

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права  
УДК 624.21.095.074.04

**ХОДЯКОВ**  
**Вячеслав Андреевич**

**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЙ ДВИЖУЩИХСЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ  
НА БАЛОЧНЫЕ ПРОЛЕТНЫЕ СТРОЕНИЯ АВТОДОРОЖНЫХ  
МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.23.11 – проектирование и строительство дорог,  
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Брест, 2026

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель

**ГРЕЧУХИН Владимир Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели»,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Официальные оппоненты:

**ВЕРЕНЬКО Владимир Адольфович**,  
доктор технических наук, профессор,  
г. Минск;

**НАСКОВЕЦ Михаил Трофимович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры лесных машин, дорог и технологии лесопромышленного производства,  
учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Защита состоится 17 июня 2026 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.09.01 при учреждении образования «Брестский государственный технический университет» по адресу: 224017, г. Брест, ул. Московская, 267, ауд. 5/300. Телефон ученого секретаря +375 29 7225326, e-mail: [vvkravchenko@g.bstu.by](mailto:vvkravchenko@g.bstu.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

Автореферат разослан 14 мая 2026 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 02.09.01,  
кандидат технических наук, доцент



В.В. Кравченко

## ВВЕДЕНИЕ

В составе сети автомобильных дорог общего пользования Республики Беларусь имеется более 5298 мостов и путепроводов общей протяженностью более 187 тысяч погонных метров. В наиболее жестких условиях эксплуатации находятся конструкции деформационных швов мостовых сооружений, подвергающиеся динамическому воздействию транспортных средств. Состояние деформационных швов является важнейшим фактором, влияющим на эксплуатационную надежность и долговечность пролетных строений и мостовых сооружений в целом. Совершенствование методов диагностики технического состояния швов и конструктивных решений по их расположению является важнейшей прикладной научно-технической задачей, на решение которой направлено настоящее диссертационное исследование.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами.** Тема диссертации соответствует пункту 3 перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2021–2025 гг. (Указ Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156) и главе 7 Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года (протокол заседания Президиума Совета Министров Республики Беларусь от 4 февраля 2020 г. № 3).

Результаты диссертационного исследования получены автором при выполнении в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) грантов Министерства образования Республики Беларусь на выполнение научно-исследовательских работ по темам: ГБ 17-08 «Разработка аппаратной сети и программной системы динамического анализа строительных конструкций транспортных сооружений» (№ ГР 20170770); ГБ 19-10 «Оценка динамического воздействия подвижной нагрузки на транспортные сооружения Республики Беларусь» (№ ГР 20191294); ГБ 21-08/13 «Диагностика участков мостового полотна и подходов в зонах устройства деформационных швов на автодорожных мостах» (№ ГР 20211487).

**Цель исследования:** разработать комплекс методов диагностики деформационных швов и решений для снижения динамического воздействия на балочные пролетные строения автодорожных мостовых сооружений при движении по ним транспортных средств.

Для достижения цели исследования были решены следующие **задачи**:  
– выполнен анализ факторов, определяющих уровень динамического воздействия транспортных средств на автодорожные мостовые сооружения, для разработки теоретической модели его оценки;

– проведены расчетные и опытно-экспериментальные исследования для оценки влияния факторов на значение динамического воздействия при движении транспортных средств;

– разработаны и внедрены методики сбора и обработки данных, полученных методом наземного лазерного сканирования, для определения деформаций и перемещений элементов автодорожных мостовых сооружений под действием нагрузок от транспортных средств;

– разработаны методы инструментальной диагностики деформационных швов: по адаптированному показателю IRI и по динамическому отклику пролетного строения вблизи шва;

– разработано и внедрено решение по рациональному расположению деформационного шва относительно пролетного строения, обеспечивающее снижение динамического воздействия до 2 раз.

**Объект исследования:** деформационные швы балочных пролетных строений автодорожных мостовых сооружений и связанные с ними элементы.

**Предмет исследования:** динамическое воздействие на пролетные строения автодорожных мостовых сооружений при движении по ним транспортных средств.

**Научная новизна заключается в:**

– разработанном комплексе методик сбора и обработки данных, полученных методом наземного лазерного сканирования, позволяющих определить вертикальные перемещения пролетного строения и остаточные деформации поверхности проезда;

– разработанном методе диагностики состояния деформационных швов по адаптированному показателю IRI, что позволяет определить уровень ровности поверхности проезда в зоне устройства шва и сформулировать его критическое состояние, требующее выполнения ремонтных работ;

– разработанном методе диагностики состояния деформационных швов по динамическому отклику пролетного строения вблизи шва, что позволяет определить уровень ровности поверхности проезда в зоне устройства шва с учетом фактора жесткости конструкций и сформулировать критическое состояние шва, требующее выполнения ремонтных работ;

– установлении рационального расположения деформационного шва в зоне съезда автомобиля с пролетного строения и обосновании применения опорных частей, обладающих повышенной жесткостью, с целью снижения значения динамического воздействия.

**Положения, выносимые на защиту:**

– метод диагностики деформационных швов по адаптированному показателю IRI, отличающийся тем, что оценка состояния шва выполняется количественно на основании результатов измерений ровности поверхности проезда с применением наземного лазерного сканера, независимо от вида шва, что позволяет снизить динамическое воздействие на пролетное строение за счет

своевременного выявления и устранения дефектов деформационного шва при достижении критического состояния, когда величина среднего показателя IRI в скользящем интервале длиной 0,1 м превышает значение в 25 мм/м;

– метод диагностики деформационных швов по динамическому отклику пролетного строения вблизи шва, отличающийся тем, что оценка состояния шва выполняется качественно на основании результатов измерений, с учетом комплекса факторов ровности поверхности проезда и жесткости конструкций в зоне устройства шва, независимо от его вида, что позволяет снизить динамическое воздействие на пролетное строение за счет своевременного выявления и устранения дефектов деформационного шва при достижении критического состояния, когда размах виброскорости балки пролетного строения на расстоянии 1 м от деформационного шва выше, чем на расстоянии 3 м от деформационного шва при проезде по шву грузового автомобиля со снаряженной массой более 5 т;

– установленное рациональное расположение деформационного шва для автодорожных мостовых сооружений с отдельными пролетными строениями под разные направления движения и одном деформационном шве, отличающееся тем, что шов устраивается в зоне съезда автомобиля с пролетного строения, что снижает динамическое воздействие на него до 2 раз за счет перемещения участка, на котором автомобиль после проезда по неровностям деформационного шва совершает вертикальные колебания, с пролетного строения на подход, а также за счет установки неподвижных полиуретановых опорных частей на опоре в зоне заезда автомобиля на пролетное строение;

– результаты апробации конструктивного решения по расположению деформационного шва в мостовом сооружении, вошедшего в содержание государственного стандарта Республики Беларусь СТБ 2516-2024, а также разработанных методик сбора и обработки данных, полученных методом наземного лазерного сканирования, в государственном предприятии «БелдорНИИ».

**Личный вклад соискателя.** Научные и практические результаты диссертационной работы, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его непосредственном участии под руководством кандидата технических наук, доцента В. А. Гречухина. Соавторы опубликованных работ А. О. Коликов, А. В. Кулан, Е. Н. Савина и Н. И. Шишко оказывали техническую помощь в выполнении измерений и обработке результатов; кандидат технических наук, доцент И. Л. Бойко и кандидат технических наук, доцент В. А. Гречухин принимали участие в обсуждении полученных результатов. В публикации в соавторстве с Ю. И. Павуковым вклад соискателя заключается в разработке рекомендаций по выбору скорости движения испытательной нагрузки.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях и других

