конференции. – Москва, 2017. – С. 288 – 291.
7. Косауров, А. П. Применение передаточных функций для определения наличия повреждений в свайном основании моста [Текст] / А. П. Косауров // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки. Сборник материалов всероссийской конференции с международным участием. – Москва, 2017. – С. 35 – 41.

Косауров Артем Петрович

**МЕТОД ПАССИВНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МОСТОВЫХ
СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛАБЫХ ПРИРОДНЫХ И
ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

05.23.11 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей»

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать _____.____.2018 г. Заказ № _____ Формат 60x90/16

Тираж 80 экз. Усл. печ. л. 1,75

Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ)