

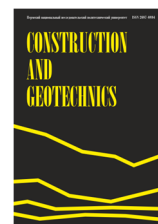


пермский
политех

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 1, 2025

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.1.07

УДК 625.7/.8

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

А.С. Конорев, С.А. Мирончук, Е.А. Еременко, В.А. Думенко

Российский дорожный научно-исследовательский институт, Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 01 декабря 2023

Одобрена: 22 декабря 2024

Принята к публикации:

05 марта 2025

Ключевые слова:

ускоренные испытания дорожных одежд, методология проведения испытаний, датчики мониторинга, симулятор колесной нагрузки «ЦИКЛОС», дорожно-испытательный комплекс, напряженно-деформированное состояние, прочность дорожной конструкции.

АННОТАЦИЯ

Испытания материалов в лаборатории не в полной мере учитывают особенности реальной работы слоев в дорожной одежде, что сказывается на оценке его фактических свойств. В настоящее время получили распространение исследования, проводимые на полномасштабных дорожных одеждах или на реальных участках автомобильных дорог. Одним из ведущих направлений исследований дорожных одежд является выполнение ускоренных испытаний симуляторами колесных нагрузок. На сегодняшний день на территории Российской Федерации исследованиями в области ускоренных испытаний дорожных одежд, в том числе и в части разработки методологических основ, занимается только Российский дорожный научно-исследовательский институт (РОСДОРНИИ) в рамках Государственного задания в целях реализации достижения результатов федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства», входящего в состав национального проекта «Безопасные качественные дороги», по теме «Создание Общественного центра компетенций по новым материалам и технологиям для строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог».

В данной статье изложена необходимость разработки и использования единой методологии при ускоренных испытаниях дорожных одежд с использованием симулятора колесной нагрузки «ЦИКЛОС». Приведенная в данной работе методология направлена на последовательное и наиболее эффективное осуществление экспериментальных исследований. Реализация данной методологии позволит в последующем обеспечить качественный сравнительный анализ и сформировать подход к научным исследованиям в дорожной сфере.

Основным подходом в разработке данных методологических основ являлся анализ существующей нормативно-технической документации в области дорожного хозяйства, литературный обзор существующих исследований и общемировой опыт в области ускоренных испытаний, а также практический опыт эксплуатации симулятора колесной нагрузки «ЦИКЛОС» в рамках тестовых испытаний.

© **Конорев Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора департамента, e-mail: Konorev@rosdornii.ru, ORCID: 0009-0007-1052-0260.

Мирончук Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, начальник управления, e-mail: Mironchuk@rosdornii.ru, ORCID: 0000-0002-0312-424X.

Еременко Евгений Александрович – исследователь, заместитель начальника управления, e-mail: Eremenko@rosdornii.ru, ORCID: 0009-0006-6048-2517.

Думенко Виктор Александрович – аспирант, начальник отдела, e-mail: Dumenko@rosdornii.ru.

Alexander S. Konorev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director of the Department, e-mail: Konorev@rosdornii.ru, ORCID: 0009-0007-1052-0260.

Sergey A. Mironchuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, e-mail: Mironchuk@rosdornii.ru, ORCID: 0000-0002-0312-424X.

Evgeny A. Eremenko – Researcher, Deputy Head of Department, e-mail: Eremenko@rosdornii.ru, ORCID: 0009-0006-6048-2517.

Viktor A. Dumenko – Postgraduate Student, Head of Department, e-mail: Dumenko@rosdornii.ru.

DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR ACCELERATED TESTING OF ROAD PAVEMENTS

A.S. Konorev, S.A. Mironchuk, E.A. Eremenko, V.A. Dumenko

Russian Road Scientific-Research Institute, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 01 December 2023
Approved: 22 December 2024
Accepted for publication:
05 March 2025

Keywords:

Accelerated testing of road pavements, testing methodology, monitoring sensors, wheel load simulator CYKLOS, road testing complex, stress-strain state, strength of road structure.

ABSTRACT

Testing materials in the laboratory does not fully take into account the features of the actual operation of layers in road pavement, which affects the assessment of its actual properties. Currently, studies conducted on full-scale pavements or on real sections of highways have become widespread. One of the leading areas of road pavement research is the performance of accelerated tests using wheel load simulators. Today, on the territory of the Russian Federation, research in the field of accelerated testing of road pavements, including the development of methodological foundations, is carried out only by the Federal Autonomous Institution "Russian Road Scientific-Research Institute" (FAI "ROSDORNII") within the framework of the State assignment in order to implement achieving the results of the federal project "System-wide measures for the development of road facilities", which is part of the national project "Safe High-Quality Roads", on the topic "Creation of an industry-wide competence center for new materials and technologies for the construction, repair and maintenance of highways."

This article outlines the need to develop and use a unified methodology for accelerated testing of road pavements using the "CYCLOS" wheel load simulator (hereinafter referred to as the "CYCLOS" WLS). The methodology presented in this work is aimed at the consistent and most effective implementation of experimental research. The implementation of this methodology will subsequently provide a qualitative comparative analysis and formulate an approach to scientific research in the road sector.

The main approach in developing these methodological foundations was an analysis of existing regulatory and technical documentation in the field of road infrastructure, a literature review of existing research in the field of accelerated testing in the international community, as well as practical experience in operating the CYKLOS WLS within the framework of test tests.

