

Научная статья
УДК 624.21/8
doi:10.52170/1815-9265_2026_81_54

Совершенствование вибрационного метода диагностики засыпных мостов из гофрированного металла

Роман Викторович Кузнецов¹, Дмитрий Игоревич Лавров², Стефан Васильевич Ефимов^{3✉},
Анатолий Михайлович Попов⁴

¹ ООО «СТРОЙГРАДЪ», Казань, Россия

² ООО «Архитектурное бюро АБ1», Казань, Россия

^{3,4} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ archroman@yandex.ru

² rabochayapochta2198@gmail.com

³ esvmt@mail.ru✉

⁴ termech@stu.ru

Аннотация. Предложена и экспериментально верифицирована методика количественной оценки напряженно-деформированного состояния засыпных мостов из металлических гофрированных конструкций по данным вибродиагностики. В отличие от известных подходов, ограничивающихся анализом динамических коэффициентов или декрементов, разработанный метод обеспечивает переход от регистрируемых виброускорений к напряжениям. Для этого выполняется двойное численное интегрирование виброускорений с получением динамических перемещений, которые затем пересчитываются в напряжения с использованием верифицированной конечно-элементной модели. Алгоритм предусматривает проведение статических испытаний только на одном объекте группы (базовом), после чего для остальных сооружений применяются лишь динамические испытания. Комплексные испытания пяти однотипных путепроводов, включавшие статическое нагружение автосамосвалами известной массы и синхронную регистрацию деформаций тензорезисторами и виброускорений трехкомпонентными акселерометрами, подтвердили устойчивую корреляцию между напряжениями, восстановленными по вибродиагностике, и непосредственно измеренными при статическом нагружении. Полученные результаты свидетельствуют о применимости метода для оценки технического состояния типовых конструкций без проведения повторных статических испытаний. Разработанная методика позволяет после первичной калибровки выполнять оперативный мониторинг технического состояния МГК-сооружений без остановки движения, что существенно сокращает затраты на обследования и повышает безопасность эксплуатации. В отличие от традиционных статических испытаний, требующих перекрытия движения и значительных временных и финансовых затрат, предложенный метод обеспечивает многократное использование и высокую экономическую эффективность при сохранении достоверности оценки. Установленная корреляционная зависимость между динамическими и статическими напряжениями характеризуется высоким коэффициентом корреляции, что подтверждает надежность предложенного подхода. Благодаря предложенному методу мониторинг засыпных мостов становится быстрым и экономичным, что особенно важно для регулярных обследований большого количества однотипных объектов.

Ключевые слова: вибродиагностика, статические испытания, динамические испытания, динамические характеристики, пролетное строение, металлические гофрированные конструкции, мостовые сооружения

Для цитирования: Совершенствование вибрационного метода диагностики засыпных мостов из гофрированного металла / Р. В. Кузнецов, Д. И. Лавров, С. В. Ефимов, А. М. Попов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 4 (81), спецвыпуск. С. 54–62. DOI 10.52170/1815-9265_2026_81_54.

Original article

Improvement of the vibration diagnostic method for soil-backfilled corrugated metal bridges

Roman V. Kuznetsov¹, Dmitry I. Lavrov², Stefan V. Efimov^{3✉}, Anatoliy M. Popov⁴

¹ STROYGRAD LLC, Kazan, Russia

² Architectural Bureau AB1 LLC, Kazan, Russia

^{3,4} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ archroman@yandex.ru

² rabochayapochta2198@gmail.com

³ esvmt@mail.ru✉

⁴ termech@stu.ru

Abstract. A methodology for the quantitative assessment of the stress-strain state of buried corrugated metal bridges based on vibration diagnostics is proposed and experimentally verified. Unlike known approaches limited to the analysis of dynamic coefficients or decrements, the developed method provides a transition from recorded vibration accelerations to stresses. This is achieved by double numerical integration of vibration accelerations to obtain dynamic displacements, which are then recalculated into stresses using a validated finite element model. The algorithm requires static testing on only one object of a group (reference), after which only dynamic tests are applied to the remaining structures. Comprehensive tests on five similar overpasses, including static loading with dump trucks of known mass and synchronous recording of strains with strain gauges and vibration accelerations with triaxial accelerometers, confirmed a stable correlation between the stresses recovered from vibration diagnostics and those directly measured under static loading. The obtained results confirm the applicability of the method for assessing the technical condition of typical structures without repeating static tests. The developed methodology allows, after initial calibration, to perform operational monitoring of the technical condition of corrugated metal structures without traffic interruption, which significantly reduces survey costs and increases operational safety. In contrast to traditional static tests, which require traffic closure and significant time and financial costs, the proposed method ensures repeated use and high cost-effectiveness while maintaining the reliability of the assessment. The established correlation between dynamic and static stresses is characterized by a high correlation coefficient, confirming the reliability of the proposed approach. Thanks to the proposed method, monitoring of buried bridges becomes fast and cost-effective, which is especially important for regular surveys of a large number of similar structures.

