

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-216-223>

УДК 625.7/8.001.5

Прогнозирование ровности дорожных покрытий

Инж. Ю. В. Буртыль¹⁾, М. Г. Солодка¹⁾,
докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. При проектировании дорожных одежд применяется сложная система алгоритмов, основанных на математических вычислениях и инженерных решениях, с расчетом оценочных критериев. Именно соблюдение нормированных требований по расчетным критериям позволяет считать конструкцию дорожной одежды надежной, а автомобильную дорогу безопасной и удобной для движения транспорта в течение принятого срока службы. При расчете на прочность, исходя из прогнозной интенсивности движения и состава потока транспортных средств, проводится расчет по основным критериям: допустимому упругому прогибу, сдвигу в слоях из неукрепленных материалов и в асфальто-бетоне, а также по предельным растягивающим напряжениям в монолитных материалах с заданным уровнем надежности. Однако в принятых концепциях расчета прочности и надежности дорожных одежд непосредственно учитывается только силовое воздействие. Для учета факторов окружающей среды необходимо разработать комплексный показатель результирующего воздействия всех факторов. В статье приведен комплекс факторов, влияющих на безопасность движения транспорта, на дорожные деформации и высоту неровности, в частности на увеличение динамического воздействия на дорогу и амплитуду колебания колеса автомобиля на дороге с неровной поверхностью (при отрыве от поверхности дороги), совпадение частоты колебаний автомобиля с собственными частотами колебаний дорожной одежды и, как следствие, на поведенческие особенности вождения. Обоснованы доводы о том, что в прогнозных моделях не учитывается ряд факторов, оказывающих существенное влияние на процессы формирования необратимой деформации в слоях материалов дорожных конструкций.

Ключевые слова: автомобильные дороги, прочность, международный индекс ровности, покрытия, деформации, модель, жесткость конструкции, транспортная нагрузка, условия эксплуатации, измерения, коэффициент динамичности

Для цитирования: Буртыль, Ю. В. Прогнозирование ровности дорожных покрытий / Ю. В. Буртыль, М. Г. Солодка, Я. Н. Ковалев // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 216–223. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-216-223>

Predicting the Evenness of Road Surfaces

Yu. V. Burtlyl¹⁾, M. G. Salodkaya¹⁾, Ya. N. Kovalev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The design of road surfaces involves application of a sophisticated algorithm system based on mathematical calculations and engineering solutions, with the calculation of evaluation criteria. It is precisely the observance of the standardized requirements in terms of design criteria that makes it possible to consider the design of the pavement as reliable, and the road as safe and convenient for traffic during the specified service life. When calculating the strength, based on the predicted traffic intensity and the composition of the traffic flow, calculations are carried out according to the main criteria: admissible elastic deflection, shear in layers of non-reinforced materials and in asphalt concrete, as well as the ultimate tensile stresses

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

in cast-in-situ materials with the specified reliability level. However, in the accepted concepts for calculating the strength and reliability of road pavements, only the force effect is directly taken into account. To take into account environmental factors, it is necessary to develop a comprehensive indicator of the resulting impact of all factors. The paper presents a complex of factors influencing on traffic safety, road deformations and irregularities the height of unevenness, in particular, an increase in the dynamic impact on the road and the amplitude of vibration of a car wheel on a road with an uneven surface (when detached from the road surface), the coincidence of the vibration frequency of the car with the natural frequencies of vibration of the road surface, and as a consequence, on the behavioral features of driving. The arguments have been substantiated that the predictive models do not take into account a number of factors that have a significant impact on the formation of irreversible deformation in the layers of materials of road structures.

