

ИНДЕКС РОВНОСТИ ПОКРЫТИЯ НА МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ДИСКУССИЯ

Ходяков Вячеслав Андреевич, старший преподаватель
кафедры «Мосты и тоннели»

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: xva609@bntu.by

Шишко Надежда Игоревна, старший преподаватель
кафедры «Автомобильные дороги»

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: ad_ftk@bntu.by

***Аннотация:** На примере одного из мостовых сооружений на Минской кольцевой автомобильной дороге проведена апробация комплексного метода диагностики ровности дорожного покрытия в зоне устройства деформационного шва. Сбор данных в полевых условиях производился методом наземного лазерного сканирования. Оценка ровности производилась с использованием международного параметра IRI. В работе проведено подробное описание методики обработки данных и глубокий анализ особенностей применяемой методики с целью её совершенствования и адаптации для практического применения эксплуатирующими организациями Республики Беларусь.*

***Ключевые слова:** ровность, показатель IRI, ReCap, Кредо Дороги, Grasshopper, диагностика, деформационный шов, наземное лазерное сканирование, мостовое сооружение, динамика, аварийность.*

Введение

Ровность асфальтобетонного покрытия в процессе длительной эксплуатации постоянно снижается. Зонами повышенного риска являются участки различных стыков с изменением структуры и жёсткости ездового полотна. В частности, такой зоной является

место примыкания дорожного полотна к мостовому с устройством деформационного шва [1].

Апробация нового комплексного метода оценки ровности проводилась на путепроводе, расположенном на 4-м километре Минской кольцевой автомобильной дороги (далее МКАД). Формула сооружения 3×12 м, пролётное строение температурно-неразрезное из балок по ПМП 86.12. Опорные части полиуретановые индивидуального проектирования 210×195 мм, деформационные швы со щебеночно-мастичной вставкой на внешнем кольце МКАД и с плитными резинометаллическими элементами – на внутреннем. Швы в плохом состоянии. Эксплуатационная скорость движения 90 км/ч для легковых автомобилей и 70 км/ч для грузовых. Приблизительный год строительства 1989.

Тема изучения ровности автомобильных дорог и их разрушения под действием автомобильного транспорта сегодня продолжает активно рассматриваться специалистами факультета транспортах коммуникаций [2,3]. Однако, специфика этих процессов применительно к мостовым сооружениям пока изучена недостаточно.

Метод и методика

Для сбора данных о топологии покрытия на участке с путепроводом было выполнено лазерное сканирование поверхности мостового полотна и участков подходов на расстоянии порядка 30 м от деформационного шва. Измерительное оборудование – наземный лазерный сканер Faro Focus 3DX130. Сканирование производилось последовательно с четырёх разных станций, расположенных на обочинах в начале и в конце путепровода.

Как показывают результаты предыдущих исследований по определению действительных метрологических характеристик, точность лазерного сканирования составляет $\pm 0,65$ мм при доверительной вероятности 95% [4].

После сбора данных облака точек были обработаны при помощи программы «Autodesk ReCap» [5]. В процессе обработки вручную удалялись недостоверные точки, которые были сняты по проезжающим автомобилям. Также удалялись лишние участки сканирования, кроме дорожного покрытия и элементов ограждений.

Дальнейшая обработка производилась в программе «Rhinoсeros» [6]. Здесь отдельные облака точек, полученные с разных станций, объединялись в одно. Привязка и ориентация осуществлялась по дорожной разметке, ограждению и мачтам освещения.

Дальнейшая обработка велась внутри программы «Rhinoсeros» при помощи плагина «Grasshopper» [7], реализующего метод визуального программирования применительно к геометрической модели отсканированного покрытия. В результате обработки, для первичной оценки состояния покрытия, выполнялось построение цветных изополей, отображающих характер деформации покрытия (Рисунок 1).