мероприятиях: Международной технической конференции «Опыт применения ПК SOFiSTiK при проектировании зданий и сооружений» (БНТУ, г. Минск, 2016 г.); 14-й, 15-й и 17-й научно-технической конференции «Наука – образованию, производству и экономике» (БНТУ, г. Минск, 2016, 2017 и 2019 гг.); 2-й, 3-й и 4-й Международной научно-технической конференции «Дорожное строительство и его инженерное обеспечение» (БНТУ, г. Минск, 2021, 2022 и 2023 гг.); 8-м, 9-м и 11-м Белорусско-Китайском молодежном форуме «Новые горизонты» (БНТУ, г. Минск, 2021, 2022 и 2024 гг.); Международной научно-технической видеоконференции «Разработка инновационных материалов и технологий для дорожно-мостового строительства» (ГП «БелдорНИИ», г. Минск, 2021 г.); 14-м Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (БГТУ им. В. Г. Шухова, г. Белгород, 2022 г.); дважды на Международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (ПНИПУ, г. Пермь, 2022 и 2023 гг.); Международной видеоконференции «Автомобильные дороги: безопасность и надежность» (ГП «БелдорНИИ», г. Минск, 2023 г.); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика» (ПНИПУ, г. Пермь, 2024 г.); 8-й Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых» (СибАДИ, г. Омск, 2024 г.); заседании научного семинара по проблемам транспортного строительства (ТИУ, г. Тюмень, 2024 г.); заседании научно-технического совета ГП «БелдорНИИ» (ГП «БелдорНИИ», г. Минск, 2024 г.); Международной конференции «Мосты союзного государства» (МАДИ, г. Москва, 2024 г.); 10-й Международной научно-практической конференции «Повышение надежности и безопасности транспортных сооружений и коммуникаций» (СГТУ им. Ю. А. Гагарина, г. Саратов, 2024 г.); Международной научно-технической конференции «Новые технологические решения для дорог и мостов в транспортной инфраструктуре» (ГП «БелдорНИИ», г. Минск, 2025 г.).

Научная работа была отмечена стипендией Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым за разработку и внедрение комплексной методики диагностики деформационных швов мостовых сооружений и связанных с ними конструкций с применением трехмерного и тепловизионного сканирования, научное обоснование целесообразности конструктивного изменения полиуретановых опорных частей с повышением их жесткости (распоряжение Президента Республики Беларусь № 241рп от 23 декабря 2022 года, страница 20).

Результаты научных исследований использованы: в государственном стандарте Республики Беларусь СТБ 2516-2024; ГП «БелдорНИИ» при испытании путепровода по пр-ту Победителей через ул. М. Богдановича в г. Минске; в дорожном методическом документе ДМД 33200.032-2024; в учеб-

ном процессе УО «Белорусский государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров по стандартизации, метрологии и управлению качеством» при чтении лекционных занятий слушателями группы «Государственный контроль и надзор за строительством».

**Опубликованность результатов диссертации.** По результатам диссертационных исследований опубликовано 9 научных статей в рецензируемых журналах (объемом 5,1 а. л.), в том числе 6 статей в журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований; опубликовано 26 работ в сборниках материалов конференций и 10 тезисов; получены 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем работы составляет 163 страницы и включает: 86 страниц машинописного текста, 68 рисунков, 14 таблиц, 5 приложений. Библиографический список состоит из 217 наименований, из которых 47 авторские работы.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**В первой главе** дан анализ состояния проблемы динамического воздействия транспортных средств на автодорожные мостовые сооружения. На основании анализа работ Ю. В. Архипенко, В. С. Афанасьева, А. Г. Барченкова, А. И. Васильева, С. Ю. Гриднева, Н. А. Донец, Б. А. Дробышевского, А. В. Ефанова, В. А. Зверинского, С. А. Ильясевича, В. М. Картопольцева, А. В. Картопольцева, Р. Г. Кротова, В. В. Марочка, А. И. Мордича, А. Н. Наумовца, И. Г. Овчинникова, И. И. Овчинникова, Е. И. Павлова, Е. О. Патона, Г. П. Передерия, О. Г. Попелушко, В. П. Редченко, П. М. Саламахина, А. А. Сергеева, М. Е. Соломенцева, Д. Н. Цветкова и др. сделаны следующие выводы.

Основными факторами динамического воздействия являются: ровность поверхности проезда и жесткость конструкций, образующих поверхность проезда, – факторы, определяемые элементами мостовых сооружений; жесткости и массы, характеризующие автомобиль, и скорость движения автомобиля – факторы, определяемые транспортным средством. Вместе с тем частотные характеристики пролетного строения определяют его устойчивость к динамическому воздействию.

Деформационные швы в результате длительной эксплуатации теряют свою ровность и становятся причиной повышения уровня динамического воздействия на мостовые сооружения. Решение этой проблемы возможно путем своевременного выявления критически низкого уровня ровности шва и его последующего ремонта. Однако методы оценки технического состояния швов по критерию ровности сегодня немногочисленны.

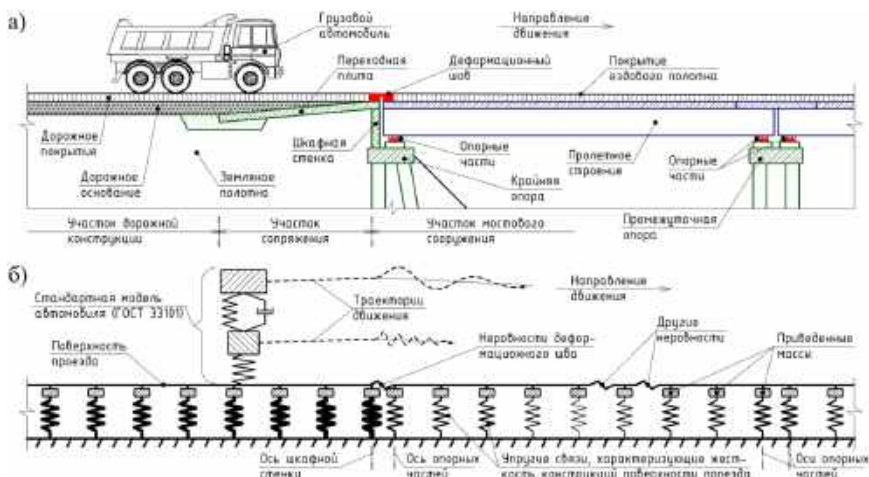
Помимо ровности, важную роль играет неоднородность жесткости конструкций, образующих поверхность проезда. К элементам, вызывающим эту неоднородность, относятся деформационные швы и опорные части. Влияние современных полиуретановых опорных частей на однородность жесткости, а также на устойчивость пролетных строений к динамическому воздействию изучено недостаточно.

Сегодня активно применяются решения по сокращению количества деформационных швов вплоть до устройства на мостовом сооружении только одного шва. Однако влияние места расположения этого шва относительно пролетного строения на значение динамического воздействия движущихся автомобилей изучено не в полном объеме.

На основе анализа сформулированы цель и задачи исследования, приведенные в общей характеристике работы.

**Во второй главе** представлены результаты теоретических исследований влияния выделенных факторов на значение динамического воздействия транспортных средств, а также средства и методы натурных исследований.

Разработана теоретическая модель взаимодействия транспортного средства с инженерными сооружениями (рисунок 1), основными элементами которой являются грузовой автомобиль, дорожная конструкция, конструкция сопряжения и конструкция мостового сооружения.

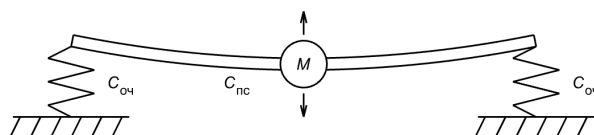


**Рисунок 1 – Взаимодействие транспортного средства с инженерными сооружениями: а – схема основных элементов; б – теоретическая модель взаимодействия**

Стандартная модель автомобиля движется по поверхности проезда, которая разделена на три участка. Поверхность проезда имеет неровности,

главной из которых является деформационный шов. Поддрессоренные и неподдрессоренные элементы автомобиля после проезда по неровностям совершают вертикальные колебания, которые загужают на участке определенной длины. Совокупная жесткость конструкций, образующих поверхность проезда, неоднородна и моделируется упругими связями.

Обратная реакция (отклик) различных мостовых сооружений на одинаковое по уровню динамическое воздействие отличается в зависимости от масс и жесткостей их конструкций. Рассмотрена теоретическая модель системы «пролетное строение – опорная часть» с одной степенью свободы (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Расчетная схема пролетного строения, опертго на упругие опорные части**

При внешнем воздействии на систему приведенная масса пролетного строения  $M$  (кг) будет совершать колебания с некоторой собственной частотой  $f_{пс}$  ( $c^{-1}$ ), которая определяется по формуле

$$f_{пс} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{пс} \cdot 2C_{оч}}{C_{пс} + 2C_{оч}}} / M, \quad (1)$$

где  $C_{пс}$  – приведенная жесткость пролетного строения,  $кг/с^2$ ;

$C_{оч}$  – жесткость опорных частей,  $кг/с^2$ .