Keywords: highways, strength, international evenness index, road surfaces, deformations, model, structural rigidity, transport load, operating conditions, measurements, dynamic coefficient

For citation: Burtul Yu. V., Salodkaya M. G., Kovalev Ya. N. (2021) Predicting the Evenness of Road Surfaces. *Science and Technique*. 20 (3), 216–223. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-216-223> (in Russian)

Введение

Деформации в слоях дорожной одежды характеризуют общее снижение прочности конструкции, сопровождаемое дальнейшим разрушением и разуплотнением материалов. Неровности образуются по причинам возникновения необратимых деформаций в покрытии и нижних слоях дорожной одежды под действием транспортных нагрузок и погодноклиматических факторов. При эксплуатации автомобильной дороги увеличение неровностей непосредственно связано с приростом деформаций. Анализ процесса накопления неровностей дорожных покрытий позволяет прогнозировать снижение прочности дорожной конструкции.

Причинами возникновения неровностей дорожных покрытий могут быть различные факторы: увлажнение грунтов и несвязных слоев основания, разуплотнение слоев из минеральных материалов, процессы замораживания и оттаивания, высокие положительные температуры, изменение вязкости битумных составляющих, а также срок службы дорожной конструкции и прирост интенсивности движения автомобилей. Все эти факторы формируют неровности с различной периодичностью и интенсивностью, но учитывать их при прогнозировании необходимо в комплексе.

Исследование процессов образования деформаций и неровностей дорожных покрытий

Рассматривая процесс прогнозирования необратимых деформаций, нужно одновременно

рассматривать процесс образования неровностей дорожных покрытий. Можно утверждать, что эти два процесса взаимосвязаны и отражение деформации материалов зависит от общей жесткости дорожной конструкции:

$$\Delta l = \varepsilon_N R, \quad (1)$$

где Δl – неровность покрытия, мм; ε_N – суммарная необратимая деформация в слоях дорожной одежды, мм; R – коэффициент, учитывающий жесткость дорожной конструкции, $R < 1$.

Деформации и неровности влияют на безопасность движения транспорта и долговечность автомобильной дороги:

а) деформации, отражаемые на покрытии в виде неровностей, увеличивают динамическое воздействие на дорогу и амплитуду колебания колеса, что приводит к скорейшему разрушению как дорожного покрытия, так и подвески автомобиля [1];

б) при совпадении частоты колебаний автомобиля с собственными частотами колебаний дороги при движении по неровностям возникает резкое возрастание амплитуды, что может привести к опрокидыванию автомобиля, особенно при дальнейшем торможении для погашения резонанса;

в) при движении автомобиля по неровностям возможен отрыв колес от покрытия, что может спровоцировать кратковременную потерю управления автомобилем при высоких скоростях (особенно на мокром покрытии) и резко увеличить динамические нагрузки от него на дорогу [2];

г) снижение скорости движения транспортного потока вследствие широкого разброса ча-

стот колебаний автомобиля, вызванных неровностями, приводит к ухудшению потребительских качеств дороги: пропускной способности, уровня загрузки движением, экологической безопасности;

д) нестабильное движение автомобиля по неровностям приводит к длительному повышенному вниманию и напряжению водителя, что в свою очередь ведет к общей утомляемости и снижению объективной оценки ситуации на дороге.

Структура дорожно-строительных материалов представляет собой систему упругих и вязкопластичных связей. При этом общая деформация дорожных покрытий определяется исходя из ее составляющих: обратимой (упругой) и необратимой (пластической).

В зарубежных исследованиях для прогнозирования деформаций разработаны модели, учитывающие такие параметры, как напряжения, начальная деформация в материалах, количество приложенных нагрузок, эмпирические параметры уравнений регрессии, полученные в результате испытаний. В табл. 1 приведены некоторые модели расчета необратимых деформаций ϵ_N в зарубежных источниках.

Представленные модели сориентированы в основном на силовые факторы: прочность дорожной конструкции и величину нагрузки (на-

пряжения). Необратимые деформации наиболее интенсивно формируются при условии превышения фактического количества нагрузок над расчетным значением. Общая схема развития деформации при приложении нагрузки приведена на рис. 1.