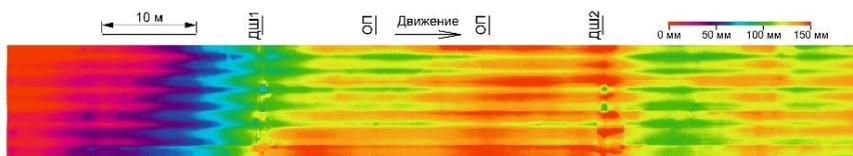


Рис. 1 Изополе высотных отметок покрытия в зоне устройства путепровода

Далее в той же программной среде выполнялось построение характерных поперечных профилей (Рисунок 2). По каждому из поперечных профилей хорошо видна колеиность и легко определяется положение дна колеи, которое, по сути, является наиболее характерной траекторией движения автотранспорта на исследуемом участке. Именно по дну колеи и выполняется дальнейшее построение продольного профиля для оценки ровности по международному параметру IRI. Следует отметить, что ось профиля не всегда является прямой.

Следующим шагом по выбранным осям выполняется построение характерных микропрофилей. Микропрофили проходят обработку с устранением точек, которые могут в дальнейшем привести к ошибкам. После чего по каждому профилю создаётся структурированный текстовый файл в формате «.txt» для импорта данных и последующей обработки в программном комплексе «КРЕДО ДОРОГИ» [8].

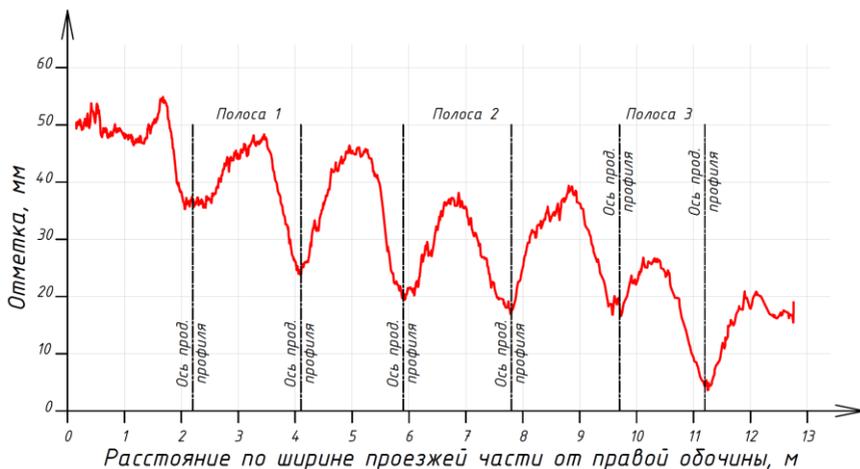


Рис. 2. Поперечное сечение проезжей части. Высота принята с корректировкой на поперечный уклон проезжей части

В программном комплексе «КРЕДО ДОРОГИ» на основе импортированных данных строится пространственный коридор, повторяющий своей топологией микропрофиль исследуемого участка. При помощи специализированного модуля «Оценка дороги» рассчитывается показатель ровности IRI [9, 10]. Для расчёта вводятся стандартизированные параметры «Золотого автомобиля» $M_v/M_s=0,15$; $C_v/M_s=653 \text{ 1/c}^2$; $C_s/M_s=63,3 \text{ 1/c}^2$; $B/M_s=6 \text{ 1/c}$ и скорость его движения 80 км/ч ($22,2 \text{ м/с}$). Среди прочего назначаются параметры: шаг отметок профиля $0,1 \text{ м}$; длина отрезка DPR $0,1 \text{ м}$; технологическая неровность 0 .

После получения динамики изменения параметра IRI по мере «проезда» «Золотого автомобиля» по исследуемому профилю данные импортируются в структурированный файл формата «.xlsx» и возвращаются в программу «Rhinoseros» для дальнейшей обработки и построения диаграмм (Рисунок 3) с использованием «Grasshopper».