Установка опорных частей, обладающих повышенной жесткостью, приводит к увеличению собственной частоты колебаний системы «пролетное строение – опорная часть».

В качестве нагрузки, оказывающей внешнее воздействие на систему, примем периодическую силу, передаваемую колесными осями одиночного движущегося автомобиля; тогда коэффициент динамичности  $\beta$  (доли ед.) определяется зависимостью

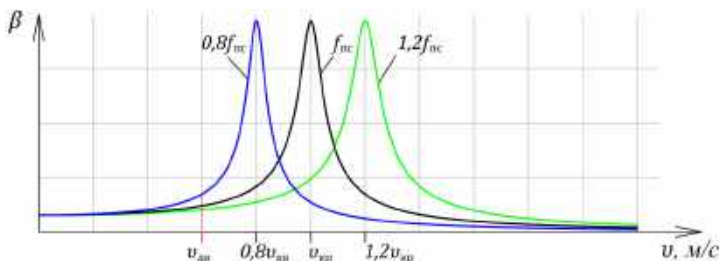
$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{a^2 f_{пс}^2}\right)^2 + \frac{\psi^2}{4\pi^2}}}, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость движения автомобиля,  $м/с$ ;

$a$  – расстояние между колесными осями автомобиля,  $м$ ;

$\psi$  – коэффициент поглощения, доли ед.

Графический анализ зависимости (2) показал, что повышение собственной частоты колебаний  $f_{nc}$  ( $c^{-1}$ ) ведет к пропорциональному увеличению критической скорости  $v_{кр}$  (м/с), при которой возникает резонансное явление (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Зависимость коэффициента динамичности от скорости движения транспортного средства при разных вариантах собственной частоты колебаний системы**

По совокупности вышеизложенного сделан вывод, что движение автомобиля с некоторой скоростью  $v_{дв}$  (м/с) при прочих равных условиях (в том числе постоянном коэффициенте поглощения системы) будет сопровождаться меньшим коэффициентом динамичности при движении по пролетному строению на опорных частях, обладающих повышенной жесткостью.

На основании результатов динамических испытаний автодорожных мостовых сооружений подтверждено влияние скорости движения автомобиля на уровень динамического воздействия с учетом возникающих при движении резонансных явлений. Условием для возникновения таких явлений является сближение двух или более периодов колебаний: периода собственных колебаний системы «пролетное строение – опорная часть»; периода колебаний поддресоренных или неподдресоренных элементов автомобиля; периода между ударами отдельных колесных осей автомобиля об искусственную неровность (доску).

Обоснован недостаток метода оценки динамического воздействия по графику вертикального перемещения пролетного строения в виде несовпадения момента появления пикового значения статического прогиба с пиковым значением виброперемещения. Значение динамического воздействия в данной работе принято определять по наибольшей величине размаха виброскорости пролетного строения при движении по нему одиночного транспортного средства.

Определены средства и методы измерений, а также обработки их результатов, примененные при инструментальных наблюдениях, натурных и лабораторных испытаниях, которые были выполнены с целью оценки взаимодействия элементов разработанной теоретической модели.

Для выполнения измерений были применены: наземный лазерный сканер FARO Focus 3D X 130, виброанализатор ВИБРАН-3 с четырьмя преобразователями 608A11, тензометрический модуль ZET 7110 с проволочными тензорезисторами, тепловизор Testo 875-1i, плотномер грунта ДПП-1.2, цифровой штангенциркуль и индикатор часового типа ИЧ-10. Для испытаний опорных частей на сжатие применялся пресс П-250.

Для обработки полученных результатов измерений было использовано специализированное программное обеспечение: ZETLAB, Вибран-3, Autodesk ReCap и Testo IRSoft. Для более глубокого анализа, с учетом разработанных методик обработки данных, применялось программное обеспечение Microsoft Excel, Grasshopper и Rhinoceros. При обработке результатов наземного лазерного сканирования применялся генетический алгоритм оптимизации.

Для динамических расчетов конструкций использовался программный комплекс SOFiStiK. Для расчета показателя IRI – программный комплекс КРЕДО ДОРОГИ.

**В третьей главе** представлены результаты испытаний, инструментальных наблюдений и расчетов.

При статических испытаниях путепровода получены диаграммы вертикальных перемещений балок пролетного строения при их изгибе. Сбор данных выполнен методом наземного лазерного сканирования. Диаграммы позволили комплексно оценить перемещения на большом участке конструкции, что является преимуществом перед классическим методом сбора данных в отдельных контрольных точках с использованием механических прогибомеров. Разработана методика сбора и обработки данных.

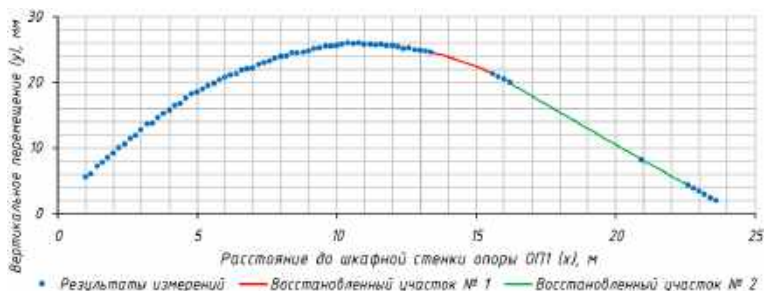
Диаграммы содержат участки, на которых не удалось получить значения перемещений. Для одной из балок выполнено восстановление недостающих участков путем нахождения функций, отражающих характер перемещений, по известным точкам диаграммы (рисунок 4). Получены функции:

$$y = -0,23693 \cdot x^2 + 5,39248 \cdot x - 5,16381, \quad (3)$$

$$y = 0,01165 \cdot x^2 - 2,88845 \cdot x + 63,63555. \quad (4)$$

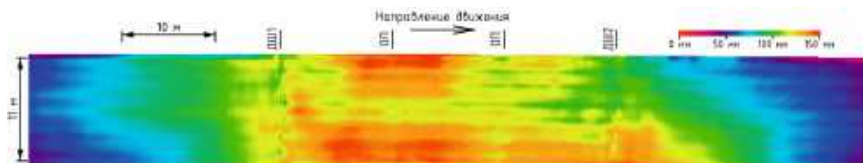
Разработана методика восстановления участков диаграмм, на которых не удалось получить данные о перемещениях. Аналогичная методика применима к результатам сканирования поверхности проезда для восстановления недостающих участков продольного профиля.

Выполнено нормирование точности результатов измерения вертикальных перемещений пролетного строения, полученных методом наземного лазерного сканирования. Обоснована точность  $\pm 0,65$  мм с доверительной вероятностью 95 %. Разработана методика нормирования точности.



**Рисунок 4 – Диаграмма вертикальных перемещений балки при изгибе с восстановленными участками**

На другом путепроводе с применением метода наземного лазерного сканирования получена геометрическая модель поверхности проезда и выполнена оценка ее остаточных деформаций, накопленных в результате многолетней эксплуатации покрытия. Полученные цветные изополя позволили комплексно по одному изображению проанализировать характер и величину деформации поверхности проезда на мостовом сооружении и подходах к нему (рисунок 5). Разработана методика сбора и обработки данных.