Keywords: vibration diagnostics, static testing, dynamic testing, dynamic characteristics, superstructure, corrugated metal structures, bridge structures

For citation: Kuznetsov R. V., Lavrov D. I., Efimov S. V., Popov A. M. Improvement of the vibration diagnostic method for soil-backfilled corrugated metal bridges. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(81):54–62. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_81_54.

Введение

Металлические гофрированные конструкции (МГК) благодаря малой массе и технологичности широко применяются в транспортном строительстве. Их надежность определяется совместной работой с грунтом обратной засыпки. Периодические статические испытания с тяжелой нагрузкой требуют перекрытия движения и не могут проводиться часто. В процессе эксплуатации под влиянием вибродинамических воздействий и сезонных изменений свойств грунта напряженно-деформированное состояние меняется, что необходимо контролировать.

Вибродиагностика транспортных сооружений традиционно ограничивается определением динамических коэффициентов, частот и декрементов колебаний. Однако для МГК ключевым показателем являются фактические напряжения в элементах. Переход от вибросигналов к количественной оценке напряжений остается нерешенной задачей.

Цель работы – разработка методики вибрационной диагностики МГК-путепроводов, позволяющей по виброускорениям определять напряжения без трудоемких статических испытаний. Для этого выполнены комплексные натурные испытания пяти путепроводов, разработан алгоритм перехода от ускорений к

напряжениям (двойное интегрирование, конечно-элементное моделирование) и установлена корреляционная зависимость.

Проблема расчета МГК с грунтовой засыпкой широко исследована. В [1, 2] показано, что классическое решение задачи Буссинеска дает большие погрешности; учет распределения напряжений по ширине свода и отпора грунта через коэффициент постели снижает ошибку в пять раз.

Зарубежные эксперименты [3] подтвердили высокую надежность МГК (запас несущей способности до 2,5 раз) и пространственный характер работы оболочки. Отечественные исследования [4, 5] также показали, что пространственное конечно-элементное моделирование с учетом физической нелинейности грунта адекватно описывает напряженно-деформированное состояние.

Аналитические методы [6] достаточно объемны, однако полубезмоментная теория оболочек В. З. Власова позволяет учитывать продольные усилия и распределение напряжений по длине сооружения. В [7] установлено, что толщина гофрированного листа наиболее влияет на прочность и вертикальные деформации. В [8] предложен расчет по деформационному критерию с использованием отпора грунта. Работа [9] показала, что изменение частот собственных колебаний свидетельствует

о потере преднапряжения. Исследования, проведенные авторами в [10], посвящены методике динамических испытаний транспортных сооружений, включая способы возбуждения колебаний и обработку вибросигналов. Авария МГК в Крыму [11] доказала, что потеря контакта с грунтом фатальна, что требует мониторинга. В работе [12] приведена методика корреляционного анализа Пирсона, включающая расчет коэффициента корреляции, уравнения линейной регрессии и коэффициента детерминации.

Таким образом, создание оперативного метода определения напряжений в МГК по вибросигналам является актуальной задачей, чему посвящена настоящая работа.

Материалы и методы исследования

Для группы однотипных МГК статические испытания проводят на одном объекте (базовом). По результатам устанавливают корреляционную зависимость между статическими напряжениями и напряжениями, определяемыми по вибродиагностике. Для остальных сооружений группы применяют только динамические испытания. Полный алгоритм (рис. 1) включает: постановку задачи, предварительное построение МКЭ-модели, калибровочные статические испытания на базовом объекте, калибровку модели и установление корреляции, динамические испытания на остальных объектах, обработку сигналов, пересчет перемещений в напряжения, анализ и заключение. В отличие от классической вибродиагностики, статика выполняется лишь на одном объекте группы. Алгоритм верифицирован на пяти путепроводах

(пикеты 492+00, 656+51, 718+87, 790+75, 760+10) на трассе «Шали (М 7) – Бавлы (М 5)» в Татарстане. Все сооружения – двухшарнирные арочные своды из гофрированных стальных листов, радиус свода около 6 м, грунт засыпки – песчаный.