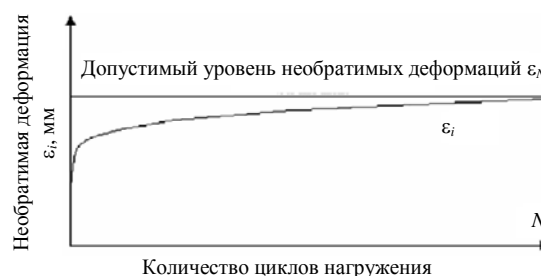


Рис. 1. Изменение необратимой (остаточной) деформации при повторных нагрузках N

Fig. 1. Change in irreversible (permanent) deformation under repeated loads N

Для дорожной одежды прочность и надежность будут обеспечены при выполнении условия

$$\sum_{i=1}^t \frac{\epsilon_N}{\epsilon_i} \geq 1, \quad (2)$$

где t – расчетный период приложения нагрузки, лет; ϵ_N, ϵ_i – допустимый и фактический уровни необратимых деформаций за год, мм.

Таблица 1

Формулы для расчета необратимых деформаций при воздействии повторных нагрузок

Formulas for calculating irreversible deformations when exposed to repeated loads

Формула	Параметр формулы	Разработчик, источник
$\epsilon_N = a + b \lg N$	N – количество приложенных расчетных нагрузок, ед.; a, b – параметр модели	Barksdale R. D., University of Michigan (Англия) [3]
$\epsilon_N = \epsilon_1 + a \lg N + b (\lg N)^2$	ϵ_1 – остаточная начальная деформация, возникающая при первом приложении нагрузки, мм; N – количество приложенных расчетных нагрузок, ед.; a, b – параметр модели	Leng J., North Carolina State University (США) [4]
$\epsilon_N = A((\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_s)^b (B + \lg N)$	A, b, B – параметры модели, являющиеся постоянными для различных материалов; σ_1, σ_3 – нормальное напряжение по площадкам, МПа; σ_s – предельный девиатор напряжений, МПа	Cheung L. W., the University of Nottingham (Великобритания) [5]
$\epsilon_N = \epsilon_6 (NE/10^6)^b [E(10^\circ\text{C})/E(15^\circ\text{C})]^{0.5} k_c k_r k_s$	ϵ_6 – деформация при прохождении 10^6 циклов нагрузки, мм; NE – количество приложений нагрузки, ед.; $E(10^\circ\text{C}), E(15^\circ\text{C})$ – модуль упругости при 10 и 15 °С; k_c – коэффициент для различных типов асфальтобетона (1,0–1,5); k_r – коэффициент вероятности; k_s – то же неоднородности грунтов	Petit C., Diakhaté M., Université de Limoges (Франция) [6]
$\epsilon_N = (A + mN)(1 - \exp[-BN])$	N – количество приложенных расчетных нагрузок, ед.; m, A, B – параметры уравнения регрессии	Wolff H., Visser A. [7]

Формирование модели изменения показателя ровности дорожного покрытия

Выдвигается гипотеза о существовании линейной зависимости между сроком службы дорожной одежды и показателем ровности дорожного покрытия (IRI) жестких дорожных одежд. Для подтверждения данной гипотезы проведены измерения на 30 опытных участках после выполнения ремонтных мероприятий по устройству слоя асфальтобетонного покрытия [8]. Ежегодные значения показателя ровности на опытных участках обрабатывались с использованием статистического анализа (метод наименьших квадратов), и по средним годовым значениям строилась зависимость вида

$$IRI = TR + B, \quad (3)$$

где IRI – среднегодовое значение показателя ровности на опытном участке, м/км; T – период наблюдения, лет; R – коэффициент ежегодного прироста неровностей дорожного покрытия, м/(км·год); B – начальная величина показателя ровности, м/км.

В качестве опытных принимались участки дорожных конструкций на республиканской сети дорог с различной интенсивностью движения и начальной величиной показателя ровности дороги. Основным критерием подтверждения взаимозависимости двух величин (времени и неровности покрытия) является коэффициент корреляции.