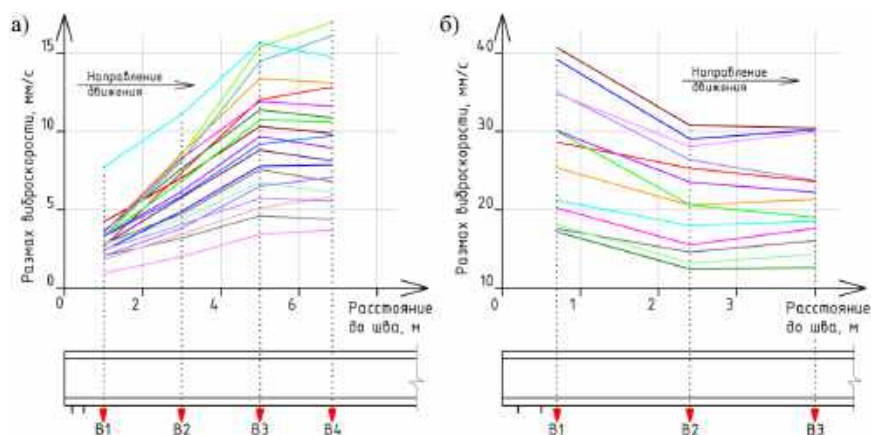


**Рисунок 5 – Изополе относительных высотных отметок покрытия проезжей части (деформационные швы и покрытие возрастом более 10 лет)**

На основании геометрической модели поверхности проезда получены продольные профили по полосам наката. С использованием стандартной модели автомобиля и показателя IRI выполнена оценка ровности продольных профилей. Показано, что диагностика деформационного шва по критерию ровности может быть выполнена путем анализа показателя IRI с использованием стандартной модели автомобиля и контрольного продольного профиля, полученного методом наземного лазерного сканирования. Также путем сравнения результатов измерений и расчетов подтверждена достоверность стандартной модели автомобиля и ее применимость в современных условиях Республики Беларусь.

На нескольких мостовых сооружениях выполнена инструментальная оценка характера и величин размаха виброскорости балок пролетного строения в вертикальном направлении при движении по нему грузовых автомобилей типа МАЗ со снаряженной массой более 5 т (далее также грузовые

автомобили). Результаты получены на участках балок в непосредственной близости от деформационных швов. На швах в хорошем техническом состоянии наблюдается рост размаха виброскорости по мере удаления от шва (рисунок 6а). На швах в неудовлетворительном техническом состоянии наблюдается высокий уровень размаха виброскорости, который снижается первые несколько метров по мере удаления от шва (рисунок 6б). Это объясняется ростом ударного воздействия колес транспортных средств о неровности, которые образуются в результате длительной эксплуатации деформационного шва.

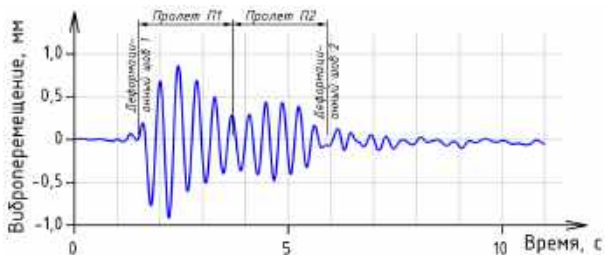


**Рисунок 6 – Диаграммы распределения величины размаха виброскорости:**  
**а – деформационный шов в хорошем техническом состоянии;**  
**б – деформационный шов в неудовлетворительном состоянии**

Выявленная закономерность является основанием для разработки метода инструментальной диагностики деформационных швов по измеренным значениям размаха виброскорости балок пролетного строения от динамического воздействия движущихся по швам грузовых автомобилей.

На нескольких мостовых сооружениях выполнены измерения напряжений, виброперемещений и виброскоростей центральных частей пролетов. Результаты показывают, что на значение динамического воздействия значительно влияет взаимное расположение деформационного шва и пролетного строения. Наличие деформационного шва в зоне заезда автомобиля на пролет П1 вызывает до 2 раз более высокое динамическое воздействие в сравнении с пролетом П2, для которого шов расположен в зоне съезда (рисунок 7).

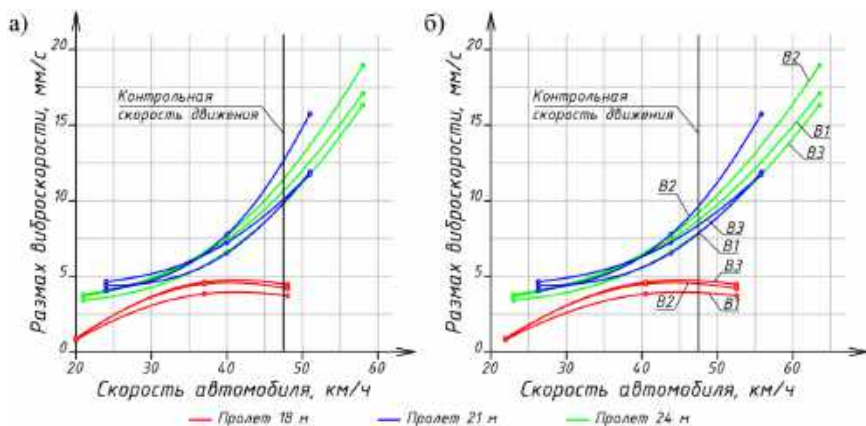
Исследована применимость метода инфракрасной термографии для оценки состояния деформационных швов. Метод позволяет выявлять дефекты швов с резинометаллическим компенсатором на ранних стадиях их развития.



**Рисунок 7 – Диаграмма виброперемещения пролетного строения при проезде по нему грузового автомобиля**

Представлены результаты измерений, позволившие оценить однородность жесткости конструкций, образующих поверхность проезда в зонах устройства деформационных швов: падение жесткости в пределах нескольких метров от шва носит систематический характер.

Выполнены измерения при динамических испытаниях многопролетного путепровода с построением диаграмм влияния скорости движения грузового автомобиля на величину размаха виброскорости центральной части пролетного строения при беспрепятственном движении нагрузки (рисунок 8а).



**Рисунок 8 – Диаграммы влияния скорости движения грузового автомобиля на размах виброскорости: а – в случае применения только ЛПЧ, по результатам полевых испытаний; б – в случае применения ЛПЧ и НПЧ, прогнозируемая**

На основании результатов лабораторных испытаний опорных частей выполнены динамические расчеты нескольких систем «пролетное строение – опорная часть». Доказано, что применение неподвижных полиуретановых опорных частей (НПЧ) на одной из опор пролета повышает частоту собственных колебаний системы на 7,8 % – 11,4 % (таблица 1) в сравнении со

случае применения только линейно-подвижных опорных частей (ЛПЧ). Выполнено моделирование замены опорных частей путем масштабирования графиков по оси абсцисс относительно ноля на усредненное значение в 9,5 % (рисунок 86). Замена на одной из опор пролета ЛПЧ на НПЧ приводит к повышению устойчивости пролетного строения к динамическому воздействию до 23,8 % за счет роста критической скорости движения нагрузки, при которой возникает резонансное явление.

Таблица 1 – Собственные частоты колебаний системы

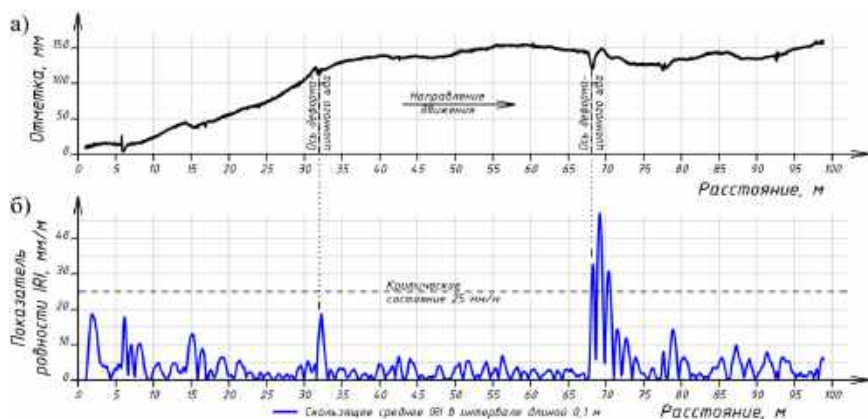
Номер формы колебаний	Вид полиуретановых опорных частей	Частота колебаний, Гц	Изменение частоты колебаний, %	
			относительно ЛПЧ	относительно НПЧ
1	Только ЛПЧ	3,670	0	-7,2
	ЛПЧ и НПЧ	3,956	7,8	0
2	Только ЛПЧ	3,843	0	-8,6
	ЛПЧ и НПЧ	4,206	9,4	0
3	Только ЛПЧ	4,889	0	-10,2
	ЛПЧ и НПЧ	5,446	11,4	0

Выполнено измерение абсолютных упругих деформаций сжатия линейно-подвижной полиуретановой опорной части при движении грузовых автомобилей по мостовому сооружению в режиме неконтролируемого движения (реальной эксплуатации). Измеренные абсолютные деформации составили до 1,38 мм, что свидетельствует о негативном влиянии опорных частей с низкой жесткостью на однородность жесткости конструкций, образующих поверхность проезда над крайней опорой. Применение неподвижных полиуретановых опорных частей, более жестких в сравнении с линейно-подвижными, позволяет снизить негативный эффект.