Статические испытания по ГОСТ Р 59618–2021 выполняли двумя гружеными КамАЗ-6520 (общая масса 37,5 т). Использовали симметричные схемы загрузки (рис. 2): нагрузка над левой четвертью, над осью свода и над правой четвертью пролета. Вертикальные перемещения измеряли в пяти контрольных точках центрального сечения (замок, четверти, опоры) с помощью тахеометра и прогибомеров. Напряжения фиксировали тензорезисторами на гребнях и впадинах гофров (система Zetlab) (рис. 3, 4). Конечно-элементную модель (Midas Civil) калибровали по данным статических испытаний, грунт описывали моделью Мора–Кулона (рис. 5).

Динамические испытания проводили при проезде одиночного груженого КамАЗ-6520 через порожек 5 см со скоростью 20 км/ч (рис. 6). Акселерометр ZET 7052-N последовательно устанавливали в тех же контрольных точках, частота дискретизации 200 Гц. Обработка сигналов: фильтрация 0,5–50 Гц, двойное интегрирование (ZETLAB) → динамические перемещения $w_{\text{дин}}$. Пример виброграммы приведен на рис. 7. Затем в модели узлам задавали вычисленные перемещения как кинематические граничные условия и решали квазистатическую задачу для определения напряжений.

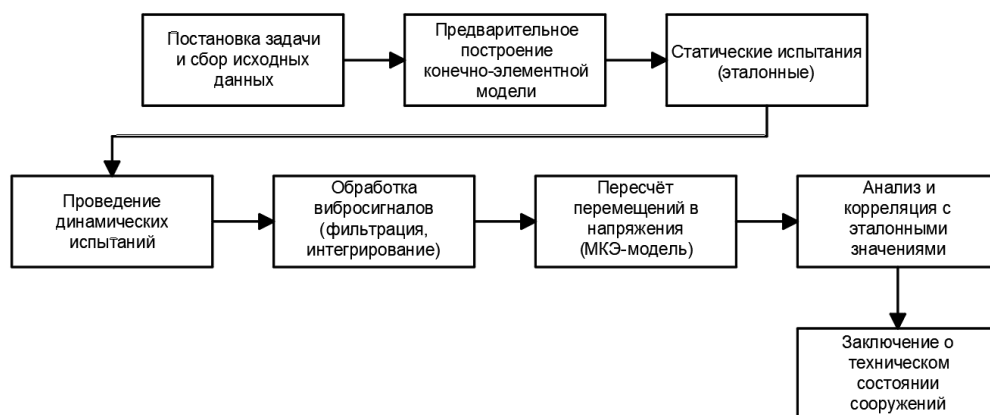


Рис. 1. Алгоритм вибрационной диагностики МГК-путепроводов

Статистическая обработка заключалась в вычислении коэффициента корреляции Пирсона между $\sigma_{\text{стат}}$ и $\sigma_{\text{дин}}$ с определением уравнения линейной регрессии: $\sigma_{\text{дин}} = a \sigma_{\text{стат}} + b$ и коэффициента детерминации $R^2 = r^2$ для всех пяти объектов по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^5 (\sigma_{\text{стат},i} - \bar{\sigma}_{\text{стат}})(\sigma_{\text{дин},i} - \bar{\sigma}_{\text{дин}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^5 (\sigma_{\text{стат},i} - \bar{\sigma}_{\text{стат}})^2 \sum_{i=1}^5 (\sigma_{\text{дин},i} - \bar{\sigma}_{\text{дин}})^2}}. \quad (1)$$

Результаты исследования

В таблице приведены сводные данные по пяти обследованным путепроводам для симметричной схемы загрузки 1.2 (нагрузка над осью).