Профилометрический метод позволяет определять ровности дороги широкого диапазона, а измерительная система, основу которой составляют лазерные датчики высокой частоты, имеет устойчивую систему отсчета при проведении измерений [9, 10]. Интегрирующим показателем измерения неровностей может служить показатель ровности IRI, представляющий собой отношение величины суммарного вертикального перемещения эталонной массы автомобиля к длине участка (м/км или мм/м).

В качестве параметра, оценивающего величину неровностей, принимали международный индекс ровности IRI. Прогнозная модель (3) в практических исследованиях будет иметь вид

$$IRI_t = TR + IRI_0, \quad (4)$$

где IRI_t – значение показателя ровности к концу расчетного срока, м/км; IRI_0 – то же в начале расчетного срока, м/км.

Допустимый прирост неровностей дорожного покрытия R зависит от типа дорожной конструкции и погодных-климатических факторов [11]. В зависимости от наличия и характеристики источников увлажнения участки дороги разделяются по типу местности и типу дорожной одежды, в соответствии с нормативными требованиями [12]. Проведенные полевые испытания подтверждают прирост неровностей дорожного покрытия, отражаемых на покрытии по аппроксимированной линейной зависимости (4).

Тип дорожной одежды по капитальности соответствует интенсивности движения и на наиболее прочных конструкциях, при существующей интенсивности движения прирост неровностей покрытия наблюдается меньше, чем на конструкциях облегченного типа с меньшей интенсивностью движения. Тип местности по увлажнению влияет на прирост неровностей при глинистых и суглинистых грунтах на дорогах низких категорий (табл. 2).

Таблица 2

Результаты измерений ежегодного прироста неровностей на дорогах с различными условиями эксплуатации
Results of measurements of annual increase in irregularities on roads with different operating conditions

Интенсивность, расч. авт./сут.	Тип местности по увлажнению	Тип дорожной одежды	Ежегодный прирост неровностей, мм/м
Более 2000	1, 2, 3	Капитальный	0,03
1500–2000	1	Капитальный	0,05
	2, 3		0,08
1000–1500	1	Капитальный	0,08
	2, 3		0,10
800–100	1, 2, 3	Капитальный	0,12
	1	Облегченный	0,08
	2		0,11
	3		0,13
400–800	1, 2, 3	Капитальный	0,06
	1	Облегченный	0,01
	2, 3		0,12
200–400	1	Облегченный	0,15
	2		0,18
	3		0,21

Устанавливая нормативное значение прироста неровностей покрытия для участков дорог одной классификации по условиям экс-

плуатации, можно определять надежность дорожной одежды по условию

$$K_{н,р} = \frac{R_{\phi}}{R_n} \geq 1, \quad (5)$$

где $K_{н,р}$ – коэффициент надежности дорожного покрытия; R_{ϕ} , R_n – фактическое и нормативное значение ежегодного прироста неровностей дорожного покрытия для дорог одной классификации, м/(км·год).

Определение коэффициента динамичности в зависимости от величины неровности дорожного покрытия

Исследование взаимодействия транспортного средства и автомобильной дороги – процесс, требующий глубокого анализа показателей динамического воздействия транспортного потока на конструкцию автомобильной дороги, а также учета степени влияния неровности дорожного покрытия на колебания конструкции транспортного средства [13].

Изучение увеличения динамического воздействия нагрузки и, как следствие, накопления неровностей необходимо при расчетах проектирования и эксплуатации автомобильных дорог, например в расчетах материального ущерба при проезде тяжеловесного и крупногабаритного транспорта [12].