**В четвертой главе** представлен комплекс методов диагностики деформационных швов и решений для снижения динамического воздействия на пролетные строения автодорожных мостовых сооружений.

*Метод диагностики деформационных швов по адаптированному показателю IRI* разработан для установления критического состояния шва, признаком достижения которого является условие: величина среднего показателя IRI в скользящем интервале длиной 0,1 м превышает значение в 25 мм/м (рисунок 9).

Метод позволяет выполнять количественную оценку технического состояния деформационных швов с учетом фактора ровности поверхности проезда и может быть применен для швов всех видов. Для сбора данных в полевых условиях применяется наземный лазерный сканер с возможностью измерения координат точек на расстоянии до 50 м. По геометрической модели поверхности проезда строятся продольные профили полос наката, которые исследуются с использованием стандартной модели автомобиля.



**Рисунок 9 – Результаты количественной оценки ровности деформационных швов по адаптированному показателю IRI: а – продольный профиль, полученный по результатам наземного лазерного сканирования; б – диаграмма изменения показателя IRI при скорости движения 80 км/ч**

Метод диагностики деформационных швов по динамическому отклику пролетного строения вблизи шва разработан для установления критического состояния шва, признаком достижения которого является условие: размах виброскорости балки пролетного строения на расстоянии 1 м от деформационного шва выше, чем на расстоянии 3 м от деформационного шва при проезде грузового автомобиля типа МАЗ со снаряженной массой более 5 т.

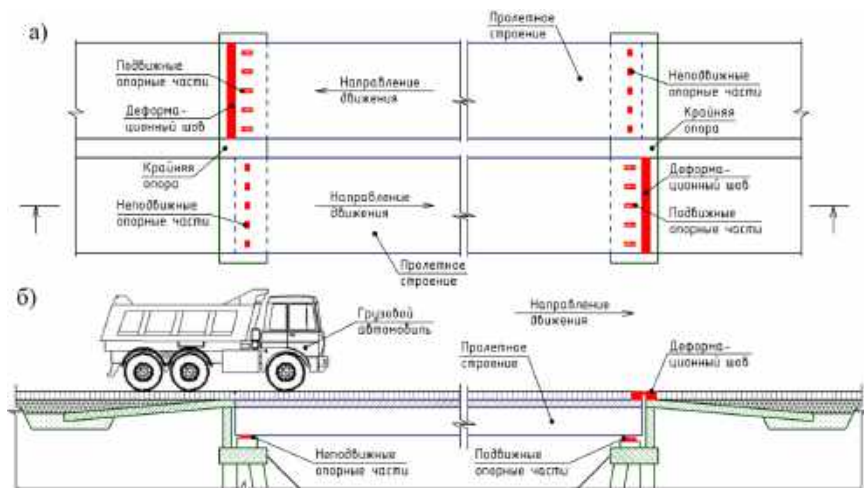
Метод позволяет выполнять качественную оценку технического состояния деформационных швов с учетом факторов ровности поверхности проезда и жесткости конструкций, образующих поверхность проезда, независимо от вида шва. Для реализации метода применяется вибронализатор, позволяющий проводить совокупные измерения в двух и более точках. Преобразователи вибронализатора устанавливаются на нижнюю грань ребра балки, наиболее близкой к центру полосы движения, проходящей под исследуемым участком деформационного шва. Метод разработан для железобетонных автодорожных мостовых сооружений с основной несущей конструкцией в виде ребристых балок.

При выявлении одного из двух критических состояний, установленных вышеприведенными методами, необходимо выполнить ремонт деформационного шва для повышения плавности хода автомобилей и снижения динамического воздействия на пролетное строение. Критические состояния швов могут быть в дальнейшем применены как предельные состояния, что развивает теорию долговечности деформационных швов.

Новые методы диагностики деформационных швов являются инструментальными и дополняют органолептический экспертный метод диагнос-

тики швов. Все измерения проводятся без выхода на проезжую часть, что не требует организации мероприятий по ограничению движения и не создает лишних рисков для людей и имущества.

Решение рационального расположения деформационного шва над крайней по ходу движения транспорта опорой (в зоне съезда автомобиля с пролетного строения) разработано для мостовых сооружений с отдельными пролетными строениями под разные направления движения и одним деформационным швом. В этом случае опирание пролетного строения на крайнюю опору в зоне заезда автомобиля на мостовое сооружение выполняется на неподвижные опорные части, а в зоне съезда – на подвижные (рисунок 10). Решение позволяет до 2 раз снизить динамическое воздействие на пролетное строение, что приводит к увеличению срока его службы до 16 %. Аналогичное по принципу решение применимо на автодорожных мостовых сооружениях с однонаправленным движением.



**Рисунок 10 – Схема рационального расположения деформационного шва на автодорожном мостовом сооружении (шов расположен в зоне съезда автомобиля с пролетного строения): а – вид сверху; б – продольный разрез**

Положительный эффект от применения решения достигается за счет перемещения участка, на котором автомобиль после проезда по неровностям деформационного шва совершает вертикальные колебания, с пролетного строения на подход к мостовому сооружению. Положительный эффект усиливается путем установки неподвижных, более жестких в сравнении с линейно-подвижными, полиуретановых опорных частей на крайней опоре в зоне заезда автомобиля на пролетное строение, что повышает однородность

жесткости конструкций, образующих поверхность проезда. Кроме того, установка неподвижных опорных частей приводит к повышению устойчивости пролетного строения к динамическому воздействию при движении по нему транспортных средств до 23,8 % за счет повышения жесткости и увеличения частоты собственных колебаний системы «пролетное строение – опорная часть».

Решение рационального расположения деформационного шва в зоне съезда автомобиля с пролетного строения применимо в комплексе с известными решениями объединения разрезных пролетных строений в неразрезные или температурно-неразрезные плети, выноса деформационного шва за пределы опоры и объединения плиты пролетного строения с переходной плитой. Решение разработано для малых и средних железобетонных автодорожных мостовых сооружений балочной статической схемы.

Материалы диссертационного исследования прошли апробацию в государственном предприятии «БелдорНИИ», учреждении образования «Белорусский государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров по стандартизации, метрологии и управлению качеством», а также вошли в содержание государственного стандарта Республики Беларусь СТБ 2516-2024 и дорожного методического документа ДМД 33200.032-2024.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработаны научные и практические основы инструментального контроля технического состояния (диагностики) деформационных швов автодорожных мостовых сооружений и конструктивного решения по его расположению в мостовом сооружении, обеспечивающие снижение величины динамического воздействия на мостовые конструкции и повышение срока их службы [1–47].

2. Разработан комплекс методик сбора и обработки данных, полученных методом наземного лазерного сканирования, обеспечивающий получение диаграмм вертикальных перемещений при изгибе пролетного строения под действием нагрузок от транспортных средств, что позволяет комплексно оценить величину перемещений на большом участке конструкции с погрешностью  $\pm 0,65$  мм при обеспеченности 95 %, а также получение изополей остаточных деформаций поверхности проезда, что позволяет комплексно оценить величину деформаций по всей ширине проезжей части на мостовом сооружении и подходах к нему [4, 6, 8, 17, 22, 23, 25, 32].

3. Разработан метод диагностики деформационных швов по адаптированному показателю IRI, при котором на базе геометрической модели поверхности проезда, полученной путем наземного лазерного сканирования,

а также продольных профилей по полосам наката строятся диаграммы изменения показателя IRI, дающие количественную оценку ровности деформационного шва, независимо от его вида, с целью установления критического состояния шва, соответствующего величине среднего показателя IRI в скользящем интервале длиной 0,1 м, превышающей значение в 25 мм/м, по достижении которого необходимо выполнять ремонт деформационного шва для обеспечения плавности хода автомобилей и снижения динамического воздействия на пролетное строение [8, 23, 25, 28].

