

УДК 625.7

Немчинов Михаил Васильевич, д-р техн. наук, проф.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, uchsovet@madi.ru

Молчанов Андрей Владимирович, магистрант,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, dronmol@yandex.ru

МОНИТОРИНГ И ВИЗУАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Мониторинг автомобильных дорог является важнейшим методом оценки технического состояния всех дорожных конструкций, включая дорожные одежды и дорожные покрытия. Мониторинг помогает решать задачу сохранения прочности дорожных одежд. Однако длительное время он проводился визуально работниками дорожно-эксплуатационных организаций. Получая своевременно информацию о повреждениях и разрушениях дорожных одежд дорожные организации, однако, не могли достаточно обоснованно планировать ремонтные работы и, главное, точно определять их объёмы и сложность. Решение этих задач носило неопределённый характер. Рост интенсивности движения на дорогах, рост скорости движения автомобилей и их массы, высокий уровень аварийности потребовали получения конкретной количественной информации. Результатом явилось появление инструментальных методов и специального оборудования для оценки технического состояния дорожных покрытий – прочности, коэффициента сцепления и других. Другим результатом явилось исчезновение визуального метода диагностики дорожных конструкций и объектов. Но в условиях высокой интенсивности движения автомобилей по дорогам, высокой стоимости инструментальных оценочных работ сложилась практика проведения инструментальных обследований на систематически, а перед проведением крупных ремонтных работ или работ по реконструкции, причём как обоснование необходимости их проведения. Вследствие этого многие повреждения и начало разрушений дорожных покрытий и дорожных одежд оказывались незамеченными, что впоследствии значительно удорожало ремонтные работы. В этих условиях предлагается возобновить практику визуального мониторинга дорог совместно с инструментальными методами оценки их технического состояния. В качестве примера, обосновывающего это, в статье рассмотрен вопрос разрушения асфальтобетонных покрытий, обусловленного усталостью асфальтового бетона. Усталость асфальтобетона проявляется в виде сеток коротких узких трещин, длительное время не влияющих на ровность поверхности проезжей части дорог и потому не регистрируемых инструментальными методами. Экспериментально рассмотрен вибрационный фактор, способствующий (часто инициирующий) появление усталостных разрушений асфальтобетона, оценён энергетический уровень виброколебаний дорожных покрытий.

Ключевые слова: мониторинг; визуальная диагностика; усталость, трещины; асфальтобетон; виброколебания; эксперимент; амплитуда; виброускорение.

Nemchinov Mihail V., Dr. Sc., professor,
MADI, 64, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russia, uchsovet@madi.ru

Molchanov Andrej V., undergraduate,
MADI, 64, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russia, dronmol@yandex.ru

MONITORING AND VISUAL DIAGNOSTIC OF ROAD PAVEMENT

Abstract. Road monitoring is the most important method for assessing the technical condition of all road structures, including road pavements and road surfaces. Monitoring helps to solve the problem of maintaining the strength of the pavement. However, for a long time it was carried out visually by workers of road maintenance organizations. Receiving timely information about the damage and destruction of pavements, road organizations, however, could not reasonably plan repair work and, most importantly, accurately determine their volume and complexity. The solution to these problems was uncertain. The increase in traffic intensity on the roads, the increase in the speed of cars and their mass, and the high level of accidents required obtaining specific quantitative information. The result was the emergence of instrumental methods and special equipment for assessing the technical condition of pavements – strength, friction coefficient, and others. Another result was the disappearance of a visual method for diagnosing road structures and objects. But under conditions of high traffic intensity on roads, high cost of instrumental appraisal works, there was a practice of conducting instrumental surveys on a systematic basis, and before carrying out major repair or reconstruction work, moreover, as a justification of the need for them. As a result, many of the damage and the onset of the destruction of pavements and pavements were unnoticed, which subsequently greatly increased the cost of repairs. Under these conditions, it is proposed to resume the practice of visual monitoring of roads together with instrumental methods for evaluating their technical condition. As an example justifying this, the article deals with the question of the destruction of asphalt concrete pavements caused by the fatigue of asphalt concrete. Fatigue of asphalt concrete is manifested in the form of grids of short narrow cracks, which for a long time do not affect the evenness of the roadway surface and therefore are not recorded by instrumental methods. The vibration factor that contributes to (often initiating) the appearance of fatigue damage of asphalt concrete is experimentally considered, the energy level of road vibration vibrations is estimated.