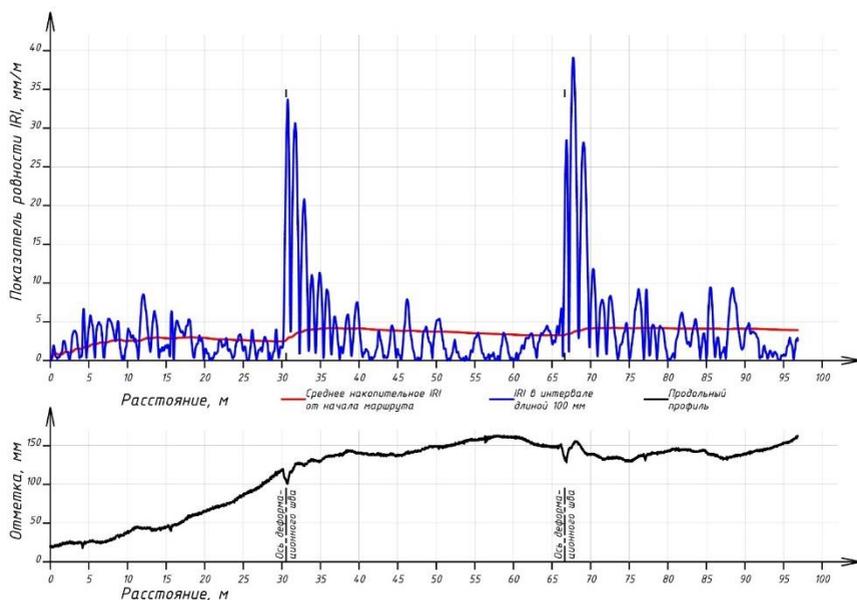


Рис. 3. Диаграмма изменения показателя IRI исследуемого участка

На этом основной алгоритм обработки завершается. По вышеприведённой методике допускается производить сбор данных о ровности дорожного покрытия в зоне устройства мостовых сооружений.

Выводы

Как показывают более ранние исследования покрытия в зоне устройства мостовых сооружений [11], основной причиной образования неровностей являются именно деформационные швы. Сам по себе деформационный шов является неровностью. Автомобили, проходящие по нему своим динамическим воздействием, разрушают со временем как сам шов, так и асфальтобетонное покрытие на прилегающих участках. Предлагаемый метод диагностики ровности деформационных швов позволяет объективно наблюдать за этим процессом и численно, при помощи уже стандартизированного параметра IRI, оценивать ровность покрытия в зоне устройства деформационных швов.

В процессе создания и апробации данной методики возникало множество интересных вопросов о характере работы самого «Золотого автомобиля», достоверности его характеристик, необходимости дополнительной обработки продольного профиля, влияния неровности в зоне устройства деформационного шва на безопасность движения и др.

Далее в работе представлены размышления на данную тему в форме приглашения к дискуссии для других исследователей, которые проводят свою работу в данном направлении.

Эксперименты и дискуссия

Для лучшего понимания амплитудно-частотных характеристик работы подрессоренной и неподрессоренной масс «Золотого автомобиля» было выполнено два тестовых «проезда» по трассе с одиночной искусственной неровностью высотой 100 мм. Результаты представлены на рисунке 4.

Если определить частоту собственных колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс по средней длине волны 19,100 м и 4,547 м соответственно, то получим значения 1,16 Гц для подрессоренной массы и 11 Гц – для неподрессоренной. В более ранних работах при приблизительном ручном вычислении этих частот получены значения 1,21 Гц и 11 Гц [12], а по результатам анализа фактических деформаций асфальтобетонного покрытия 1,29 Гц и 11,36 Гц [11]. Полученные различными методами частоты схожи.

Если обратиться к методической литературе, то можно найти описание тех же диапазонов частот при оценке плавности хода автомобиля [13]. Это связано с привычной для человека частотой колебаний при пешей ходьбе порядка 1,5 – 2 Гц и чувствительностью организма к другим частотам. Однако, не стоит забывать о том, что грузовой автотранспорт с разной степенью загрузки может иметь очень разную массу, а значит и частоты собственных колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс.

Кроме того, по диаграмме IRI со стандартным демпфированием видно, что полное затухание колебаний подвески «Золотого автомобиля», движущегося со скоростью 80 км/ч, происходит в пределах 40 метров за искусственной неровностью.