В работах А. К. Бируля и А. В. Смирнова показано, что при повышении скорости движения наблюдается рост динамической составляющей воздействия, которая растет с увеличением величины неровности дорожного покрытия. При этом показатель динамического воздействия увеличивается и может в два и более раза превысить статическую нагрузку от транспортного средства. Амплитуды колебаний и их частотный диапазон зависят от высоты неровностей, а также от их формы и длины. Для различных микропрофилей поверхности автомобильных дорог в зависимости от преобладающих длин неровностей при различных скоростных режимах может наблюдаться значительное увеличение динамичности воздействия транспортного средства на конструкцию автомобильной дороги [14].

Процесс движения автомобиля по дороге сопровождается воздействием его колес на дорожное покрытие в области, представляющей по своей конфигурации овал шин различной формы, зависящей от типа и грузоподъемности транспортного средства. Исследования показали, что величины прогибов невелики и определяются десятками долями миллиметра. При этом чем выше скорость движения, тем меньше деформируется дорожная одежда, причем откосы прогиба неровности дорожного покрытия можно рассматривать как прямолinéйные.

Касательные и вертикальные воздействия от колес транспортных средств на дорожное покрытие при движении имеют динамический характер и переменны по величине, направлению и статистическим показателям. Динамические нагрузки автомобиля на дорогу увеличиваются при движении по неровной поверхности дорожного покрытия и сопровождаются ударами и колебаниями колес и кузова автомобиля. Коэффициент динамичности нагрузки $K_{дин}$ отражает увеличение нагрузки (деформации) при динамическом воздействии по сравнению со статическим. Коэффициент $K_{дин}$ рекомендуется определять по формуле

$$K_{динi} = \frac{P_i}{P_{стi}}, \quad (6)$$

где $K_{динi}$ – коэффициент динамичности i -й, отражающий нагрузку оси автомобиля на дорожное покрытие при движении автомобиля; P_i – динамическая нагрузка колеса i -й оси автомобиля на дорожное покрытие при движении автомобиля, Н; $P_{стi}$ – статическая нагрузка колеса i -й оси автомобиля на дорожное покрытие, Н.

Максимальный коэффициент динамичности $K_{дин\max}$ определяется отношением максимальной динамической нагрузки на заднюю ось базового грузового автомобиля к его статической нагрузке

$$K_{дин\max} = \frac{P_{\max}}{P_{ст}}, \quad (7)$$

где P_{\max} – максимальное значение динамической нагрузки колеса на дорожное покрытие

при движении автомобиля, N ; $P_{ст}$ – статическая нагрузка колеса на покрытие, N .

При расчетах используют значение максимального коэффициента динамичности при динамическом воздействии грузового автомобиля на заданном участке автомобильной дороги. Для участков автомобильных дорог с различной высотой неровности коэффициенты динамичности следует рассчитывать на основе модели системы «транспортное средство – дорога», так как на этих участках наблюдается значительный разброс величин коэффициента динамичности (от 1,2 до 2,5) в зависимости от неровности дорожного покрытия, осевой нагрузки и скорости движения автомобиля.

В нормативных документах по проектированию дорожных одежд коэффициент динамичности вертикальной нагрузки $K_{дин}$ определяется как отношение значения вертикальной нагрузки автомобиля, передаваемой на поверхность дорожного покрытия при скорости его движения по горизонтальному участку дороги, к вертикальной нагрузке, передаваемой колесом на поверхность покрытия от неподвижного автомобиля. При значительных неровностях динамические нагрузки автомобиля на дорогу резко возрастают: с увеличением скорости движения до 80 км/ч коэффициент динамичности может повышаться до 3,0. Величина $K_{дин}$ зависит от массы и загруженности автомобиля: для грузовых транспортных средств при полной (номинальной) нагрузке его значение равно 2,0. Увеличение скорости движения сопровождается вначале быстрым ростом коэффициента динамичности, затем рост $K_{дин}$ замедляется. Так, при высоких скоростях он практически не меняется.

Для оценки динамического воздействия используется критерий, определяющий отношение динамических усилий, возникающих при проезде транспортного средства, к его статическому весу. При расчете нагрузки на дорожную конструкцию в отечественных нормативных документах коэффициент динамичности принимается равным 1,3. При $K_{дин} > 1,3$ нагрузки считаются динамическими перегрузками.