Key words: monitoring; visual diagnostic; fatigue; cracks; vibration; asphalt; experiment; amplitude; vibration acceleration.

Введение

Понятие «мониторинг» подразумевает систему долгосрочных наблюдений, оценку, контроль и прогноз вероятного изменения состояния объекта наблюдения [1]. Словарь инженера-дорожника [2] рассматривает мониторинг как систему наблюдений и контроля за состоянием окружающей среды; состоящую из трёх ступеней: наблюдения, оценки

состояния и прогноза возможных изменений. В «дорожной сфере» много не только системных, но и случайных факторов, часто коренным образом влияющих на техническое состояние, работу дорожной одежды.

При обнаружении повреждений и начала разрушения объекта необходимо их быстро устранять, но для этого надо знать комплекс факторов, обуславливающих их возникновение, природу (причину) появления.

В этих условиях не обойтись без диагностики. Диагностика – необходимый компонент процесса наблюдения (мониторинга) дорожных объектов.

Основная часть

Мониторинг состояния дорожных сооружений и конструкций – давно и хорошо известный способ оценки технического и потребительского состояния автомобильных дорог. Мониторинг состояния дорожной одежды (дорожного покрытия) ведётся постоянно, с начала открытия движения по дороге. Длительное время мониторинг проводился визуально работниками дорожных служб. В силу их профессионализма, одновременно, выявлялись места, виды повреждений и причины их возникновения. Производственный опыт и теоретические знания помогали выполнять эту работу. Визуальный мониторинг обеспечивал получение необходимой и важной информации, но качественного характера, недостаточного для оценки сроков проведения ремонтных работ и, в значительной мере, их объёмов. Потребность в количественных показателях привела к созданию инструментальных средств оценки состояния дорожных одежд, дорожных покрытий. Появился инструментальный контроль. При этом единовременная комплексная оценка состояния одежды (покрытия), обеспечиваемая визуальным мониторингом, была заменена разновременной оценкой отдельных факторов: прочности (установками

динамического нагружения), ровности (установками ПКРС, ИРИ, рейками и др.), сцепных качеств (передвижными и портативными установками). Визуальный контроль был сведён к минимуму.

В результате суммарная оценка состояния дорожного покрытия и дорожной одежды и перспектив их изменения, а тем более диагностика стали затруднительными. Многие факторы, не выявляемые при инструментальном контроле, выпали из рассмотрения: наличие и характер трещин и трещинообразования, формы и параметры выбоин, состояние текстуры поверхности покрытий. Появление колеиности на проезжей части дорог потребовало разработки приспособлений для её оценки, но не получило включения в состав процесса мониторинга и диагностики. При этом забыли, что колеиность на дорогах явление известное со времени появления колёсных повозок. Всегда причиной их возникновения являлась недостаточная твёрдость, сдвигоустойчивость, малое сопротивление истиранию материала покрытия проезжей части дороги (грунта, гравия, щебня, асфальто- и цементобетонов) по отношению к воздействию колёсной нагрузки.

Автомобилизация и прогресс в автомобилестроении привели к формированию интенсивных транспортных потоков и, совместно с техническим прогрессом в дорожном строительстве обусловили высокие скорости движения, что в совокупности предельно затрудняет проведение инструментального контроля. Инструментальный контроль, достаточно дорогой, требует строго фиксированных условий проведения (постоянства скорости движения, иногда малой – например, при измерении прочности дорожных одежд, иногда высокой – при оценке ровности и сцепных качеств). По этим причинам и по условиям обеспечения безопасности его трудно осуществлять в условиях высоких интенсивности и скорости движения по дорогам. В настоящее время инструментальную диагностику проводят, как правило, для обоснования необходимости капитального ремонта дорожной одежды.