Введение

На сегодняшний день научно-практические и исследовательские работы в области дорожного хозяйства и строительного материаловедения зачастую осуществляются в лабораторных условиях, при этом методы испытаний позволяют получить лишь информацию о показателях физико-механических свойств испытуемого образца, который характеризует отдельный слой дорожной одежды. Существующие методы исследований свойств материалов и дорожных конструкций не в полной мере способны отобразить работу многослойной среды как единого целого, что не позволяет подтвердить достоверность существующего прогнозирования состояния при реальной эксплуатации.

В настоящее время на территории Российской Федерации получили распространение исследования по различным научным направлениям, проводимые на полномасштабных дорожных одеждах или на реальных участках дорог.

Испытания полномасштабных конструкций дорожных одежд на участках дорог или испытательных секциях, полноценно имитирующих существующие автомобильные дороги, перспективны и позволяют получить всю полноту эксплуатационных свойств дорожно-строительных материалов в максимально реальных условиях и учете взаимного влияния слоев и деформирования.

Одним из таких направлений исследований дорожных одежд является выполнение ускоренных испытаний симуляторами колесных нагрузок. Ускоренные испытания конструкций дорожных одежд сегодня можно назвать основным двигателем мировой дорожной науки. История ускоренных методов испытания насчитывает десятилетия развития практики и культуры проведения испытаний дорожных конструкций. Установки циклического нагружения позволяют оценить широкий спектр параметров, которые тем или иным образом влияют на срок службы дорожных одежд. При этом полученные данные позволяют оценить полную картину о напряженно-деформированном состоянии каждого конструктивного слоя при воздействии различных факторов, таких как динамика воздействия, величина нагрузки, площадь контакта напряжений, температурные условия и т.п. Проведение ускоренных испытаний является комплексной исследовательской работой, которая способна объединять и развивать различные направления научных сфер.

Методика ускоренных испытаний дорожных одежд

Исследования, выполняемые в рамках проведения ускоренных испытаний, имеют широкую номенклатуру направлений. Укрупненно их можно разделить на две группы: исследование характеристик существующих и новых материалов и проверка применяемых конструктивных решений дорожных одежд. Чаще всего ко второй группе относится валидация данных для проектирования и моделирования поведения конструкций в разных эксплуатационных условиях. Условия проведения эксперимента, а также состав работ во многом зависят от целей проводимого исследования.

Мировой анализ опыта проведения ускоренных испытаний конструкций дорожных одежд показывает, что в основном в исследованиях используют спаренные шины на каретках и используют нагрузку от 50 до 200 кН на ось. Давление в шинах испытательных колес от 0,6 до 1,0 МПа. Скорость движения колеса от 8 до 20 км/ч, но чаще всего 9–10 км/ч. Условия испытаний различаются на уличные и в специализированных помещениях. Характер приложения нагрузки от колеса – однонаправленный или разнонаправленный. Варьирование температуры происходит в пределах от 20 до 60 °С. Испытания проводят как на участках автомобильных дорог, так и в испытательных секциях, как правило, с бетонными стенками. Стоит обратить внимание на то, что в данных исследованиях отсутствует четкий единый методологический подход к проведению испытаний [1–8].

Любое исследование нуждается в методологии и понимании ключевых, эффективных направлений. Методология должна описывать систему технологических приемов или способов для последовательного и наиболее эффективного осуществления экспериментального исследования.

Испытания дорожных одежд требуют значительных затрат времени и являются достаточно дорогостоящими по сравнению с лабораторными. Поэтому важно на начальном этапе развития применять единый подход к ключевым моментам, что в дальнейшем позволит повысить качество сравнительного анализа.

В настоящее время ФАУ «РОСДОРНИИ» начало эксплуатацию симулятора колёсных нагрузок «ЦИКЛОС» (далее – СКН «ЦИКЛОС») для проведения ускоренных испытаний конструкций дорожных одежд [9, 10], что потребовало разработки единого методологического обеспечения проводимых испытаний и исследований, учитывающего комплексный подход для получения качественного результата.

Пример размещения СКН «ЦИКЛОС» в дорожно-испытательном комплексе в процессе настрочных работ приведен на рис. 1.

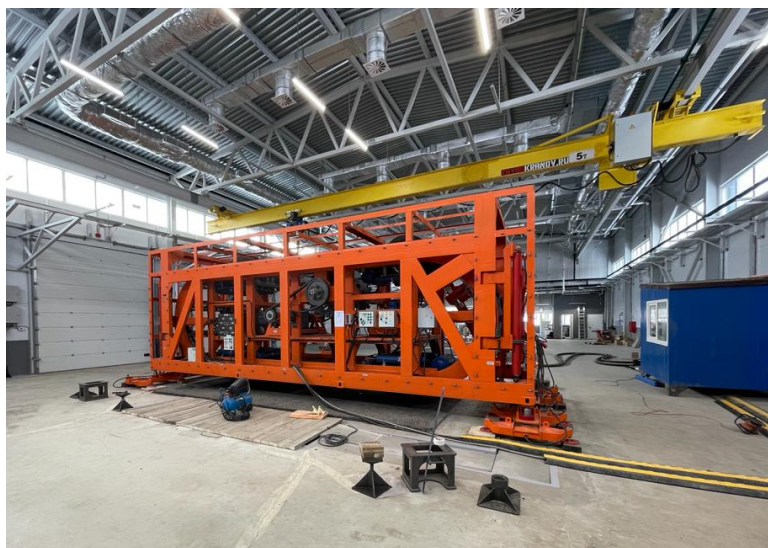


Рис. 1. Размещение СКН «ЦИКЛОС» в дорожно-испытательном комплексе

Fig. 1. Placement of SKN "CYCLOS" in the road-testing complex

Сотрудниками ФАУ «РОСДОРНИИ» проведены обширные долговременные мероприятия по разработке методологии, включающей весь алгоритм проводимых исследований, в результате которых предложен и апробирован комплекс работ, состоящий из четырех стадий:

1. Начальная:

- Процесс формирования цели и задач исследования.
- Разработка программы исследования.
- Разработка технологических документов.

2. Строительно-монтажная:

- Строительство конструктивных слоев дорожных одежд.
- Получение исходных данных о физико-механических свойствах материалов слоев дорожной одежды.

▪ Лабораторное и инженерно-техническое сопровождение строительства конструктивных слоев дорожной одежды.

- Монтаж датчиков мониторинга в проектные положения дорожной одежды.

- Подключение, проверка и настройка датчиков мониторинга.

- Разметка активной зоны приложения нагрузок.

- Замеры физико-механических и прочностных характеристик устроенных слоев.

3. Испытательная:

- Создание и поддержание необходимых условий проведения испытаний.
- Основные испытания СКН «ЦИКЛОС».
- Контрольные промежуточные испытания дорожной одежды с применением диагностического и лабораторного оборудования.

4. Обработки и анализа результатов испытаний:

- Сбор и обработка данных от всех измерительных систем.

- Сопоставление, анализ и формирование отчета о проведенном исследовании.

5. Внедрение результатов: подготовка научно обоснованных предложений по изменению действующих документов по стандартизации в области дорожного хозяйства.

Начальная стадия представляет собой последовательную и четкую проработку этапов запланированного исследования. На данной стадии рассматривается проблематика и актуальность существующего направления исследований, выбирается конструктивное решение, осуществляются необходимые расчеты, в том числе конструирование нежестких дорожных одежд, а также формируются цели и задачи исследования. Имея данную информацию, осуществляется подготовка программы исследования с указанием полного комплекса проводимых испытаний, а также назначаются проектные сроки реализации. С целью обеспечения высокого уровня технологичности проводимого исследования для каждой программы требуется подготовка комплекта технологических документов, включающего в себя технологические регламенты по устройству конструктивных слоев в испытательных секциях, а также технологический регламент на монтаж датчиков мониторинга в конструктивные слои конкретной конструкции и описание других видов работ, не регламентированных существующими нормативными документами.

Для оценки деформационных характеристик конструктивных слоев дорожных одежд испытательных секций / участков применяют датчики мониторинга [11–13], в числе которых следующие датчики:

- давления;
- влажности;
- растягивающих и сжимающих деформаций;
- остаточных деформаций [13];
- перемещений/ускорений;
- температуры.

При необходимости испытания могут проводиться на эталонных конструкциях, это наиболее встречающиеся конструкции для дорог различных категорий. Проведенный в ФАУ «РОСДОРНИИ» анализ около 100 участков строительства реконструкции позволил выявить осредненные толщины дорожной одежды, использованные в проекте [14–16].

Строительно-монтажная стадия испытаний состоит из нескольких этапов и начинается при возведении конструктивных слоев дорожной одежды в испытательной секции с монтажом датчиков мониторинга в проектные положения. Первым этапом является инженерно-техническое сопровождение строительства, осуществление лабораторного контроля применяемых дорожно-строительных материалов, а также оценка количественных и качественных показателей устроенных конструктивных слоев. На протяжении всего строительства с помощью высокоточного геодезического оборудования оцениваются геометрические характеристики устраиваемого участка, в частности ведется контроль толщины устраиваемых слоев, производится занесение в координатную ведомость положения датчиков мониторинга в секции с составлением соответствующих схем.

Для более глубокого изучения физико-механических и эксплуатационных свойств применяемых дорожно-строительных материалов осуществляется отбор проб для проведения испытаний по оценке показателей физико-механических и эксплуатационных свойств в лаборатории. С целью получения дополнительных показателей свойств устраиваемых слоев, в том числе модулей упругости, используются статический и динамический плотномер (штамп). Строительно-монтажная стадия должна сопровождаться фото- и видеофиксацией всех этапов работ.

Схема заложения датчиков мониторинга, а также их состав и количество, должны определяться индивидуально для каждой испытуемой конструкции дорожной одежды ис-

ходя из целей и задач исследования. Для недопущения недостаточности собираемых данных от датчиков для анализа НДС в связи с риском выхода из строя некоторых из них датчики мониторинга рекомендуется дублировать. При монтаже необходимо обеспечить мероприятия по максимальной защите кабелей и измерительных элементов. Методика монтажа должна иметь минимальное влияние на сплошность и однородность материала слоя.

Типовая схема заложения датчиков мониторинга в активной зоне приложения нагрузки представлена на рис. 2. Данная схема оптимальна для полосы наката симулятора колесной нагрузки и применима для большинства испытательных секций.