Динамические перемещения, полученные двойным интегрированием, и рассчитанные по ним напряжения связаны линейной зависи-

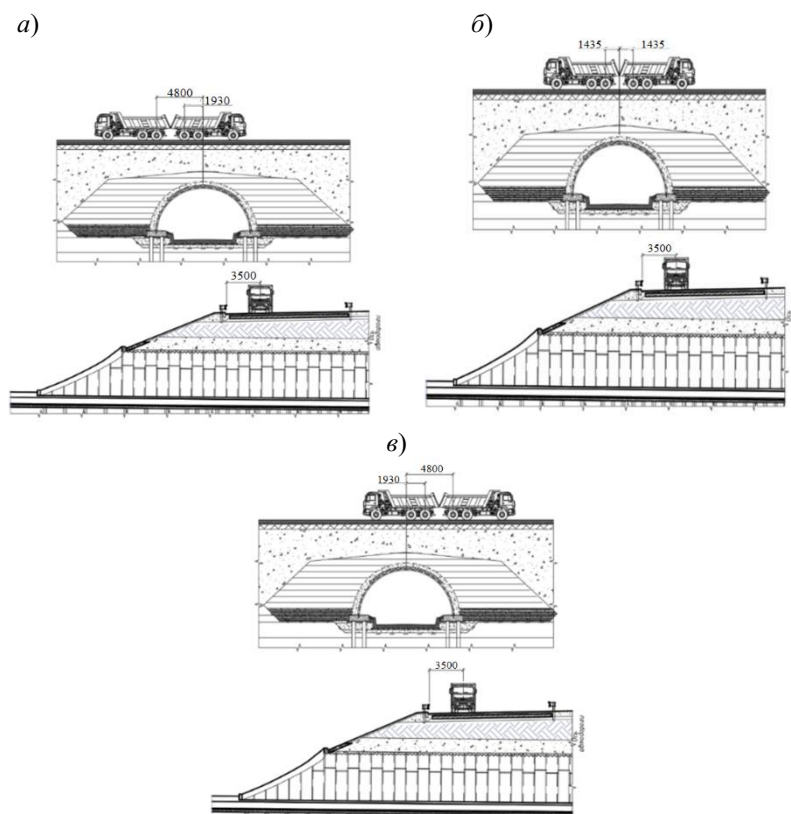


Рис. 2. Схемы загрузки испытательной нагрузкой при статических испытаниях:
а – схема 1.1 (нагрузка над левой четвертью пролета); б – схема 1.2 (нагрузка над осью свода);
в – схема 1.3 (нагрузка над правой четвертью пролета)

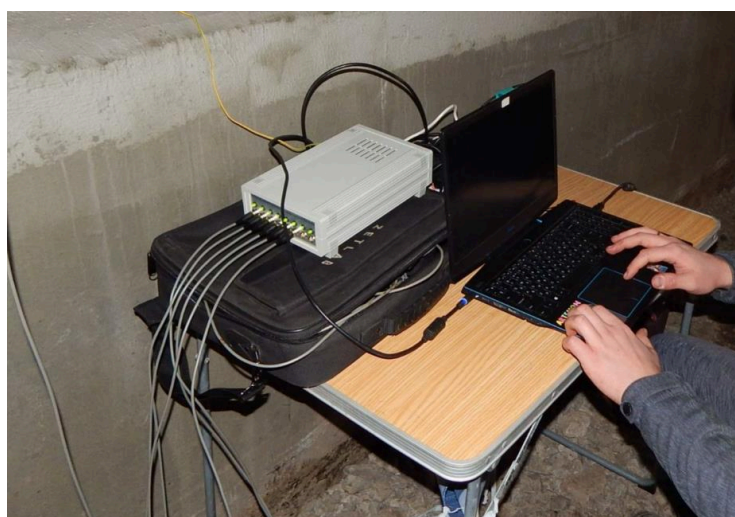


Рис. 3. Оборудование для измерения показаний. (Фото датчиков)

мостью с постоянным коэффициентом (разброс менее 1 %), что подтверждает корректность обработки вибросигналов.