Появление видеокамер на автомобильных дорогах позволяет визуально, но техническими средствами, фиксировать состояние дорожных покрытий. Однако видеокамеры используют для мониторинга режима движения автомобилистами, фиксации его нарушения. Обслуживаются видеокамеры сотрудниками ГИБДД, не являющимися специалистами в области дорожного строительства. Мониторинг состояния дорожного покрытия требует систематической обработки материала видеокамер, требует знаний инженера-дорожника, многократно увеличивает и усложняет объём камеральных работ и повышает их стоимость. Повсеместная установка видеокамер, требующая комплексного технического обеспечения (монтажа опор, электропитания и связи с регистрирующим центром, увеличения штата сотрудников, в том числе и для их технического обслуживания) дорога в установке и содержании. По этим причинам системное использование видеокамер для мониторинга дорожных покрытий мало вероятно. В результате очень важная группа повреждений дорожных одежд и дорожных покрытий, таких как трещины, износ текстуры остаются незамеченными инструментальным контролем. Хотя именно трещины являются сигналами о повреждении (фактически начале разрушения) дорожных покрытий и одежд.

Произошли изменения и в нагрузочном процессе на дорожные одежды. К давно известным силовым и реологическим (для слоёв с органическими вяжущими) факторам – нагрузке на ось и колесо автомобиля, динамическому эффекту, процессам изгиба и сдвига – добавился новый – вибрация дорожной одежды. Фактор этот сравнительно нов [3, 4, 6, 9–15], но и до настоящего времени не принимается во внимание при проектировании и строительстве дорожных одежд.

Сегодня дороги имеют по 3–4 полосы движения в одном направлении, высокую ровность поверхности покрытий, интенсивность

транспортных потоков достигает десятков тысяч автомобилей в сутки, выросли масса автомобилей (легковых и грузовых), скорости их движения. Дорожные одежды стали значительно более прочными, массивными, со значительной толщиной (до 1...1,5 и более метров). В результате произошли изменения и в видах повреждений дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием. Практически исчез прогиб одежд под колёсами автомобилей: ведь нельзя же считать прогибом (сопровождаемым растяжением в результате изгиба) вертикальное изменение отметки поверхности дорожного покрытия на 1...0,01 мм при радиусе «чаши прогиба» в сотни и тысячи метров [3, 7–10]. Сохранились температурные («морозобойные») трещины на проезжей части дорог (хотя за рубежом таких трещин на дорогах северных стран практически нет или крайне мало). На площадках больших размеров (до 100×100 м и более) для стоянок автомобилей (при малом числе заездов и выездов или их отсутствии) таких трещин также нет или очень мало. Зато чаще стали встречаться сетки мелких коротких трещин, называемых усталостными, так как считается, что они обусловлены усталостью материала, т.е. снижением (потерей) его способности сопротивляться действующим нагрузкам. Этот вид разрушения не фиксируется при инструментальном контроле приборами для измерения ровности и сцепных качеств дорожных покрытий. Они совершенно не влияют на продольную ровность покрытий и скоростной режим автомобилей. Однако процесс разрушения дорожного покрытия пошёл и его необходимо своевременно обнаружить. Была высказана гипотеза о том, что одной из важных причин усталостных разрушений асфальтобетонных дорожных покрытий является вибрация дорожной одежды [5, 6, 12, 13 и др.]. С целью её проверки был проведён натурный эксперимент.

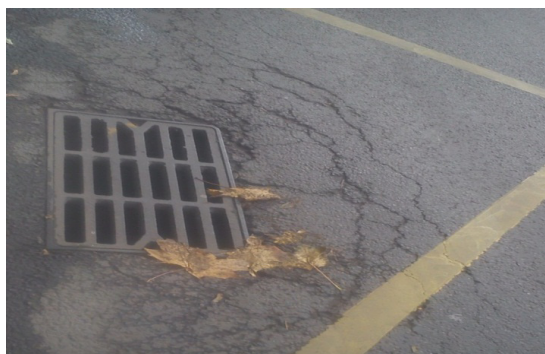
Экспериментальные исследования

В эксперименте рассматривались два вопроса:

1. Насколько распространены усталостные разрушения (трещины) на дорожных покрытиях и какова роль легковых автомобилей в их образовании?
2. Насколько велика вибрация дорожной одежды?

1. Оценка разрушений дорожного асфальтобетонного покрытия. Проведена на одной из жилых улиц г. Москвы, с преобладающим (до 90%) движением легковых автомобилей и практически полным отсутствием движения тяжёлых грузовых автомобилей. Оценка проведена путём наблюдения за образованием сеток усталостных трещин с их фиксацией на фотографиях.