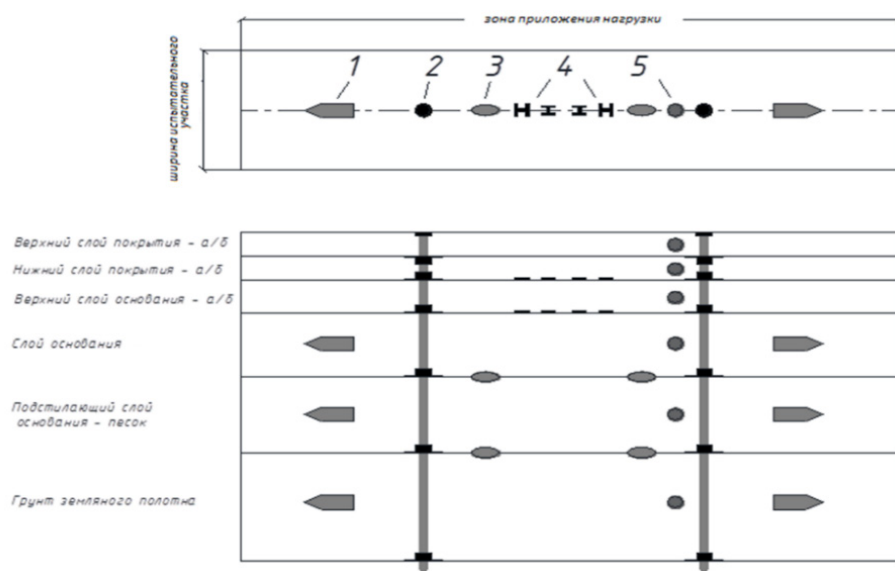


Рис. 2. Типовая схема монтажа датчиков мониторинга: 1 – датчики влажности; 2 – датчик остаточных деформаций; 3 – датчики давления; 4 – датчики растягивающих и сжимающих деформаций; 5 – датчики температуры

Fig. 2. Typical installation diagram of monitoring sensors: 1 – moisture sensors; 2 – residual strain sensor; 3 – pressure sensors; 4 – tensile and compressive strain sensors; 5 – temperature sensors

С целью более точного размещения испытательного оборудования и СКН «ЦИКЛОС» над зоной чувствительности датчиков на устроенном участке для последующих измерений выполняют разметку на поверхности покрытия с обозначением активной зоны приложения нагрузок и проекционного отображения положения датчиков мониторинга. После завершения всех строительно-монтажных работ следует этап настройки оборудования и подключение датчиков мониторинга к системе сбора и хранения данных.

Одним из критериев оценки несущей способности устроенной дорожной одежды является испытание с использованием установки динамического нагружения (FWD) [17, 18]. Предусмотрены начальные и последующие периодические измерения, позволяющие отследить динамику изменения несущей способности дорожной одежды при длительном воздействии динамических циклических нагрузок от СКН «ЦИКЛОС», а также режимов проводимого испытания (температурные условия, уровень увлажнения грунтов). Промежуточные замеры прочности проводятся не реже чем через каждые 500 000 приложений нагрузки. Определение прочности дорожной одежды проводится в соответствии с ГОСТ 32729 и ГОСТ Р 59918. При замерах регистрируют чаши прогиба с одновременной записью данных отклика от датчиков мониторинга. Схема ударов по поверхности покрытия соотносится с расположением датчиков и проводится для двух уровней нагрузки на

штамп, первый из которых подразумевает нагружение 57,5 кН, что эквивалентно расчетной нагрузке 11,5 т на ось по ГОСТ 32960. Второй уровень нагружения соответствует 65 кН и предназначен для учета диссипации напряжений при анализе данных с датчиков, смонтированных в дорожную конструкцию.

Помимо прочего, испытания установкой динамического нагружения в соответствии с ГОСТ Р 59918 позволяют определять модули упругости слоев дорожной одежды как в целях валидации модели конструкции, построенной для решения методом конечных элементов, так и вкупе с разрушающими методами отбора проб при определении физико-механических свойств материалов и геометрических параметров слоев конструкции для оценки итоговых результатов испытаний.

Испытательная стадия включает в себя набор необходимых технологических, аналитических и калибровочных работ, а также выполнение непосредственного испытания с использованием СКН «ЦИКЛОС».

Для соблюдения единства измерений требуется обеспечить максимально точное позиционирование и выгрузку СКН «ЦИКЛОС» на экспериментальный участок. Рекомендуемые отклонения не должны превышать 2 см от размеченной оси активной зоны приложения нагрузки. Для этих целей при транспортировке и выгрузке используются лазерные уровни, а также разметка краевых положений на поверхности участка.

СКН «ЦИКЛОС» имеет техническую возможность размещения как на специализированные платформы, так и на систему линейных перемещений, которая предназначена для имитации смещения колесной нагрузки, аналогично реальному на эксплуатируемых автомобильных дорогах (по закону нормального распределения). Решение о применении того или иного варианта размещения на поверхности испытательного участка принимается исходя из условий испытания, предусмотренных программой исследования.