На рис. 8 представлена зависимость динамических напряжений $\sigma_{\text{дин}}$ от статических напряжений $\sigma_{\text{стат}}$. Аппроксимация экспериментальных точек методом наименьших квадратов линейной функцией дала уравнение регрессии: $\sigma_{\text{дин}} = 0,746 \sigma_{\text{стат}} - 2,103$. Коэффициент корреляции Пирсона составил $r = 0,90$, ко-

эффициент детерминации $R^2 = 0,81$, что означает, что 81 % вариации динамических напряжений объясняется изменением статических напряжений. Полученная связь свидетельствует о хорошем согласовании напряжений, определенных по данным вибродиагностики, с напряжениями, непосредственно измеренными при статическом нагружении. Наблюдаемый разброс точек относительно линии регрессии обусловлен влиянием локальных де-



Рис. 4. Крепление тензорезисторов к поверхности гофрированного листа

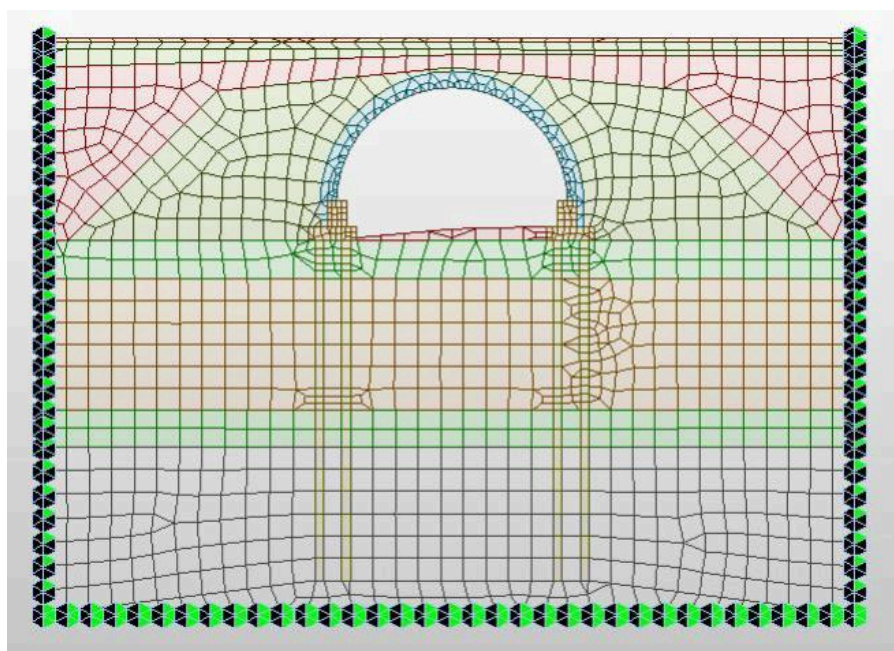


Рис. 5. Конечно-элементная расчетная модель системы «МГК – грунтовая засыпка»

фектов (ослабление болтовых соединений, повреждение цинкового покрытия), неоднородностью физико-механических свойств грунтовой засыпки по длине сооружений, инструментальными погрешностями измерений, а

также погрешностью позиционирования испытательной нагрузки [13].

Полученные результаты демонстрируют, что предложенный подход, основанный на двойном интегрировании виброускорений

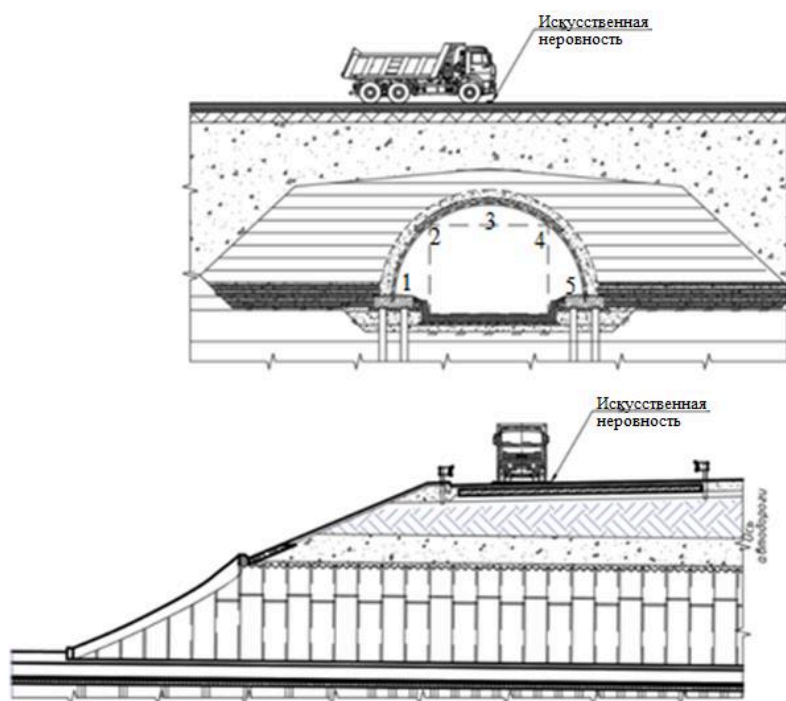


Рис. 6. Схема загрузки при проведении динамических испытаний (проезд через порожек)