Оказалось, что усталостные трещины появляются на дорожных покрытиях даже при малых интенсивностях движения (на участке эксперимента – 1100 авт./сут.), при транспортном потоке с преимущественно легковыми автомобилями на всех асфальтобетонных покрытиях на улицы: около дождеприёмных (рис. 1а) и смотровых колодцев (рис. 1б) водосточной сети, на покрытиях тротуаров вдоль бортового камня проезжей части (рис. 1в), около морозобойных трещин (рис. 1г), на проезжей части (рис. 1г, 2). На тротуарах, около колодцев разрушения носят местный характер. На проезжей части, в «ослабленных» местах дорожной одежды (по разным причинам: недостаточного уплотнения грунта и слоёв одежды, их переувлажнения) усталостные трещины занимают значительные участки (рис. 2). В конечном итоге усталостные трещины развиваются в крупные разрушения дорожного покрытия – выбоины (рис. 3).



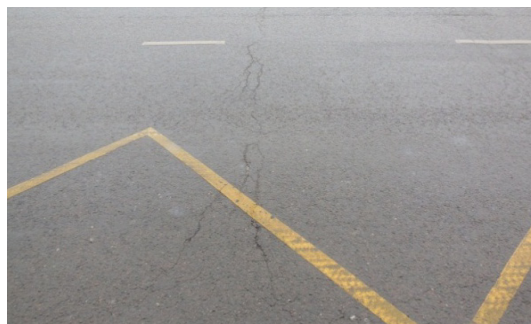
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Усталостные трещины асфальтобетонных покрытий:

*а – около дождеприёмных; б – около смотровых колодцев;
в – вдоль бортового камня, г – около морозобойных трещин*



Рис. 2. Разрушение асфальтобетонного покрытия в результате формирования сетей усталостных трещин на проезжей части дороги



Рис. 3. Формирование выбоины в результате усталостного разрушения асфальтового бетона по краям морозобойной трещины

2. Вибрация путей движения хорошо видна на железных дорогах: отлично видно вертикальное перемещение рельсов со шпалами в момент прохода колес поезда. С целью гашения этих колебаний устанавливают специальные гасители колебаний верхнего строения железнодорожного пути [14–16]. Вибрация дорожных одежд не видна невооружённым глазом. Для оценки её возможных параметров – амплитуды и ускорений колебаний проведены инструментальные измерения. Эксперименты [11] проведены на автомобильных дорогах МКАД (км 9 и 14) и М-4 (км 104). На участке проведения эксперимента дорожная одежда капитального типа с асфальтобетонным покрытием. Ширина проезжей части одного направления: МКАД – 5 полос, на дороге М 4 – 4–2 полосы. На МКАД измерения вибрации проведены при движении реального транспортного потока (на стороне измерения на 9 км – 6480 авт./ч в оба направления – 12960 авт./ч, на 14 км – 7200 авт./ч в оба направления – 14400 авт./ч, фактически по 1 и 2 полосам движения (считая от обочины) при скорости автомобилей 60–80 км/ч); на дороге М4 движение автомобилей моделировалось проездами единичного грузового автомобиля общей массой 10 т (без груза) и 22 т (с грузом) со скоростью 60 и 80 км/ч. Аппаратура – аналоговый комплекс «ROBOTRON». Датчики устанавливались на удалении 1...1,3 м от ближайшей полосы наката на крайней правой полосе движения. Схема размещения датчиков вибрации показана на рис. 4. Результаты измерений представлены в табл. 1 и 2.

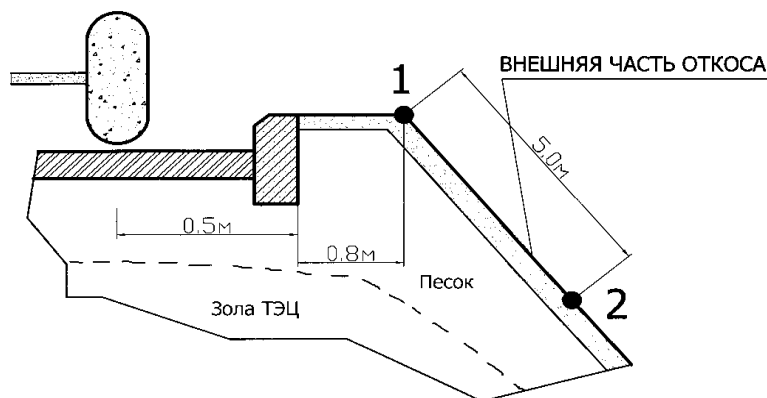


Рис. 4. Схема размещения датчиков вибрации на участках измерений на 104 км автомобильной дороги М4 «Дон»