Для участков автомобильных дорог с неудовлетворительным показателем ровности $K_{дин}$ необходимо рассчитывать в зависимости от величины неровности дорожного покрытия, осевой нагрузки автомобиля и скорости его движения, так как их величины очень различаются. В качестве показателя расчетного коэффициента динамичности на эксплуатируемых автомобильных дорогах нужно использовать значение $K_{дин\ max}$ при движении по планируемому участку со скоростью 85 км/ч.

По итогам моделирования динамического воздействия автомобиля с учетом неровностей поверхности дорожного покрытия были обнаружены следующие закономерности:

- с помощью коэффициента динамичности на выбранном участке дороги можно провести сравнительный анализ по уровню динамического воздействия автомобиля на дорогу;
- на достаточно ровных участках (с нормативным показателем ровности) средний коэффициент динамичности при эксплуатационных скоростных режимах движения 60–100 км/ч не превышает 1,3;
- на неровных участках дорог коэффициент динамичности достигает значений 1,3–2,0.

Расчеты позволили определить поле максимальных (критических) динамических нагрузок, коэффициентов динамичности $K_{дин}$ (рис. 2) в зависимости от различных значений показателя ровности дорожного покрытия IRI и скорости движения автомобилей v_a . Критерий $K_{дин}$ комплексно характеризует качество (стабильность) процесса перевозки грузов с учетом возможного вида повреждений дороги и автомобиля.

На основании анализа проведенных экспериментов (рис. 2) установлено, что величина максимального коэффициента динамичности на неровных участках дороги при скорости движения грузового автомобиля 60–100 км/ч составляет от 1,20 до 1,94, а также в определенных условиях может превышать 2,0. Максимальный коэффициент динамичности связан с неровностью дорожного покрытия и не отражает уровень динамического воздействия транспортных средств на всем участке автомобильной дороги.

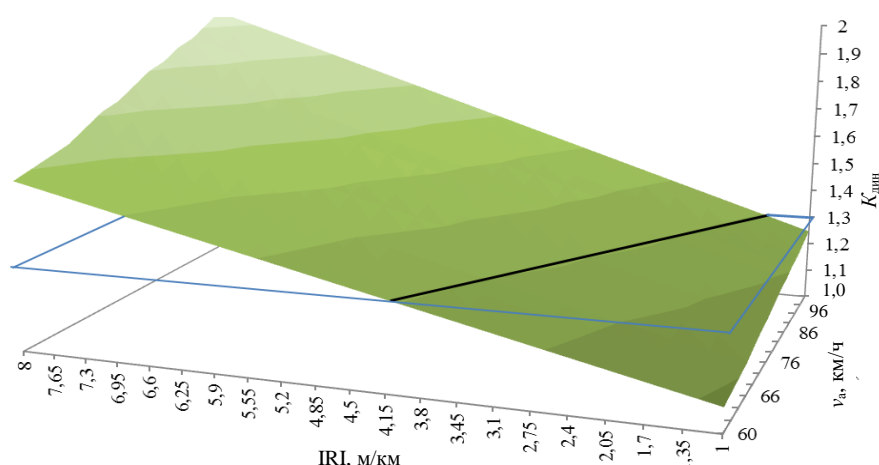


Рис. 2. Максимальные значения $K_{дин}$ для различных величин показателя ровности дорожного покрытия IRI и скорости движения автомобиля $v_a = 60–100$ км/ч

Fig. 2. Maximum values of K_{dyn} for various values of IRI pavement evenness indicator and vehicle speed of $v_s = 60–100$ km/h

ВЫВОДЫ

1. В существующих прогнозных моделях не учитывается ряд факторов, оказывающих существенное влияние на процессы образования необратимой деформации в слоях материалов дорожных конструкций:

а) при воздействии транспортных нагрузок на дорожное покрытие не учитываются усталостные свойства материалов, характеризующиеся не только количеством проходов транспортных средств, но и временной периодичностью приложения нагрузки в интервалах 0,10–0,01 с;

б) при возникновении переменных напряжений в элементарном слое асфальтобетонного покрытия на стадии непосредственного воздействия транспортной нагрузки и после ее снятия они не учитываются, хотя присутствует эффект Баушингера, при котором пластические деформации формируются при изменении знака напряжений независимо от величины нагрузки [8];

в) изменение структуры дорожного покрытия при перемешивании материалов и свойств битума при технологии асфальтобетона, влияние водной среды, а также дефекты на покрытии не позволяют рассматривать этот объект как стабильную систему, имеющую фиксированные прочностные характеристики в течение длительного времени;

г) при высоких температурах асфальтобетонное покрытие работает не только в упругой ста-

дии, но и в пластичной (закон вязкого течения), и в этом случае модель прогнозирования деформаций не будет соответствовать математической модели строго для упругой деформации.

2. Проведенные за длительный период на опытных участках измерения позволяют считать допустимым применение линейной модели изменения неровностей дорожного покрытия при оценке технического состояния сети автомобильных дорог в целом.

3. Полученная аппроксимированная модель прогнозирования образования неровностей подтверждается опытными исследованиями на сети республиканских дорог.

4. Предложенные качественные характеристики надежности дорожной одежды на основании результатов автоматизированных измерений за длительный период позволяют выявлять участки дорог с наибольшим приростом неровностей покрытия и соответственно с критической деформацией, т. е. наименьшей прочностью дорожной конструкции. Такое прогнозирование даст возможность планировать ремонтные мероприятия на сети дорог и устанавливать безопасные режимы движения с ограничениями транспортной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солодкая, М. Г. Исследование параметров колебаний в зоне контакта автомобиля с дорогой / М. Г. Солодкая, Я. Н. Ковалев // Наука и техника в дорожной отрасли. 2019. № 4. С. 26–29.