Конструктивно и технологически СКН «ЦИКЛОС» имеет возможность испытаний дорожных одежд как в условиях дорожно-испытательного комплекса, так и на специально созданных экспериментальных участках реальных автомобильных дорог. Испытание на базе дорожно-испытательного комплекса позволяет полностью контролировать условия проведения испытаний, при этом есть возможность обеспечить увлажнение основания и грунта дорожной одежды, поверхностное охлаждение или нагрев покрытия. После размещения СКН «ЦИКЛОС» на испытательном участке необходимо обеспечить задание необходимых условий проведения испытания, принятых программой, таких как выставление необходимого уровня нагрузки, нагрев или охлаждение конструктивных слоев дорожной одежды, дополнительное увлажнение грунта земляного полотна.

Основные испытания СКН «ЦИКЛОС» выполняются при достижении заданных условий проведения испытаний и начинаются со снятия начальных контрольных точек для последующего анализа изменения напряженно-деформированного состояния дорожной одежды, с последующим сбором данных на контрольно-временных точках, которыми служит каждое достижение не менее 500 000 приложений нагрузки. Замеры в контрольных точках – дополнительный комплекс параллельных исследовательских работ, для анализа конечного результата эксперимента. Получение первых контрольных точек осуществляется проведением серии экспериментов со статическим и динамическим нагружением экспериментального участка сдвоенным колесом СКН «ЦИКЛОС», при этом в качестве переменных параметров используются величина нагрузки, время воздействия нагрузки, а также давление в шинах нагрузочных тележек.

Для анализа режимов нагружения оцениваются параметры напряженно-деформированного состояния по показаниям датчиков мониторинга, в частности по датчикам давления, заложенным в рабочем слое и несущем основании. Пример варьируемых режимов нагружения в контрольных точках представлены в таблице.

Требования к режимам нагружения для снятия контрольных точек

Requirements for loading modes for removing control points

Давление в шинах, кПа	Нагрузка, кН	Скорость, м/с
800	27,0 40,0	Статическая от 0,5 до 4,0 с шагом 0,5
600	50,0 56,0	

Для учета точных параметров площади нагружения необходимо уточнение отпечатка колес при различном давлении и уровне нагрузки [19, 20]. Износ шины и температура воздуха могут оказать влияние на площадь отпечатка шины спаренного колеса, в связи с чем требуется периодическая проверка не реже чем один раз в 2 млн приложений нагрузки. Примеры результатов начальных замеров отпечатков протектора шин представлены на рис. 3. Испытания проводят в режиме 23-часовой работы в сутки при обязательном дежурстве операторов. Оператор осуществляет полный цикл эксплуатационных мероприятий и мониторинг всех параметров испытаний.

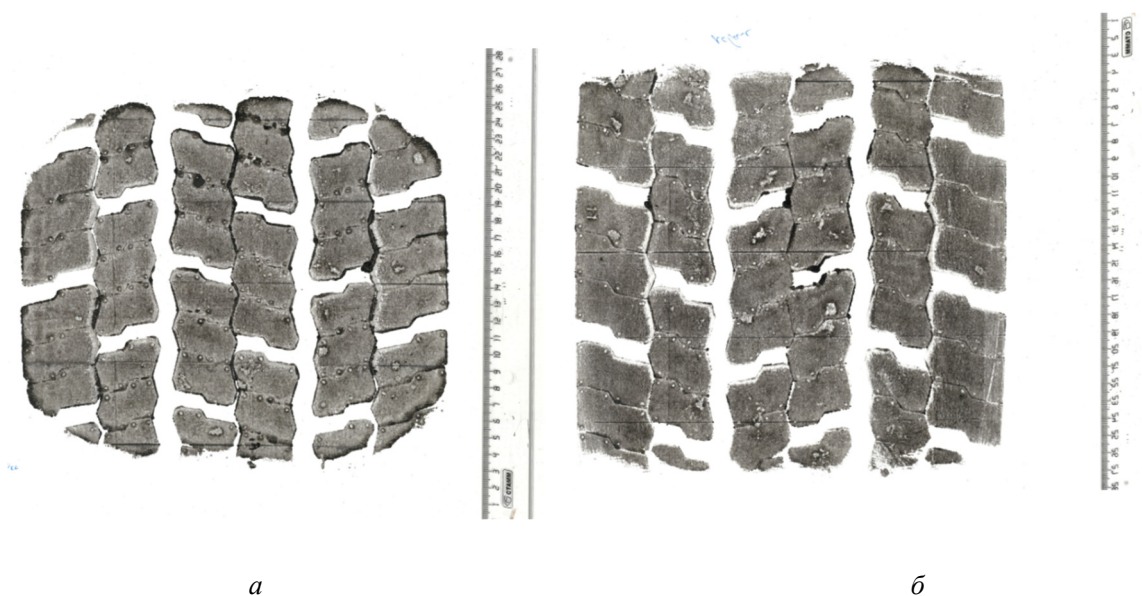


Рис. 3. Отпечаток колеса при нагрузке 56 кН при разном давлении: *a* – 800 кПа, *б* – 600 кПа

Fig. 3. Wheel print under a load of 56 kN at different pressures: *a* – 800 kPa, *b* – 600 kPa

Первоначально при запуске испытаний для минимизации начальных факторов влияния конструктивных и механических факторов, а также особенностей микропрофиля покрытия проводится предварительный этап циклических нагружений при нагрузке 50 % от установленной в программе исследования. Предварительный этап продолжается до достижения 20000 приложений нагрузки и при анализе итоговых результатов не учитывается.