4. Разработан метод диагностики деформационных швов по динамическому отклику пролетного строения вблизи шва путем определения величин виброскорости балок пролетного строения в вертикальном направлении при движении по нему грузового автомобиля со снаряженной массой более 5 т, что позволяет выполнить качественную оценку ровности шва, независимо от его вида, с учетом фактора жесткости конструкций, образующих поверхность проезда, с целью установления критического состояния шва, при котором размах виброскорости балки пролетного строения на расстоянии 1 м от деформационного шва выше, чем на расстоянии 3 м от шва, на основании чего необходимо выполнять ремонт деформационного шва для обеспечения плавности хода автомобилей и снижения динамического воздействия на пролетное строение [3, 8, 21].

5. Разработано и отражено в СТБ 2516-2024 решение рационального расположения деформационного шва в зоне съезда автомобиля с пролетного строения мостового сооружения, позволяющее до 2 раз снизить динамическое воздействие на пролетное строение за счет перемещения участка, на котором автомобиль после проезда по неровностям деформационного шва совершает вертикальные колебания, с пролетного строения на подход; положительный эффект усиливается путем установки неподвижных, более жестких в сравнении с линейно-подвижными, полиуретановых опорных частей на крайней опоре в зоне заезда автомобиля на пролетное строение [6, 9, 13, 19, 47].

Результаты исследований апробированы в государственном предприятии «БелдорНИИ», а также отражены в государственном стандарте Республики Беларусь СТБ 2516-2024 и дорожном методическом документе ДМД 33200.032-2024, подтвердив эффективность разработки.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Решение рационального расположения деформационного шва над крайней по ходу движения транспорта опорой отражено в СТБ 2516-2024 и рекомендуется к применению при проектировании и строительстве мостовых сооружений.

Комплекс методик сбора и обработки данных, полученных методом наземного лазерного сканирования, рекомендуется к применению профи-

ными организациями при проведении работ по обследованию и испытанию мостовых сооружений.

Методы диагностики по адаптированному показателю IRI и по динамическому отклику пролетного строения вблизи шва рекомендуются к применению для оценки технического состояния деформационных швов при обследованиях, диагностике или мониторинге автодорожных мостовых сооружений профильными организациями.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Ходяков, В. А. Оптимизация металлических ферм неразрезного пролетного строения / В. А. Ходяков // Транспорт. Трансп. сооружения. Экология. – 2015. – № 4. – С. 114–129.
2. Ходяков, В. А. Оптимизация металлической двутавровой балки по массе с сохранением требуемой несущей способности / В. А. Ходяков // Вестн. Белгор. гос. технол. ун-та. – 2016. – № 8. – С. 67–71.
3. Ходяков, В. А. Анализ динамического воздействия подвижной нагрузки на балки пролетного строения / В. А. Ходяков // Автомобил. дороги и мосты. – 2020. – № 2. – С. 29–36.
4. Диагностика участков мостового полотна и подходов в зонах устройства деформационных швов на автодорожных мостах / В. А. Ходяков, А. В. Кулан, Е. Н. Савина, И. Л. Бойко, В. А. Гречухин // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 1. – С. 10–15.
5. Ходяков, В. А. Особенности работы полиуретановых опорных частей пролетных строений мостов / В. А. Ходяков // Автомобил. дороги и мосты. – 2022. – № 2. – С. 67–73.
6. Ходяков, В. А. Опыт применения дистанционных инструментальных методов сбора данных о деформированном состоянии мостовых сооружений / В. А. Ходяков, А. О. Коликов // Автомобил. дороги и мосты. – 2023. – № 1. – С. 25–34.
7. Павуков, Ю. И. Вибродиагностика опор мостовых сооружений / Ю. И. Павуков, В. А. Ходяков // Автомобил. дороги и мосты. – 2023. – № 2. – С. 6–12.
8. Ходяков, В. А. Методы инструментальной диагностики состояния деформационных швов мостовых сооружений / В. А. Ходяков, Н. И. Шишко, В. А. Гречухин // Транспорт. Трансп. сооружения. Экология. – 2024. – № 1. – С. 42–51.
9. Ходяков, В. А. Динамическая добавка к статической транспортной нагрузке и резонанс пролетного строения мостовых сооружений / В. А. Ходяков // Автомобил. дороги и мосты. – 2024. – № 1. – С. 77–84.

### Материалы конференций

10. Ходяков, В. А. Роль опорных частей в динамическом воздействии на мостовые сооружения / В. А. Ходяков // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–27 нояб. 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 130–133.
11. Ходяков, В. А. Роль сопряжения с подходами в динамическом воздействии на мостовые сооружения / В. А. Ходяков // Дорожное строитель-

ство и его инженерное обеспечение : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–27 нояб. 2020 г. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 133–136.

12. Ходяков, В. А. Динамическое воздействие на пролетное строение моста / В. А. Ходяков // Новые горизонты – 2020 : сб. материалов VII Беларус.-Кит. молодеж. инновац. форума, Минск, 17 нояб. 2020 г. : в 2 т. / Беларус. нац. техн. ун-т [и др.]. – Минск, 2020. – Т. 1. – С. 112–113.

13. Ходяков, В. А. Оптимизация несущих конструкций транспортных сооружений. Диагностика зоны устройства деформационных швов на автодорожных мостах / В. А. Ходяков // Лучший молодой ученый – 2021 : IV Междунар. кн. изд. стран Содружества Независимых Государств, Нур-Султан, 20–21 апр. 2021 г. / Обществ. движение БОБЕК ; под ред. Е. Ешим. – Нур-Султан, 2021. – С. 61–65.

14. Ходяков, В. А. Определение жесткости проезжей части путепровода и подходов / В. А. Ходяков, Е. Н. Савина // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 окт. 2021 г. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.] ; сост. В. А. Ходяков. – Минск, 2021. – С. 447–451. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/108522/447-451.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).

15. Ходяков, В. А. Испытание опорных частей / В. А. Ходяков // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 окт. 2021 г. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.] ; сост. В. А. Ходяков. – Минск, 2021. – С. 452–459. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/108523/452-459.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).

16. Ходяков, В. А. Термическое и трехмерное сканирование зоны устройства деформационного шва на автодорожных мостах / В. А. Ходяков // Новые горизонты – 2021 : сб. материалов VIII Беларус.-Кит. молодеж. инновац. форума, Минск, 11–12 нояб. 2021 г. : в 2 т. / Беларус. нац. техн. ун-т [и др.]. – Минск, 2021. – Т. 1. – С. 138–139.

17. Ходяков, В. А. Опыт применения трехмерного сканирования при испытании путепровода / В. А. Ходяков // Образование. Наука. Производство : сб. докл. XIV Междунар. молодеж. форума, Белгород, 13–14 окт. 2022 г. : в 20 ч. / Рос. акад. наук [и др.]. – Белгород, 2022. – Ч. 9 : Эффективные материалы, технологии, машины и оборудование для строительства современных транспортных сооружений. Организация и безопасность движения. – С. 134–138. – URL: <https://www.bstu.ru/shared/attachments/255756> (дата обращения: 27.08.2024).

18. Ходяков, В. А. Динамические характеристики ребристых пролетных строений / В. А. Ходяков // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 окт.

2022 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; сост.: С. Н. Соболевская, Е. М. Жуковский. – Минск, 2022. – С. 164–167. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/125181/164-167.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).

19. Ходяков, В. А. Деформационные швы и динамическое воздействие на конструкции путепровода / В. А. Ходяков // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 окт. 2022 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; сост.: С. Н. Соболевская, Е. М. Жуковский. – Минск, 2022. – С. 168–174. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/125182/168-174.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).

20. Ходяков, В. А. Влияние вида опорных частей на частоты собственных колебаний пролетного строения / В. А. Ходяков // Новые горизонты – 2022 : сб. материалов IX Белорус.-Кит. молодеж. инновац. форума, Минск, 10–11 нояб. 2022 г. : в 2 т. / Гос. ком. по науке и технологиям [и др.]. – Минск, 2022. – Т. 1. – С. 126–127.