Таблица 1

Виброускорение (мм/с^2) дорожной одежды на дороге М-4 (км 104)
при проезде грузового автомобиля (КамАЗ) массой 22 т со скоростью 80 км/ч

Вектор виброускорений	Номера замеров			
	1	2	3	4
X	232	166	148	114
Y	188	191	172	107
Z	182	189	119	98

Таблица 2

Виброускорения дорожной одежды на МКАД

км	Вектор, фон	Виброускорение (мм/с^2)
9	X, фон 20 мм/с^2	153, 300, 216, 220, 104, 96, 158, 89, 110, 45, 50, 61, 40, 43, 52, 102, 48, 133, 53, 70, 166, 141, 116, 148, 84, 229, 107, 133, 95, 104, 191, 162, 79, 110, 75, 96, 47
	Z, фон 20 мм/с^2	51, 51, 68, 79, 75, 53, 211, 63, 91, 75, 191, 170, 97, 72, 62, 72, 54, 12
	Y, фон 20 мм/с^2	101, 132, 115, 94, 76, 76, 133, 77, 88, 63, 58, 58, 68, 41, 63, 97, 51, 49
14	X, фон 20–24 мм/с^2	59, 60, 88, 86, 73, 80, 153, 88, 114, 219, 74, 75, 98, 92, 108, 130, 129, 111, 70, 76
	Z, фон 10–25 мм/с^2	150, 102, 100, 90, 95, 110, 124, 93, 100, 170, 157, 124, 146, 91, 120, 95, 107, 105
	Y, фон 20–24 мм/с^2	122, 152, 143, 195, 138, 102, 100, 211, 129, 145, 116, 138, 168, 130, 180, 110, 138, 132, 126, 174

Анализ частотного распределения энергии виброускорений показал, что её подавляющая часть сконцентрирована в зоне низкочастотных колебаний (с центральной частотой октавных полос: 2, 4, 8, 16 и 31,5 Гц.

Приведённые данные показывают, что все три компоненты виброускорения (X, Z, Y) достигают значительных величин. На основе теории Винера-Пэли-Шварца решена динамическая задача оценки влияния вибрации дорожной одежды на устойчивость грунта на откосах земляного полотна [13]. Анализ показал, что вибрация дорожной одежды, генерированная автомобильным транспортом, оказывает достаточно значительное физическое воздействие на частицы грунта даже на откосах земляного полотна, т.е. на значительном удалении от дорожной одежды,

вызывая их перемещение. В экспериментах вибрационное воздействие на грунтовые частицы откоса составило в среднем от 0,1 до 0,004 кг/см² – по нормальным напряжениям, от 0,04 до 0,001 кг/см² по касательным напряжениям. Причём пики напряжений приходятся на верхнюю и нижнюю части откоса (высота насыпи 2 м). Эти напряжения вызвали перемещения (амплитуды колебаний) частиц грунта от 0,6 до 0,2 мм. Пик перемещений наблюдается в верхней части откоса. При высоких скоростях движения (более 100 км/час) возрастает доля высокочастотных колебаний. При скоростях 40–80 км/час преобладают низкочастотные колебания. Установлено, что при высоких скоростях движения (более 100 км/час) легковые автомобили вызывают колебания асфальтобетонного покрытия, сопоставимые по энергии воздействия с воздействием грузовых автомобилей, движущимися со скоростью 60–70 км/час [13]. Характерным является существенное перераспределение энергии из низкочастотного в высокочастотный диапазоны при увеличении скорости движения, в том числе легкового транспорта.

Исследования вибрации дорожных одежд с гравийным покрытием [4] показали амплитуды колебаний, аналогичные по величине приведённым выше: при движении автомобиля МАЗ-5434 с ТМЗ (без груза) со скоростью 20...40 км/час – 0,14...0,33 мм; увеличение массы автомобиля (при движении с грузом) имеет следствием увеличение амплитуд колебаний до 1,16...2,19 мм – при расположении датчика измерений на удалении 1 м от ближайшей полосы наката на покрытии дороги.