В процессе испытаний не менее одного раза СКН «ЦИКЛОС» (обычно при достижении половины запланированного числа приложений нагрузки) убирается с участка для проведения цикла периодических замеров. Повторяются замеры несущей способности дорожной одежды с повторением первоначальной схемы ударов по поверхности покрытия. Визуально фиксируется наличие дефектов и их размеры. При необходимости применяют диагностическое оборудование для фиксации уровня эксплуатационных показателей.

На протяжении всего эксперимента ведется ежедневный журнал испытаний для объективной фиксации процесса и занесением данных о всех параметрах. Испытания продолжаются до получения необходимой информации в запланированном объеме и достижения целей и задач исследования либо достижения критических деформаций и разрушений. Критические дефекты зависят от исходных условий проведения испытаний и могут быть определены по ГОСТ 50597 или по предельному коэффициенту разрушения в соответствии с ГОСТ Р 59120.

Основные положения и общие требования к методу приведения ускоренных испытаний с применением СКН «ЦИКЛОС» изложены в утвержденном СТО РОСДОРНИИ 17.0-2022 «Метод ускоренного испытания дорожных одежд симулятором колесной нагрузки „ЦИКЛОС“. Общие требования».

Выполнение исследований в рамках проведения ускоренных испытаний дорожных одежд с использованием СКН «ЦИКЛОС» позволяет реализовать многосторонний подход к выбранному методу испытаний. Одна дорожная одежда может быть испытана при различных заданных параметрах (температура окружающей среды, режимы увлажнения, нагрузка на колесо и т.п.), при этом при проявлении дефектов в виде ям или выбоин, для продолжения эксперимента по оценке изменения параметров напряженно-деформированного состояния, допускается осуществить ямочный ремонт с использованием холодных асфальтобетонных смесей [21].

Обработка и анализ данных результатов испытаний

Все полученные данные в процессе испытаний, в том числе в контрольных точках и лаборатории, используются для комплексного всестороннего анализа.

Обработка данных осуществляется путем совместного изучения и структурирования данных инструментального, визуального и мониторингового контроля.

Инструментальный анализ включает обработку данных о колейности, прочности, продольной ровности.

Визуальный анализ состоит из изучения фотофиксации разрушений и образования трещин на покрытии.

Мониторинговый контроль осуществляется посредством постоянного получения данных о температуре, влажности, напряжении, давлении в дорожной конструкции от датчиков мониторинга.

Главным фактором анализа является сопоставление изменения свойств и характеристик дорожной одежды с количеством приложенных нагрузок.

Определение значимых факторов, влияющих на развитие дефектов, проводится с учетом мониторинговых данных от датчиков. При этом очень важно знать, что значения факторов, например температуры или влажности, оставались неизменными, если такое изменение не было предусмотрено программой исследования.

Получение данных от датчиков мониторинга проводится путем выгрузки данных из электронной базы данных. Обработка может осуществляться как специализированным программным обеспечением, так и стандартными средствами статистического анализа.

Всесторонний анализ данных позволяет получить информацию, необходимую для верификации численной модели деформированного поведения конструкций нежестких дорожных одежд.

Во многом для сегодняшнего дня результаты данных испытаний уникальны и объём данных ввиду продолжительности испытания огромен, поэтому для анализа необходимо длительное время.

Заключение

Описанный метод испытания дорожных одежд в Российской Федерации начинает внедряться и развиваться. Важным этапом развития является выбор универсальной методологии проведения испытаний с выработкой принципиальных положений. Следование единой методологии качественным образом повысит возможность анализа, особенно при накоплении обширных данных с различных дорожных одежд. Для повышения технологического уровня и культуры испытаний, учитывая сложность всех технологических процедур, требуется отдельное обучение специалистов и наработка кадров. Полученные результаты обеспечат значительный экономический и социальные эффекты, направленные на повышение долговечности дорожных покрытий, повышение безопасности дорожного движения [22].

В целях развития данного направления для обеспечения соблюдения требований к методологии в России необходима разработка стандарта, регламентирующего все этапы испытаний дорожных одежд.

***Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.*

***Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

***Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.*

Библиографический список

1. Advances in pavement design through / D. Jones, J. Harvey, I.L. Al-Qadi, A. Mateos // Full-scale accelerated pavement testing. – 2012. – P. 556.
2. The roles of accelerated pavement testing in pavement sustainability / J. Aguiar-Moya, A. Vargas-Nordbeck, F. Leiva-Villacorta, L. Loria Salazar // Engineering, environment, and economics. – 2016. – 905 p.
3. Accelerated pavement testing to transport infrastructure innovation / A. Chabot, P. Horny, J. Harvey, L. Loria Salazar // Proceedings of 6th APT Conference. – 2020. – 72 p.
4. Accelerated pavement testing to evaluate the reinforcement effect of geogrids in flexible pavements / B. Han, P. Polaczyk, H. Gong, R. Ma, Y. Ma, F. Wei, B. Huang // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. – 2020. – Vol. 2674(11). – P. 12.
5. Steyn, W.J. vdM. Guidelines for the use of accelerated pavement testing data in autonomous vehicle infrastructure research / W.J. vdM. Steyn, J.W. Maina // Journal of Traffic and Transportation Engineering. – 2019. – Vol. 6, iss. 3. – P. 273–281. DOI: /10.1016/J.JTTE.2019.05.001