21. Ходяков, В. А. Распределение амплитуд виброскорости по длине пролетного строения при динамических воздействиях / В. А. Ходяков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Пермь, 10–11 нояб. 2022 г. / Рос. акад. трансп. [и др.] ; редкол.: Н. В. Лобов (отв. ред.) [и др.]. – Пермь, 2022. – С. 314–318.

22. Ходяков, В. А. Комплексная методика оценки деформаций асфальтобетонного покрытия на мостовых сооружениях с использованием метода наземного лазерного сканирования / В. А. Ходяков // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвящ. 170-летию со дня рождения В. Г. Шухова, Белгород, 16–17 мая 2023 г. : в 20 ч. / Рос. акад. наук [и др.]. – Белгород, 2023. – Ч. 9 : Эффективные материалы, технологии, машины и оборудование для строительства современных транспортных сооружений. Организация и безопасность движения. – С. 359–362. – URL: <https://www.bstu.ru/shared/attachments/262281> (дата обращения: 27.08.2024).

23. Ходяков, В. А. Индекс ровности дорожного покрытия по результатам наземного лазерного сканирования / В. А. Ходяков, Н. И. Шишко // Беларусь-Китай: контуры инновационно-технологического сотрудничества : сб. материалов науч.-практ. конф., Минск, 19–20 окт. 2023 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; сост. М. А. Войтешенок. – Минск, 2023. – С. 135–136.

24. Ходяков, В. А. Термография применительно к оценке состояния деформационных швов. Экспресс-диагностика / В. А. Ходяков // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–27 окт. 2023 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.] ; сост. В. А. Ходяков. – Минск, 2024. – С. 338–345. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/150446/338-345.pdf> (дата обращения: 08.11.2024).

25. Ходяков, В. А. Индекс ровности покрытия на мостовых сооружениях. Особенности определения. Дискуссия / В. А. Ходяков, Н. И. Шишко // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–27 окт. 2023 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.] ; сост. В. А. Ходяков. – Минск, 2024. – С. 346–359. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/150447/346-359.pdf> (дата обращения: 08.11.2024).

26. Ходяков, В. А. Об особенностях поиска максимального значения динамического коэффициента при испытаниях мостов / В. А. Ходяков // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–27 окт. 2023 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.] ; сост. В. А. Ходяков. – Минск, 2024. – С. 360–367. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/150448/360-367.pdf> (дата обращения: 08.11.2024).

27. Ходяков, В. А. О достоверности стандартных параметров модели «золотого» автомобиля для расчета показателя IRI / В. А. Ходяков // Новые горизонты – 2023 : сб. материалов X Белорус.-Кит. молодеж. инновац. форума, Минск, 9–10 нояб. 2023 г. : в 2 т. / Гос. ком. по науке и технологиям [и др.]. – Минск, 2023. – Т. 1. – С. 70–72.

28. Ходяков, В. А. Индекс ровности дорожного покрытия применительно к деформационным швам на мостовых сооружениях / В. А. Ходяков, Н. И. Шишко // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Пермь, 9–10 нояб. 2023 г. / Перм. нац. исслед. политехн. ун-т ; под ред. Н. В. Лобова. – Пермь, 2023. – С. 367–370.

29. Ходяков, В. А. Влияние полиуретановых опорных частей на долговечность узла сопряжения пролетного строения с подходами мостовых сооружений / В. А. Ходяков // Химия. Экология. Урбанистика : материалы всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием), Пермь, 17–19 апр. 2024 г. : в 4 т. / Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь, 2024. – Т. 3. – С. 222–226.

30. Ходяков, В. А. Измерение жесткости дорожной конструкции в зоне устройства деформационного шва на мостовых сооружениях / В. А. Ходяков // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых : сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, приуроч. к празднованию 300-летия Рос. акад. наук, Омск, 25–26 апр. 2024 г. / Сиб. гос. автомобил.-дорож. ун-т ; редкол.: А. П. Жигadlo (отв. ред.) [и др.]. – Омск, 2024. – С. 392–395. – 1 CD-ROM.

31. Ходяков, В. А. Влияние полиуретановых опорных частей на результаты испытаний мостовых сооружений / В. А. Ходяков // Новые технологии – нефтегазовому региону : материалы Междунар. науч.-практ. конф., студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 21–24 мая 2024 г. :

в 2 т. / Тюмен. индустр. ун-т ; отв. ред. В. А. Чейметова. – Тюмень, 2024. – Т. 2. – С. 113–115.

32. Ходяков, В. А. Восстановление утраченных участков диаграммы деформации пролетного строения, полученной в результате наземного лазерного сканирования / В. А. Ходяков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию юбилею кафедры «Автомобили и технологические машины», Пермь, 7–8 нояб. 2024 г. / Перм. нац. исслед. политехн. ун-т ; под ред. Н. В. Лобова. – Пермь, 2024. – С. 282–285.

33. Ходяков, В. А. Нежесткие опорные части автодорожных мостовых сооружений и резонансные явления при прохождении автотранспорта / В. А. Ходяков // Техническое регулирование в транспортном строительстве : сб. науч. тр. по материалам X Междунар. науч.-практ. конф. «Повышение надежности и безопасности транспортных сооружений и коммуникаций», Саратов, 20–21 нояб. 2024 г. / Саратов. гос. техн. ун-т им. Ю. А. Гагарина ; редкол.: В. В. Раткин [и др.]. – Саратов, 2025. – С. 72–78. – 1 CD-ROM.

34. Ходяков, В. А. Новый взгляд на жесткость дорожной конструкции при описании деформаций / В. А. Ходяков // Новые горизонты – 2024 : сб. материалов XI Белорус.-Кит. молодеж. инновац. форума, Минск, 21–22 нояб. 2024 г. : в 2 т. / Гос. ком. по науке и технологиям [и др.]. – Минск, 2024. – Т. 1. – С. 206–208.

35. Ходяков, В. А. О динамическом воздействии подвижной нагрузки на автодорожные мосты / В. А. Ходяков // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. конф., приуроч. к 120-летию со дня рождения К. А. Артемьева, Омск, 21–22 нояб. 2024 г. / Сиб. гос. автомобил.-дорож. ун-т ; редкол.: А. П. Жигadlo (отв. ред.) [и др.]. – Омск, 2024. – С. 361–365. – 1 CD-ROM.

### **Тезисы**

36. Ходяков, В. А. Динамический анализ транспортных сооружений / В. А. Ходяков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14-й междунар. науч.-техн. конф. (69-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2016. – Т. 3. – С. 86.

37. Ходяков, В. А. Определение динамических характеристик эксплуатируемых транспортных сооружений / В. А. Ходяков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й междунар. науч.-техн. конф. (70-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.:

Б. М. Хрусталева, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2017. – Т. 3. – С. 112.

38. Ходяков, В. А. Математическая модель для динамического расчета транспортных сооружений / В. А. Ходяков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й междунар. науч.-техн. конф. (70-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталева, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2017. – Т. 3. – С. 113.

39. Ходяков, В. А. Определение частот собственных колебаний пролетных строений мостов / В. А. Ходяков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й междунар. науч.-техн. конф. (71-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. В. Харитончик, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2018. – Т. 3. – С. 76.

40. Ходяков, В. А. Определение фактического динамического коэффициента к статической нагрузке по результатам испытания / В. А. Ходяков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й междунар. науч.-техн. конф. (71-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. В. Харитончик, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2018. – Т. 3. – С. 77.

41. Ходяков, В. А. Динамическое воздействие подвижной нагрузки на автодорожные мосты Республики Беларусь / В. А. Ходяков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 17-й междунар. науч.-техн. конф. (72-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 53. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/82418/53.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).

42. Ходяков, В. А. Методика измерения динамических характеристик пролетных строений / В. А. Ходяков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 17-й междунар. науч.-техн. конф. (72-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 54. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/82419/54.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).

43. Ходяков, В. А. Вибродиагностика мостовых сооружений / В. А. Ходяков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 18-й междунар. науч.-техн. конф. (73-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 103–105. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/82515/103-105.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).

44. Ходяков, В. А. Диагностика топологии асфальтобетонного покрытия в районе деформационного шва / В. А. Ходяков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 18-й междунар. науч.-техн. конф. (73-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 106–108. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/82516/106-108.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).