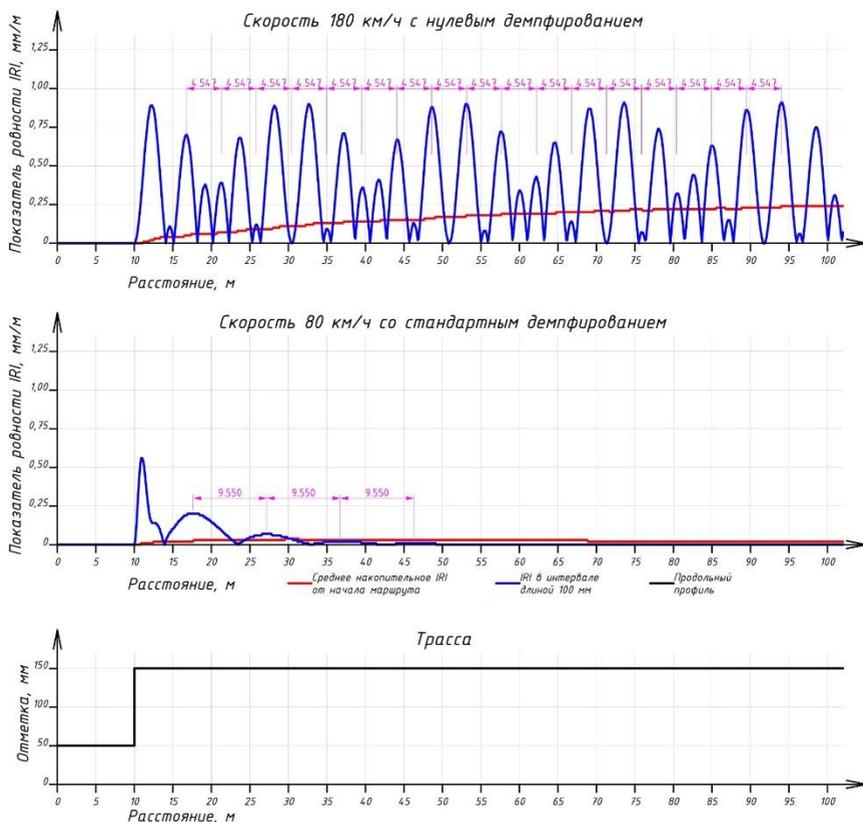


Рис. 4. Диаграмма изменения показателя IRI при «проезде» по тестовой неровности

Ещё одним экспериментом, который был проведён с математической моделью «Золотого автомобиля» стал проезд по одному из наиболее изношенных продольных профилей с разной скоростью в диапазоне от 5 до 120 км/ч. При проездах снимались пиковые значения параметра IRI при прохождении первого и второго деформационного шва и среднее накопительное значение на всём участке (Рисунок 5). Анализируя нисходящие графики, можно наблюдать работу народного принципа «Выше скорость – меньше ям». Это может быть верно с точки зрения ресурса подвески, снижения энергетических потерь от её работы или комфорта, однако в корне не верно с точки зрения безопасности движения, т.к. на высокой скорости выше вероятность потери сцепления колеса

автомобиля с дорожным покрытием, также снижается время на принятие решения в экстренной ситуации, увеличивается тормозной путь и т.д. Особенно это опасно в случае крупных неровностей, которые могут вызвать «пробой» подвески автомобиля, в этом случае возникает большая ударная нагрузка как на кузов, так и на дорожное покрытие.

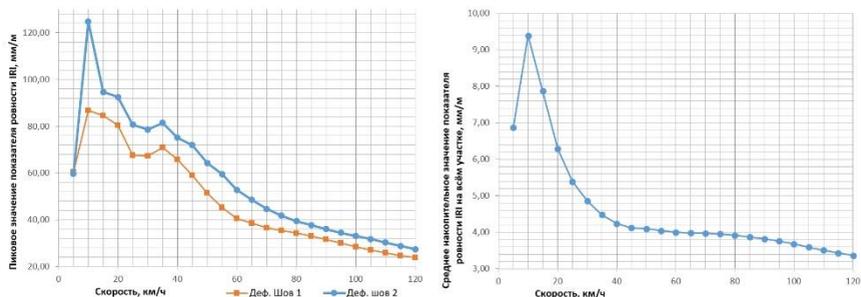


Рис. 5. Диаграмма изменения показателя IRI при «проезде» на разных скоростях движения

Также интересно было пронаблюдать динамику и характер изменения диаграмм с изменением скорости движения (Рисунок 6). Видно, что на участке перед первым деформационным швом на скоростях выше 90 км/ч графики «сбиваются в кучу», т.е. изменение величины IRI незначительно. За первым деформационным швом на скоростях от 60 км/ч до 75 км/ч изменение величины IRI также становится минимальным. Это вероятно связано с тем, что покрытие деформируется в основном тяжёлым автотранспортом, движущимся как раз в этом диапазоне скоростей.