Заключение

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Необходимо организовать визуально-инструментальный диагностический комплекс, обеспечивающий постоянный визуальный и,

в необходимых ситуациях, инструментальный мониторинг состояния дорожных одежд автомобильных дорог.

2. Основным видом разрушения асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог является усталостное, проявляющееся визуально в виде сеток мелких коротких трещин.

3. Усталостные разрушения асфальтобетонных покрытий развиваются не только при воздействии тяжёлых грузовых автомобилей, но и при воздействии легковых автомобилей.

4. Высокий уровень вибрации дорожной одежды (амплитуд, виброускорений) оказывает большое влияние на интенсификацию процесса развития усталости в асфальтовом бетоне.

Список литературы

1. Экологический словарь / С. Делятницкий [и др.]. – М.: Конкорд-ЛТД-Экопром, 1993. – 202 с.
2. Русско-Английский терминологический словарь инженера-дорожника. – Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 1999. – 324 с.
3. Конструирование и расчёт нежёстких дорожных одежд / под ред. Н.Н. Иванова. – М.: Транспорт, 1973. – 328 с.
4. Исследование колебаний дорожной конструкции гравийной автомобильной дороги под воздействием подвижной нагрузки / А.В. Жуков // Проблемы развития сети и улучшения эксплуатационных качеств автомобильных дорог местного значения и внутрихозяйственных дорог колхозов и совхозов: материалы республиканской научно-технической конференции. – Минск: Белорусский политехнический институт, 1984. – С. 91–93.
5. Немчинов, М.В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобилей / М.В. Немчинов. – М.: Транспорт, 1985. – 231 с.
6. Немчинов, М.В. Дорожная одежда автомобильных дорог. Расчёт и проектирование / М.В. Немчинов. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 108 с.
7. Углова, К.В. Теоретические и методологические основы оценки остаточного усталостного ресурса асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: дис. ... д-ра техн. наук / К.В. Углова. – Волгоград, 2009.
8. Смирнов, А.В. Колебания и волны в дорожных конструкциях / А.В. Смирнов. – Омск, Изд-во СибАДИ, 2006. – 108 с.
9. Смирнов, А.В. Расчёт дорожных и аэродромных конструкций на динамическое воздействие / А.В. Смирнов. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. – 54 с.
10. Андреева, Е.В. Современные методы проектирования дорожных конструкций автомагистралей на воздействие транспортных потоков / Е.В. Андреева, А.В. Смирнов. – Омск: СибАДИ, 2014. – 135 с.

11. Меньшов, А.С. Обеспечение местной устойчивости откосов высоких насыпей автомобильных дорог из несвязных грунтов: дис. ... канд. техн. наук / А.С. Меньшов. – М.: МАДИ, 2006. – 230 с.
12. Немчинов, М.В. Текстура поверхности дорожных покрытий. Т. 1. Обоснование, нормирование и проектирование параметров текстуры поверхности дорожных покрытий / М.В. Немчинов. – М.: ТехПолиграфЦентр, 2010. – 380 с.
13. Немчинов, М.В. Определение допустимой глубины дефектных участков автомобильных дорог / М.В. Немчинов, С.Ю. Ткачёв, С.К. Актанов // Научно-технический прогресс в дорожной отрасли: материалы научно-технического семинара. – Алма-Ата: МинавтодорКазССР, 1991.
14. Xiaozhen, S. Generalization of the Fourier transform-based method for calculating the response of a period railway track subject to a moving harmonic load / S. Xiaozhen // Journal of Modern Transportation. – 2015. – Vol. 23, no. 1. – P. 12–29.
15. Konen, A. Vibration Acceleration Distribution in Railway Ballast in Terms of Heavy Axle Load Operation / A. Konen // CETRA²⁰¹⁸: 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure, 17–19 Vay 2018, Zadar, Croatia. – P. 1209–1213.
16. Petriaev, A. Vibrodinamic Impact on the Railway Substructure and Methods of its Reduction / A. Petriaev // CETRA²⁰¹⁸: 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure, 17–19 Vay 2018, Zadar, Croatia. – P. 1223–1229.