45. Ходяков, В. А. Комплексная модель взаимодействия автомобиля с дорожной конструкцией, конструкцией мостового сооружения и их сопряжения / В. А. Ходяков // Новые технологические решения для дорог и мостов в транспортной инфраструктуре : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 марта 2025 г. / БелдорНИИ. – Минск, 2025. – С. 87–89.

### **Патенты**

46. Патент ВУ 22318, МПК E04C 3/04 (2006.01). Строительная металлическая однопролетная балка : № а 20160218 : заявлено 09.06.2016 : опубл. 30.12.2018 / Ходяков В. А. ; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – 4 с.

47. Патент ВУ 13616, МПК E01D 19/06 (2006.01). Мостовое сооружение с отдельными пролетными строениями и деформационными швами под каждое направление движения : № u 20240225 : заявлено 01.10.2024 : опубл. 20.12.2024 / Ходяков В. А., Гречухин В. А. ; заявители: Ходяков В. А., Гречухин В. А. – 3 с.

## РЭЗІЮМЭ

Хадзякоў Вячаслаў Андрэвіч

### Комплексны метаад ацэнкі дынамічных ўздзеянняў транспартных сродкаў, якія рухаюцца, на бэлечныя пралётныя пабудовы аўтадарожных маставых збудаванняў

**Ключавыя словы:** аўтадарожны мост, пралётная пабудова, апорная частка, дэфармацыйнае шво, роўнасць, транспартны сродак, дынамічнае ўздзеянне, калянасць

**Мэта работы:** распрацаваць комплекс метадаў дыягностыкі дэфармацыйных швоў і рашэнняў для зніжэння дынамічнага ўздзеяння на бэлечныя пралётныя пабудовы аўтадарожных маставых збудаванняў пры руху па іх транспартных сродкаў.

**Метады даследванняў і апаратура.** Ацэнка значэння дынамічнага ўздзеяння выконвалася з выкарыстаннем тэнзаметрычнага модулю ZET 7110 і вібрааналізатара ВІБРАН-3. Ацэнка стану дэфармацыйных швоў і канструкцый, якія да іх прымыкаюць, – наземнага лазернага сканера FARO Focus 3D X 130 і цеплавізара Testo 875-1i. Ацэнка дэфармацый апорных частак – прэса П-250, лічбавага штангенцыркуля і індыкатара ІЧ-10. Для апрацоўкі даных вымярэнняў і разлікаў выкарыстоўваліся праграмы: ZETLAB, Вібран-3, Autodesk ReCap, Testo IRSoft, Microsoft Excel, Rhinoceros, Grasshopper, SOFiSTiK і КРЭДА ДАРОГІ.

**Навуковая навізна атрыманых вынікаў.** Распрацаваны: комплекс метад збору і апрацоўкі даных, атрыманых метадам наземнага лазернага сканіравання; метады дыягностыкі стану дэфармацыйных швоў па адаптаваным паказчыку IRI; метады дыягностыкі стану дэфармацыйных швоў па дынамічным водгуку пралётнай пабудовы паблізу шва; канструктыўнае рашэнне рацыянальнага размяшчэння дэфармацыйнага шва на маставым збудаванні, а таксама абгрунтавана прымяненне апорных частак, якія валодаюць падвышанай калянасцю, з мэтай зніжэння значэння дынамічнага ўздзеяння.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Метады дыягностыкі дэфармацыйных швоў дазваляюць своечасова выяўляць дэфекты швоў. Рашэнне рацыянальнага размяшчэння дэфармацыйнага шва дазваляе зменшыць дынамічнае ўздзеянне на пралётную пабудову пры руху па ім транспартных сродкаў.

**Вобласць прымянення.** Пры практаванні, будаўніцтве, рэканструкцыі, дыягностыцы, абследаванні, маніторынгу і ўтрыманні аўтадарожных маставых збудаванняў.

## РЕЗЮМЕ

Ходяков Вячеслав Андреевич

### **Комплексный метод оценки динамических воздействий движущихся транспортных средств на балочные пролетные строения автодорожных мостовых сооружений**

**Ключевые слова:** автодорожный мост, пролетное строение, опорная часть, деформационный шов, ровность, транспортное средство, динамическое воздействие, жесткость

**Цель работы:** разработать комплекс методов диагностики деформационных швов и решений для снижения динамического воздействия на балочные пролетные строения автодорожных мостовых сооружений при движении по ним транспортных средств.

**Методы исследования и аппаратура.** Оценка значения динамического воздействия выполнялась с использованием тензометрического модуля ZET 7110 и виброанализатора ВИБРАН-3. Оценка состояния деформационных швов и примыкающих конструкций – наземного лазерного сканера FARO Focus 3D X 130 и тепловизора Testo 875-1i. Оценка деформаций опорных частей – прессы П-250, цифрового штангенциркуля и индикатора ИЧ-10. Для обработки результатов измерений и расчетов использовались программы: ZETLAB, Вибран-3, Autodesk ReCap, Testo IRSoft, Microsoft Excel, Rhinoceros, Grasshopper, SOFiSTiK и КРЕДО ДОРОГИ.

**Научная новизна полученных результатов.** Разработаны: комплекс методик сбора и обработки данных, полученных методом наземного лазерного сканирования; метод диагностики состояния деформационных швов по адаптированному показателю IRI; метод диагностики состояния деформационных швов по динамическому отклику пролетного строения вблизи шва; конструктивное решение рационального расположения деформационного шва на мостовом сооружении, а также обосновано применение опорных частей, обладающих повышенной жесткостью, с целью снижения значения динамического воздействия.

**Рекомендации по использованию.** Методы диагностики деформационных швов позволяют своевременно выявлять дефекты швов. Решение рационального расположения деформационного шва позволяет снизить динамическое воздействие на пролетное строение при движении по нему транспортных средств.

**Область применения.** При проектировании, строительстве, реконструкции, диагностике, обследовании, мониторинге и содержании автодорожных мостовых сооружений.

## SUMMARY

**Khadziakou Viachaslau Andreevich**

### **Integrated method for assessing dynamic impacts from moving vehicles on beam spans of road bridge structures**

**Key words:** road bridge, span structure, bridge bearing, expansion joint, evenness, vehicle, dynamic impact, stiffness

**The goal of dissertation:** to develop a set of methods for expansion joints diagnostics and solutions to reduce dynamic impact on beam spans of road bridges when vehicles move along them.

**Methods of research and equipment.** A dynamic impact value was assessed with strain gauge module ZET 7110 and vibration analyzer VIBRAN-3. A condition of expansion joints and adjacent structures was assessed with terrestrial laser scanner FARO Focus 3D X 130 and thermal imager Testo 875-1i. A deformation of bridge bearings assessed with compression machine P-250, digital caliper and indicator ICH-10. The following programs were used to measurement data processing and calculations: ZETLAB, Vibran-3, Autodesk ReCap, Testo IRSof, Microsoft Excel, Rhinoceros, Grasshopper, SOFiSTiK and CREDO ROAD.

**Scientific innovation of findings.** The set of methods for collecting and processing data that was obtained by terrestrial laser scanning were developed. The diagnostic method of expansion joints state based on adapted IRI indicator and the diagnostic method of expansion joints state based on dynamic response of span structure near a joint were developed. The design solution for expansion joint rational placement in bridge structure was developed. The using of bridge bearings with increased stiffness is justified in order to reduce dynamic impact value.

**Recommendations for use.** Diagnostics methods of expansion joints allow for timely joint defects detection. The solution for expansion joint rational placement allows to reduce dynamic impact on the span structure when vehicles move along it.

**Field of application.** In design, construction, reconstruction, diagnostics, inspection, monitoring and maintenance of road bridges.



Научное издание

**ХОДЯКОВ**  
**Вячеслав Андреевич**

**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЙ ДВИЖУЩИХСЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ  
НА БАЛОЧНЫЕ ПРОЛЕТНЫЕ СТРОЕНИЯ АВТОДОРОЖНЫХ  
МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.23.11 – проектирование и строительство дорог,  
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

---

Подписано к печати 11.05.2026. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,75. Тираж 60 экз. Заказ № 315.

---

Печать цифровая. Изготовлено и отпечатано в типографии учреждения  
образования «Брестский государственный технический университет»  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1569 от 16.10.2017 г.