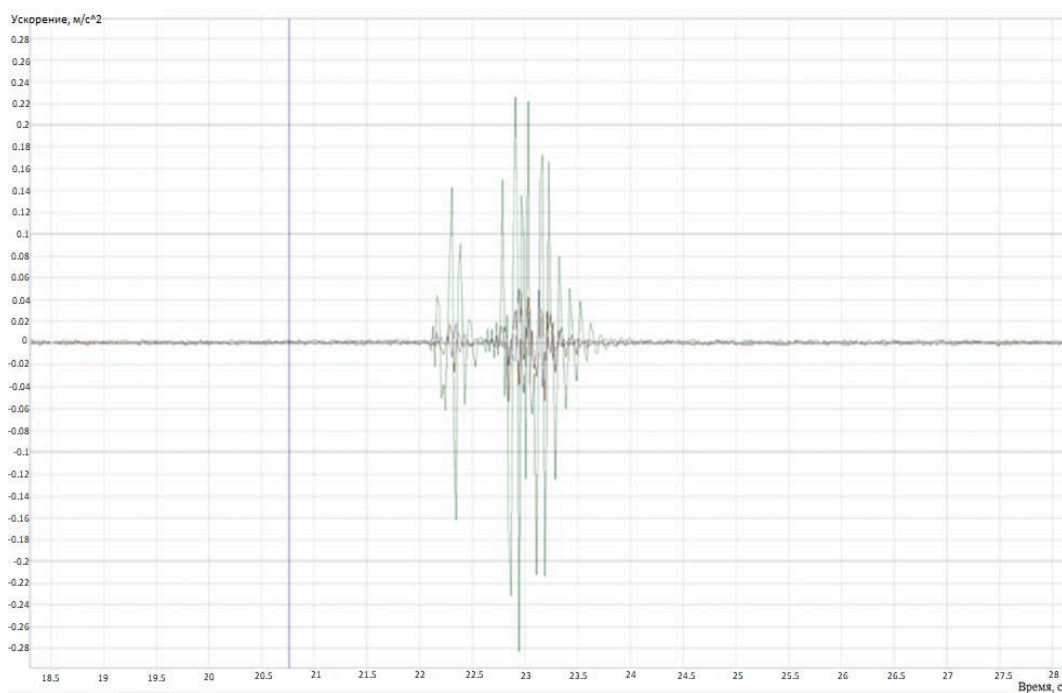


Рис. 7. Виброграмма вертикальных колебаний замка свода при проезде испытательной нагрузки со скоростью 20 км/ч (ПК 492+00)

Сводные данные по обследованным МГК-путепроводам (схема загрузки 1.2)

ПК сооружения	Прогиб стат., мм	$\sigma_{\text{стат}}$, МПа	$W_{\text{дин}}$, мм	Логарифмический декремент затухания ψ (20 км/ч)	$\sigma_{\text{дин}}$, МПа
492+00	0,262	29,0	0,67	0,653	19,5
656+51	0,338	25,3	0,55	0,613	16,0
718+87	0,430	27,2	0,71	0,856	20,5
790+75	0,445	27,7	0,58	0,557	17,0
760+10	0,448	18,8	0,41	0,831	12,0



Рис. 8. Зависимость динамических напряжений от статических

и пересчете перемещений в напряжения с помощью верифицированной МКЭ-модели, позволяет с приемлемой точностью оценить уровень напряжений в МГК-путепроводах по данным вибродиагностики. При таком подходе проведения мониторинга после выполнения калибровочных статических испытаний на одном объекте группы и настройки модели для подобных сооружений можно ограничиться только вибродиагностическими параметрами.