References

1. Delyaticij S., Zajonc I., Chertkov L., Ehkzar'yan V. *Ehkologicheskij slovar'* (Environmental dictionary), Moscow, Konkord-LTD-Ehkoprom, 1993, 202 p.
2. *Russko-Anglijskij terminologicheskij slovar' inzhenera-dorozhnika* (Russian-English terminological dictionary of road engineer), Voronezh, Izdatel'stvo Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 1999, 324 p.
3. *Konstruirovanie i raschyot nezhyostkih dorozhnyh odezhd* (Design and calculation of non-rigid pavement), Moscow, Transport, 1973, 328 p.
4. Zhukov A.V. *Problemy razvitiya seti i uluchsheniya ehkspluatacionnyh kachestv avtomobil'nyh dorog mestnogo znacheniya i vnutrihozyajstvennyh dorog kolhozov i sovhozov*, Materialy respublikanskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, Belorusskij politekhnicheskij institut, 1984, pp. 91–93.
5. Nemchinov M.V. *Scepnnye kachestva dorozhnyh pokrytij i bezopasnost' dvizheniya avtomobilej* (Coupling qualities of road surfaces and traffic safety of cars), Moscow, Transport, 1985, 231 p.
6. Nemchinov M.V. *Dorozhnaya odezhda avtomobil'nyh dorog. Raschyot i proektirovanie* (Road clothes of highways. Calculation and design), Moscow, Izdatel'stvo ASV, 2016, 108 p.
7. Uglova K.V. *Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy ocenki ostatochnogo ustalostnogo resursa asfal'tobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog* (Theoretical and methodological bases of estimation of residual fatigue life of asphalt concrete pavement of highways), Doctor thesis, Volgograd, 2009.
8. Smirnov A.V. *Kolebaniya i volny v dorozhnyh konstrukciyah* (Oscillations and waves in road structures), Omsk, Izdatel'stvo SibADI, 2006, 108 p.

9. Smirnov A.V. *Raschyot dorozhnyh i aehrodromnyh konstrukcij na dinamicheskoe vozdejstvie* (Calculation of road and airfield structures for dynamic impact), Omsk, Izdatel'stvo SibADI, 2008, 54 p.
10. Andreeva E.V., Smirnov A.V. *Sovremennye metody proektirovaniya dorozhnyh konstrukcij avtomagistralej na vozdejstvie transportnyh potokov* (Modern methods of designing road structures of highways on the impact of traffic flows), Omsk, SibADI, 2014, 135 p.
11. Men'shov A.S. *Obespechenie mestnoj ustojchivosti otkosov vysokih nasypej avtomobil'nyh dorog iz nesvyaznyh gruntov* (Ensuring local stability of slopes of high embankments of roads from incoherent soils), Candidate thesis, Moscow, MADI, 2006, 230 p.
12. Nemchinov M.V. *Tekstura poverhnosti dorozhnyh pokrytij, tom 1, Obosnovanie, normirovanie i proektirovanie parametrov tekstury poverhnosti dorozhnyh pokrytij* (Surface texture of road surfaces, Vol. 1, Justification, rationing and design of surface texture parameters of road surfaces), Moscow, TekhPoligrafCentr, 2010, 380 p.
13. Nemchinov M.V., Tkachyov S.Yu., Aktanov S.K. *Nauchno-tekhnicheskij progress v dorozhnoj otrasli*, Materialy nauchno-tekhnicheskogo seminara, Alma-Ata, MinavtodorKazSSR, 1991.
14. Xiaozhen S. Generalization of the Fourier transform-based method for calculating the response of a period railway track subject to a moving harmonic load, *Journal of Modern Transportation*, 2015, vol. 23, no. 1, pp. 12–29.
15. Konen A. Vibration Acceleration Distribution in Railway Ballast in Terms of Heavy Axle Load Operation, CETRA²⁰¹⁸, 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure, 17–19 Vay 2018, Zadar, Croatia, pp. 1209–1213.
16. Petriaev A. Vibrodinamic Impact on the Railway Substructure and Methods of its Reduction, CETRA²⁰¹⁸, 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure, 17–19 Vay 2018, Zadar, Croatia, pp. 1223–1229.