6. Accelerated pavement testing efforts using the Heavy Vehicle Simulator / L. du Plessis, A. Ulloa-Calderon, J.T. Harvey, N.F Coetzee // *International Journal of Pavement Research and Technology*. – 2018. – Vol. 11, iss. 4. – P. 327–338. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.09.016
7. Liu, Z. Performance evaluation of full-scale accelerated pavement using NDT and laboratory tests: A case study in Jiangsu, China / Z. Liu, X. Gu // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 18. – P. e02083. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02083
8. Accelerated laboratory pavement model test on cemented base and clay subgrade / C. Gnanendran, J. Piratheepan, J. Ramanujam, A. Arulrajah // *Geotechnical Testing Journal*. – 2011. – Vol. 34(4). – P. 297–309.
9. Способ ускоренного испытания дорожных конструкций: пат. Рос. Федерация / С.А. Мирончук, А.С. Конорев, В.А. Думенко [и др.]. – № 2784647; заявл. 23.11.2021; опубл. 29.11.2022. – 15 с.
10. Симулятор колесной нагрузки (циклос): пат. Рос. Федерация / Е.В. Кошель, А.С. Молчанов – № 211294; заявл. 23.11.2021; опубл. 30.05.2022 – 12 с.
11. Мирончук, С.А. Применение датчиков влажности частотно-диэлектрического типа для мониторинга влажности грунта земляного полотна / С.А. Мирончук, Е.Н. Исаев // *Строительство и архитектура. Материалы научно-практической конференции*, Ростов-на-Дону. – 2017. – С. 43–48.
12. Матуа, В.П. Применение датчика WaterScout SM100 для мониторинга влажности грунта земляного полотна / В.П. Матуа, С.А. Мирончук, Е.Н. Исаев // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2017. – № 5(64). – С. 192–199.
13. Устройство для мониторинга накопления остаточных деформаций в элементах дорожной конструкции: пат. Рос. Федерация / В.П. Матуа, Д.В. Чирва, П.С. Пляка [и др.]. – № 121585; заявл. 10.04.2012; опубл. 27.10.2012 – 7 с.
14. Год за неделю // *Автомобильные дороги*. – 2022. – № 1(1082). – С. 71–72.
15. Конорев, А.С. Обоснование эталонных конструкций дорожных одежд для ускоренных испытаний / А.С. Конорев, С.А. Мирончук, Г.М. Орловский // *Дороги и мосты*. – 2022. – № 1(47). – С. 53–64.
16. Конструирование нежестких дорожных одежд / Е.В. Углова, О.В. Конорева, А.С. Конорев, А.Б. Гуляжинов // *Инженерный вестник Дона*. – 2018. – № 1(48). – С. 157.
17. Универсальный комплекс для испытаний дорожных покрытий [Электронный ресурс] / А.В. Илюхин, В.И. Марсов, А.М. Колбасин, А.Б. Беляков, И.С. Братищев // *Вестник евразийской науки*. – 2013. – № 6(19). – С. 136. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/universalnyy-kompleks-dlya-ispytaniy-dorozhnyh-pokrytiy> (дата обращения: 04.10.2023).
18. Углова, Е.В. Комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд с использованием методов неразрушающего контроля / Е.В. Углова, А.Н. Тиратурян, А.А. Ляпин // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2016. – № 2.
19. Конорев, А.С. Влияние различных типов шин на дорожные конструкции / А.С. Конорев, В.В. Акулов // *Строительство и архитектура – 2015: материалы междунар. науч.-практ. конф. Т. 3. – Ростов н/Д: РГСУ, 2015. – С. 192–193.*
20. Тиратурян, А.Н. Совершенствование неразрушающего метода определения механических характеристик элементов многослойных конструкций на примере дорожных одежд / А.Н. Тиратурян, А.А. Ляпин, Е.В. Углова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2023. – № 1. С. 56–65. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06

21. Ремонт покрытий автомобильных дорог холодными асфальтобетонными смесями: учебное пособие / С.А. Чернов, Е.В. Леконцев, Е.А. Еременко, Н.Е. Коноплев. – Ростов н/Д: Донской государственный технический университет, 2018. – 97 с.

22. Модернизация кольцевого стенда «КУИДМ-2» для расширения спектра измеряемых параметров и ускорения испытаний / Ю.В. Штефан, Ю.Э. Васильев, А.Б. Беляков, Г.А. Панарин // Вестник евразийской науки, – 2013. – № 6(19). – С. 170.

References

1. Jones, D., Harvey, J., Al-Qadi, I.L., Mateos A. Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing. CRC Press, 2012, pp. 556.

2. Aguiar-Moya J., Vargas-Nordcbeck A., Leiva-Villacorta F., Loria Salazar L. The roles of accelerated pavement testing in pavement sustainability: *Engineering, environment, and economics*, 2016, p. 905.

3. Chabot A., Hornych P., Harvey J., Loria Salazar L. Accelerated pavement testing to transport infrastructure innovation. *Proceedings of 6th APT Conference*, 2020, p. 72.