Ограничения метода связаны с необходимостью построения конечно-элементной модели, а также с влиянием локальных повреждений (ослабление болтовых соединений, коррозия) на динамические характеристики, что может искажать корреляционную зависимость.

Выводы

1. В результате натурных статических и динамических испытаний пяти грунтозасыпных путепроводов из металлических гофрированных конструкций получены экспериментальные данные о прогибах, напряжениях и виброускорениях в характерных точках.

2. Предложена и экспериментально обоснована методика количественной оценки напря-

женно-деформированного состояния МГК-путепроводов, позволяющая по данным вибродиагностики определять фактические напряжения в характерных сечениях сооружения на основе верифицированной конечно-элементной модели.

3. Установлена устойчивая корреляционная зависимость между напряжениями, вычисленными по данным вибродиагностики, и напряжениями, непосредственно измеренными при статическом нагружении; коэффициент корреляции Пирсона составил 0,90, что подтверждает возможность косвенной оценки напряженно-деформированного состояния по динамическим параметрам.

4. Разработанная методика позволяет проводить мониторинг технического состояния МГК-путепроводов без остановки движения, что существенно сокращает затраты на обследования и повышает безопасность эксплуатации.

5. Дальнейшие исследования предполагают сбор и увеличение статистических данных для уточнения корреляционных моделей, учета влияния различных типов дефектов на динамические характеристики, а также на автоматизацию обработки вибросигналов для создания портативных диагностических комплексов.

Список источников

1. Пермикин А. С., Овчинников И. И. Применение задачи Буссинеска для определения давления на поверхность грунтозасыпных мостов // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11, № 2. DOI 10.15862/05SATS224.
2. Овчинников И. Г., Пермикин А. С. Применение теории полубезмоментных оболочек В. З. Власова к расчету фибробетонных арочных конструкций и труб // Интернет-журнал Науковедение. 2019. Т. 7, № 6. С. 05KO615.
3. Анализ экспериментальных исследований поведения металлических гофрированных конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок с учетом их совместной работы с окружающим грунтом. Часть 1. Обзор и анализ зарубежных статических экспериментальных исследований / И. Г. Овчинников, В. С. Беляев, Л. С. Яковлев, И. А. Осокин // Интернет-журнал Науковедение. 2013. № 6 (19). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN613.pdf>.
4. Зазвонов В. В. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонного свода грунтозасыпного моста // Строительная механика и конструкции. 2010. № 1. С. 31–40.
5. Сафронов В. С., Зазвонов В. В. Влияние деформационных характеристик песчаной засыпки на напряженно-деформированное состояние грунтозасыпных мостов // Строительная механика и конструкции. 2010. № 1. С. 16–20.
6. Осокин И. А. Совершенствование методов расчета металлических гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2014. 242 с.
7. Новодзинский А. Л., Клевеко В. И. Учет влияния толщины гофрированного элемента на прочность и устойчивость металлической водопропускной трубы // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2012. № 3. С. 88–94.
8. Абрамов В. Н. Способ расчета грунто-стальных арочных гофрированных мостов по деформационному критерию с учетом нелинейной работы // Автомобильные дороги. 2012. № 3. С. 45–48.
9. Кузнецов Р. В., Лавров Д. И. Определение степени снижения грузоподъемности и долговечности преднапряженных мостовых пролетных строений с поперечными стыками по вибрационным параметрам // Дороги и мосты. 2025. № 53/1. С. 145–168. DOI 10.70991/1815-896X-2025-1-53-145-168.
10. Каптелин С. Ю. Испытание сооружений динамическими нагрузками // Известия ПГУПС. 2014. № 2. С. 92–98.
11. Расчетная оценка возможных причин разрушения гофрированной трубы под автомобильной дорогой в Крыму / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников, М. А. Блинков, А. И. Зарудный // Транспортные сооружения. 2017. Т. 4, № 1. DOI 10.15862/01TS117.
12. Саадалов Т. Ы., Мырзаibraимов Р. М., Абдуллаева Ж. Д. Методика расчета коэффициента корреляции Фехнера и Пирсона, и их области применения // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7, № 10. С. 270–276. DOI 10.33619/2414-2948/71/31.
13. Яшнов А. Н., Снежков И. И., Чаплин И. В. Определение доли нагрузки, приходящейся на главную балку пролетного строения, по частотам собственных колебаний // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2015. Т. 1. С. 526–529. EDN RXSLCL.