Это связано с тем, что тяжёлый автомобильный транспорт «выкатывает» асфальтобетонное покрытие, деформируя его по тому же закону, по которому движется подрессоренная масса автомобиля с учётом наиболее характерной скорости движения, судя по графикам это 67,5 км/ч. Таким образом при движении со скоростью близкой к наиболее характерной траектория движения подрессоренной массы повторяет топологию ранее деформированного покрытия, и именно за счёт этого значение показателя IRI несколько снижается.

Характерная скорость в 67,5 км/ч крайне показательна, т.к. с обывательской точки зрения любой автолюбитель знает, что

спидометр автомобиля несколько завышает реальную скорость, т.е. когда едешь по спидометру 70 км/ч реальная скорость как раз порядка 67,5 км/ч.

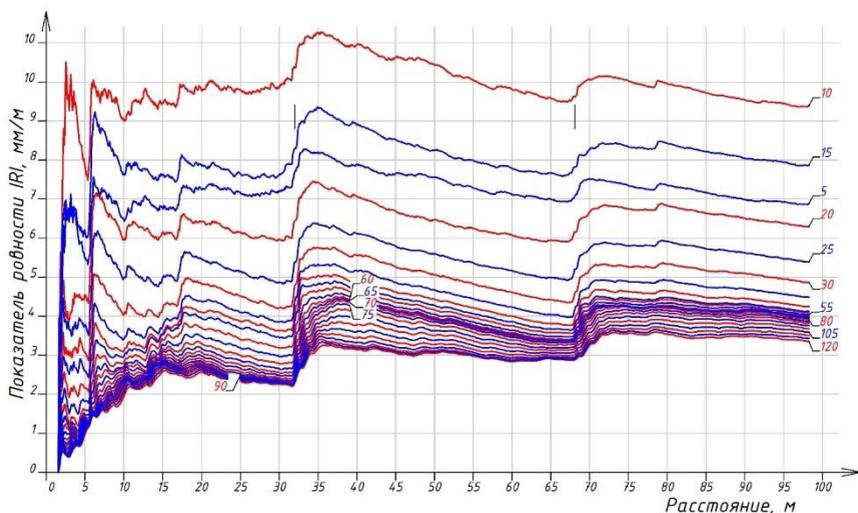


Рис. 6. Диаграмма изменения среднего накопительного показателя IRI при «проезде» на разных скоростях движения в диапазоне от 5 км/ч до 120 км/ч

Наблюдая такую динамику и характер изменения диаграмм, может возникнуть гипотеза о том, что стандартная скорость 80 км/ч для определения международного параметра IRI не вполне характерна для региональных особенностей Республики Беларусь, для наших дорог наиболее верным будет определение IRI при стандартной скорости 70 км/ч.

С другой стороны, если обратиться к фундаментальным исследованиям IRI [14, 15] можно понять, что наиболее характерная скорость движения грузовых автомобилей тогда не рассматривалась как определяющий фактор.

При этом ограничение скорости в 70 км/ч для грузовых автомобилей достаточно консервативное для нашего региона значение. В СССР оно впервые было определено в 1987 году и действует по сей день без принципиальных изменений.

С другой стороны, если обратиться к открытым источникам, то можно сказать, что наиболее распространённым ограничением

скорости для грузовых автомобилей, например в странах европейского союза, является именно скорость 80 км/ч.

Также стоит отметить, что в результате всех проведённых экспериментов средний нормируемый показатель IRI на исследуемом участке с путепроводом длиной около 100 м едва превышает 4 мм/м. Что выше значения 3,6 мм/м для первой категории дороги, но с большим запасом находится в пределах допустимых значений – 4,8 мм/м для второй категории дороги согласно ТКП 140-2015 [16]. При этом на участке присутствуют выбоины глубиной до 25 мм на деформационных швах.