4. Han B., Polaczyk P., Gong H., Ma R., Ma Y., Wei F., Huang B. Accelerated pavement testing to evaluate the reinforcement effect of geogrids in flexible pavements. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2020, vol. 2674(11), p. 12.

5. Wynand J. vdM. Steyn, James W. Maina. Guidelines for the use of accelerated pavement testing data in autonomous vehicle infrastructure research. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2019, vol. 6, iss. 3, pp. 273-281.

6. Plessis L. du, Ulloa-Calderon A., Harvey J.T., Coetzee N.F. Accelerated pavement testing efforts using the Heavy Vehicle Simulator. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2018, vol. 11, iss. 4, pp. 327-338. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.09.016.

7. Liu Z., Gu X. Performance evaluation of full-scale accelerated pavement using NDT and laboratory tests: A case study in Jiangsu, China. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 18, e02083. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02083.

8. Gnanendran C., Piratheepan J., Ramanujam J., Arulrajah A. Accelerated laboratory pavement model test on cemented base and clay subgrade. *Geotechnical Testing Journal*, 2011, vol. 34(4), pp. 297-309.

9. Mironchuk S.A., Konorev A.S., Dumenko V.A. Method for accelerated testing of road structures. Patent Rossiiskaia Federatiia no. 2784647 (2022).

10. Koshel E.V., Molchanov A.S. Wheel load simulator (Cyclos). Patent Rossiiskaia Federatiia no. 211294 (2022).

11. Mironchuk S. A., Isayev E. N. Primeneniye datchikov vlazhnosti chastotno-diel'kometricheskogo tipa dlya monitoringa vlazhnosti grunta zemlyanogo polotna [Application of frequency dielectric type humidity sensors for monitoring the soil moisture of the subgrade] *Stroitel'stvo i arkhitektura-2017. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Rostov-na-Donu, 2017, pp. 43-48.

12. Matua V.P., Chirva D.V., Isayev E.N. Primeneniye datchika WaterScout SM100 dlya monitoringa vlazhnosti grunta zemlyanogo polotna [Using the WaterScout SM100 sensor to monitor subgrade soil moisture]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2017, no. 5(64), pp. 192-199.

13. Matua V.P., Chirva D.V., Plyaka P.S. Ustroystvo dlya monitoringa nakopleniya ostatochnykh deformatsiy v elementakh dorozhnoy konstruktsii [Device for monitoring the accumula-

tion of residual deformations in road structure elements]. Patent Rossiiskaia Federatiia no. 121585 (2012).

14. God za nedelyu [A year in a week]. *Avtomobil'nyye dorogi*, 2022, no. 1(1082), pp. 71-72.

15. Konorev A.S., Mironchuk S.A., Orlovskiy G.M. Obosnovaniye etalonnykh konstruktсий dorozhnykh odezhd dlya uskorennykh ispytaniy [Justification of reference road pavement designs for accelerated testing]. *Dorogi i mosty*, 2022, no. 1(47), pp. 53-64.

16. Uglova E.V., Konoreva O.V., Konorev A.S., Gulyazhinov A.B. Konstruirovaniye nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Design of flexible pavements]. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2018, no. 1(48), p. 157.

17. Ilyukhin A.V., Marsov V.I., Kolbasin A.M., Belyakov A.B., Bratishchev I.S. Universalnyy kompleks dlya ispytaniy dorozhnykh pokrytiy [Universal complex for testing road structures]. *Vestnik Evraziyskoy nauki*, 2013, no. 6(19), pp. 136, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/universalnyy-kompleks-dlya-ispytaniy-dorozhnyh-pokrytiy> (дата обращения: 04.10.2023).

18. Uglova Ye.V., Tiraturyan A.N., Lyapin A.A. Kompleksnyy podkhod k issledovaniyu kharakteristik dinamicheskogo deformirovaniya na poverkhnosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd s ispol'zovaniyem metodov nerazrushayushchego kontrolya. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2016, no. 2.

19. Konorev A.S., Akulov V.V. Vliyaniye razlichnykh tipov shin na dorozhnyye konstruktсии [The influence of different types of tires on road structures]. *Stroitel'stvo i arkhitektura – 2015: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Rostov-na-Donu, 2015, vol. 3, pp. 192-193.

20. Tiraturyan A.N., Lyapin A.A., Uglova Ye.V. Sovershenstvovaniye nerazrushayushchego metoda modifikatsii mekhanicheskikh kharakteristik elementov mnogoslownykh konstruktсий na osnove dorozhnykh odezhd. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2023, no. 1, pp. 56–65. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06.

21. Chernov S.A., Lekontsev E.V., Eremenko E.A., Konoplev N.E. Remont pokrytiy avtomobil'nykh dorog kholodnymi asfal'tobetonnyimi smesyami [Repair of road surfaces with cold asphalt concrete mixtures: a tutorial]. Rostov-na-Donu, 2018, 97 p.

22. Shtefan U.V., Vasil'yev U.E., Belyakov A.B., Panarin G.A. Modernizatsiya kol'tsevogo stenda «KUIDM-2» dlya rasshireniya spektra izmeryayemykh parametrov i uskoreniya ispytaniy [Modernization of the KUIDM-2 ring stand to expand the range of measured parameters and speed up testing]. *Vestnik yevraziyskoy nauki*, 2013, no. 6(19), pp. 170.