References

1. Permikin A. S., Ovchinnikov I. I. Application of the Boussinesq problem for determining pressure on the surface of soil-steel bridges. *Transportation Structures*. 2024;11(2). (In Russ.). DOI 10.15862/05SATS224.
2. Ovchinnikov I. G., Permikin A. S. Application of V. Z. Vlasov's semi-momentless shell theory to the calculation of fiber-reinforced concrete arch structures and pipes. *Naukovedenie. Internet Journal*. 2019; 7 (6). P. 05KO615. (In Russ.).
3. Ovchinnikov I. G., Belyaev V. S., Yakovlev L. S., Osokin I. A. Analysis of experimental studies on the behavior of metal corrugated structures under static and dynamic loads, considering their interaction with the surrounding soil. Part 1. Review and analysis of foreign static experimental research. *Naukovedenie. Internet Journal*. 2013; 6(19). (In Russ.). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN613.pdf>.
4. Zazvonov V. V. Computational and experimental study of the stress-strain state of a reinforced concrete arch of a soil-steel bridge. *Structural Mechanics and Structures*. 2010;(1):31–40. (In Russ.).
5. Safronov V. S., Zazvonov V. V. Influence of deformation characteristics of sand backfill on the stress-strain state of soil-steel bridges. *Structural Mechanics and Structures*. 2010; (1): 16–20. (In Russ.).
6. Osokin I. A. Improvement of calculation methods for metal corrugated structures with operational damage: dissertation ... Candidate of Engineering. Yekaterinburg, 2014. 242p. (In Russ.).
7. Novodzinsky A. L., Kleveko V. I. Accounting for the influence of the corrugated element thickness on the strength and stability of a metal culvert. *PNRPU Bulletin. Construction and Architecture*. 2012;(3):88–94. (In Russ.).

8. Abramov V. N. Calculation method for soil-steel corrugated arch bridges based on a deformation criterion considering nonlinear behavior. *Avtomobilnye dorogi*. 2012;(3):45–48. (In Russ.).
9. Kuznetsov R. V., Lavrov D. I. Determination of the degree of reduction in load capacity and durability of prestressed bridge spans with transverse joints based on vibration parameters. *Roads and Bridges*. 2025;(53/1):145–168. (In Russ.). DOI 10.70991/1815-896X-2025-1-53-145-168.
10. Kaptelin S. Yu. Testing of structures under dynamic loads. *Izvestiya PGUPS*. 2014;(2):92–98. (In Russ.).
11. Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Blinkov M. A., Zarudny A. I. Calculation-based assessment of possible causes of failure of a corrugated pipe under a highway in Crimea. *Transportation Structures*. 2017;4(1). (In Russ.). DOI 10.15862/01TS117.
12. Saadalov T. Yu., Myrzaibraimov R. M., Abdullaeva Zh. D. Methodology for calculating the Fechner and Pearson correlation coefficients and their areas of application. *Bulletin of Science and Practice*. 2021;7(10):270–276. (In Russ.). DOI 10.33619/2414-2948/71/31.
13. Yashnov A. N., Snezhkov I. I., Chaplin I. V. Determination of the load share acting on the main girder of a bridge span based on natural vibration frequencies. *Modernization and Research in the Transport Complex*. 2015;1:526–529. (In Russ.). EDN RXSLCL.

Информация об авторах

Р. В. Кузнецов – главный инженер, ООО «СТРОЙГРАДЪ».
Д. И. Лавров – ведущий инженер, ООО «Архитектурное бюро АБ1».
С. В. Ефимов – доцент, кандидат технических наук, директор СибНИИ мостов, доцент кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения.
А. М. Попов – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

R. V. Kuznetsov – Chief Engineer, STROYGRAD LLC.
D. I. Lavrov – Lead Engineer, AB1 Architectural Bureau LLC.
S. V. Efimov – Associate Professor, Candidate of Engineering, Director of SibNII Mostov, Associate Professor of the Bridges Department, Siberian Transport University.
A. M. Popov – Professor, Doctor of Engineering, Head of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 16.04.2026; одобрена после рецензирования 11.05.2026; принята к публикации 26.06.2026.

The article was submitted 16.04.2026; approved after reviewing 11.05.2026; accepted for publication 26.06.2026.