Что касается фильтрации продольного профиля перед определением параметра IRI, то действующий ГОСТ 33101-2014 [10] прямо указывает «Для расчета показателя IRI используются профили, не подвергнутые фильтрации». Однако с учётом специфики сбора данных это может оказаться не совсем верным, т.к. по результатам сканирования шаг точек составляет порядка 10 мм. При этом отпечаток колеса автомобиля имеет некоторую длину и ширину. Что касается длины, при работе с профилем в «КРЕДО ДОРОГИ» профиль автоматически упрощается согласно параметру «шаг отметок профиля», который не может быть меньше 0,1 м. При этом профиль достаточно грубо упрощается и попросту «нарубается» с шагом 0,1 м без каких-то попыток усреднения участков. Это хорошо видно, если «прогнать» «Золотой автомобиль» по специально смоделированному профилю с неровностями с определённым периодом (Рисунок 7).

Учитывая довольно примитивный алгоритм работы с профилем в «КРЕДО ДОРОГИ» и с учётом ширины колеса, лучше проводить предварительную обработку профиля вычисляя его отметки не простым разрезанием облака точек, а как среднюю величину в квадрате 100x100 мм. Это должно повысить сходимость параметра IRI определяемого по математической модели на компьютере с действительным.

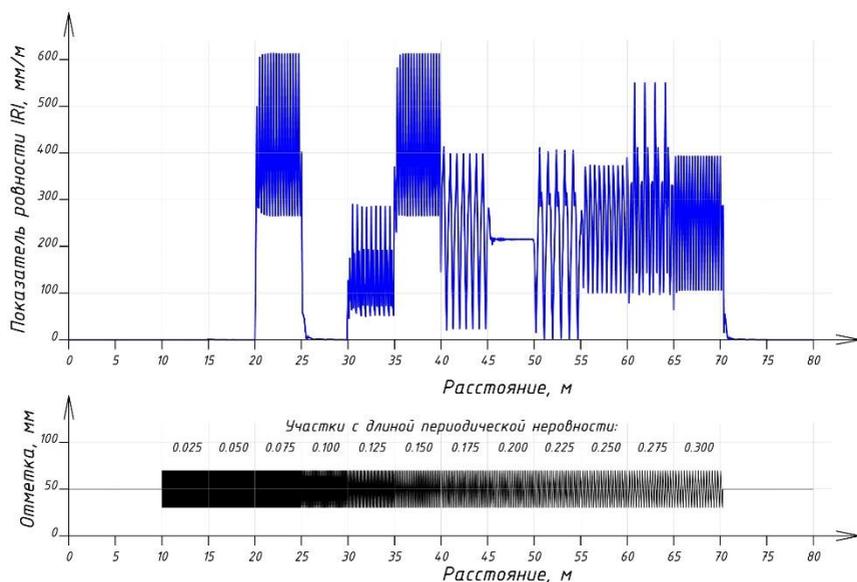


Рис. 7. Диаграмма изменения показателя IRI при «проезде» по тестовому профилю с изменяемой длиной периодической неровности. С учётом специфики программы «КРЕДО ДОРОГИ»: шаг отметок профиля задан 0,1 м, DPR задан 0,1 м

Если исходить из задачи оценки динамического воздействия на мостовое сооружение, то важно знать не только величину деформации подвески автомобиля, но и её направление, поэтому параметр IRI не очень хорошо подходит для этой задачи. Однако его преимущество в том, что он стандартизирован и признан на высоком международном уровне. Тем не менее, если говорить об оценке величины именно динамического воздействия, то известна и другая модель, разработанная Солодкой М. Г., однако эта модель пока не получила широкого распространения [17]. При этом если учитывать специфику пролётных строений и их жёсткость, то в известные модели необходимо вводить ещё один груз с переменной массой эквивалентной массе пролётного строения, а также ещё одну пружину с переменной жёсткостью, моделирующей изменение жёсткости основания на пути дорожное полотно – переходная плита – опора – центр пролёта – опора и так далее.

Литература

1. Овчинников, И. И. Повреждения зон сопряжения дорожных одежд и деформационных швов на мостовых сооружениях: возможные причины и способы их устранения / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников, Ш. Н. Валиев // Наукоедение. – 2013. – № 6. – С. 148.
2. Жуковский, Е. М. Особенности воздействия транспорта на конструкции нежестких дорожных одежд и их учет при проектировании конструкций / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко // Каспий и глобальные вызовы : Материалы Международной научно-практической конференции, Астрахань, 23–24 мая 2022 года / Составители: О.В. Новиченко [и др.]. – Астрахань: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Астраханский государственный университет", 2022. – С. 888-893.
3. Жуковский, Е. М. Оценка эксплуатационного состояния дорожных покрытий по ширине проезжей части / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение [Электронный ресурс] : материалы Международной научно-технической конференции / редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.] ; сост. В. А. Ходяков. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 65-71
4. Ходяков В.А., Коликов А.О. «Опыт применения дистанционных инструментальных методов сбора данных о деформированном состоянии мостовых сооружений» // Автомобильные дороги и мосты. 2023 №1 (31). – С. 25–34.
5. Autodesk ReCap: программное обеспечение для работы с результатами лазерного сканирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.autodesk.com/products/recap/overview?term=1-YEAR&tab=subscription. – Дата доступа : 01.10.2023.
6. Rhinoceros: программное обеспечение для работы с трёхмерной и двумерной геометрией [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.rhino3d.com. – Дата доступа : 01.10.2023.
7. Grasshopper: программное обеспечение для параметрического моделирования в Rhinoceros [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.grasshopper3d.com. – Дата доступа : 01.10.2023.
8. КРЕДО ДОРОГИ: программное обеспечение для проектирования дорог [Электронный ресурс]. – Режим доступа : credo-dialogue.ru/produkty/korobochnye-produkty/379-credo-dorogi-naznachenie.html. – Дата доступа : 01.10.2023.

9. Дороги автомобильные общего пользования. Диагностика. Определение продольного микропрофиля дорожной поверхности и международного показателя ровности IRI : СТО МАДИ 02066517.1-2006. – Москва : Московский автомобильно-дорожный институт, 2006. – 42 с.
10. Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности : ГОСТ 33101-2014. – Введ. 01.04.2017 (введен впервые). – Москва : ФГБОУ учреждение высшего профессионального образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет" (МАДИ), 2016. – 24 с.
11. Ходяков, В. А. Комплексная методика оценки деформаций асфальтобетонного покрытия на мостовых сооружениях с использованием метода наземного лазерного сканирования / В. А. Ходяков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова), Белгород, 16-17 мая 2023 г. / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2023. – С. 359–362.
12. Ходяков, В. А. О достоверности стандартных параметров модели «Золотого» автомобиля для расчета показателя IRI / В. А. Ходяков // Новые горизонты 2023 : Сборник материалов Белорусско-Китайского молодёжного форума, Минск, 9-10 ноября 2023 г. / Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2023. – С. 70 – 72
13. Руктешель, О. С. Плавность хода автомобиля : пособие для студентов специальностей 1-37 01 02 «Автомобилестроение (по направлениям)», 1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей», 1-37 01 07 «Автосервис» / О. С. Руктешель. – Минск: БНТУ, 2021. – 61 с.
14. Технический отчет Всемирного банка №46 (World Bank Technical Paper Number 46 «Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements», M.W.Sayers, T.D. Gillespie, W.D.O.Paterson, 1986, 87 p.)
15. Технический отчет Всемирного банка №45 (World Bank Technical Paper Number 45 «The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements», M.W.Sayers, T.D. Gillespie, C. Queiroz, 1986.)
16. Автомобильные дороги. Порядок выполнения диагностики : ТКП 140–2015 (33200). – Введ. 01.03.2016 (с отменой на территории РБ ТКП 140-2008 (02191)). – Минск : Республиканское унитарное

- предприятие «Белорусский дорожный инженерно-технический центр» (Белдорцентр), 2015. – 68 с.
17. Влияние неровности дорожных покрытий на эффективность автомобильных перевозок: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 05.23.11 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей / Солодка Мария Геннадьевна. - Минск, 2020. - 23 с.