2. Исследование влияния дорожных неровностей на режим движения автомобиля с помощью электронных машин непрерывного действия / Ю. В. Беленький [и др.] // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1965. № 10. С. 128–133.
 3. Barksdale, R. D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials / R. D. Barksdale // Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements, London, Sept. 11–15, 1972. London: University of Michigan, 1972. P. 161–174.
 4. Leng, J. Characteristics and Behavior of Geogrid-Reinforced Aggregate under Cyclic Load / J. Leng. USA: North Carolina, North Carolina State University, 2002. 152 p.
 5. Cheung, L. W. Laboratory Assessment of Pavement Foundation Materials / L. W. Cheung. United Kingdom: Nottingham, the University of Nottingham, 1994. 224 p.
 6. Fatigue Performance of Interfaces and Longitudinal Top-Down Cracking in Multilayered Pavements / C. Petit [et al.] // Road Materials and Pavement Design. 2009. Vol. 10, No 3. P. 609–624.
 7. Wolff, H. Incorporating Elastic-Plasticity in Granular Layer Pavement Design Institution of Civil Engineers Transport / H. Wolff, A. Visser // Proceedings of Institution of Civil Engineers Transport. London, 1994. P. 259–272.
 8. Буртыль, Ю. В. Критерии эксплуатационной надежности автомобильных дорог с жесткими дорожными одеждами / Ю. В. Буртыль // Автомобильные дороги и мосты. 2012. № 2. С. 21–31.
 9. Дороги автомобильные общего пользования. Диагностика. Определение продольного микропрофиля дорожной поверхности и международного показателя ровности IRI. Общие требования и порядок проведения: СТО МАДИ 020665171–2006. Введ. 15.08.2006. М., 2006. 42 с.
 10. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий: СТ РК 1219–2003. Введ. 01.01.2005. Астана, 2005. 27 с.
 11. Безопасность автомобильных дорог: ТР ТС 014/2011. Введ. 15.02.2015. М.: Мин-во транспорта Рос. Федерации, 2015. 40 с.
 12. Автомобильные дороги. Нормы проектирования: ТКП 45-3.03-19–2006 (02250). Введ. 01.07.2006. Минск: Минстройархитектуры, 2006. 47 с.
 13. Бахрах, Г. С. Сопоставительная модель оценки срока службы дорожных одежд жесткого типа по критерию усталостного растрескивания при их конструировании / Г. С. Бахрах // Труды ГП «РосдорНИИ». М., 1998. Вып. 9. С. 51–59.
 14. Петкявичюс, Э. Анализ и оценка показателей качества асфальтобетонных покрытий автомагистралей Литвы / Э. Петкявичюс, Р. Петкявичюс // Вестник БНТУ. 2006. № 1. С. 21–26.
- Поступила 18.02.2021
Подписана в печать 20.04.2021
Опубликована онлайн 31.05.2021
- REFERENCES
1. Solodkaya M. G., Kovalev Ya. N. (2019) Investigation of Vibration Parameters in the Contact Zone of the Car with the Road. *Nauka i Tekhnika v Dorozhnoy Otrastli = Advanced Science and Technology for Highways*, (4), 26–29 (in Russian).
 2. Belen'kii Yu. B., Kovalev Ya. N., Lomako D. M., Furunzhiev R. I. (1965) Investigation of the Influence of Road Irregularities on Driving Mode of Vehicle Using Continuous Electronic Machines. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo i Arkhitektura* [Proceedings of Higher Education Institutions. Construction and Architecture], (10), 128–133 (in Russian).
 3. Barksdale R. D. (1972) Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. *Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements, London, Sept. 11–15, 1972*. London, University of Michigan, 161–174.
 4. Leng J. (2002) *Characteristics and Behavior of Geogrid-Reinforced Aggregate under Cyclic Load*. USA, North Carolina, North Carolina State University. 152.
 5. Cheung L. W. (1994) *Laboratory Assessment of Pavement Foundation Materials*. United Kingdom, Nottingham, the University of Nottingham. 224.
 6. Petit C., Diakhaté M., Millien A., Phelipot-Mardelé A., Pouteau B. (2009) Fatigue Performance of Interfaces and Longitudinal Top-Down Cracking in Multilayered Pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 10 (3), 609–624.
 7. Wolff H., Visser A. (1994) Incorporating Elastic-Plasticity in Granular Layer Pavement Design Institution of Civil Engineers Transport. *Proceedings of Institution of Civil Engineers Transport*. London, 259–272.
 8. Burtul Yu. V. (2012) Criteria for the Operational Reliability of Highways with Non-Rigid Road Clothes. *Avtomobil'nye Dorogi i Mosty* [Highways and Bridges], (2), 21–31 (in Russian).
 9. TO MADI [Organization Standard – Moscow Automobile and Road Construction Technical University] 020665171–2006. *Public Highways. Diagnostics. Determination of Longitudinal Micro-Profile of Road Surface and International Evenness Index IRI. General Requirements and Procedure*. Moscow, 2006. 42 (in Russian).
 10. ST RK [Standard of the Republic of Kazakhstan] 1219–2003. *Automobile Roads and Airfields. Methods for Measuring Unevenness of Substrates and Coatings*. Astana, 2005. 27 (in Russian).
 11. TR TS [Technical Regulations of the Customs Union] 014/2011. *Road Safety*. Moscow, Ministry of Transport of the Russian Federation, 2015. 40 (in Russian).
 12. ТКП [Technical Code of Common Practice] 45-3.03-19–2006 (02250). *Highways. Design Standards*. Minsk, Publishing House of Architecture and Construction, 2006. 47 (in Russian).
 13. Bakhrakh G. S. (1998) Comparative Model for Assessing the Service Life of Non-Rigid Road Pavements by the Criterion of Fatigue Cracking During their Design. *Trudy GP RosdorNII* [Proceedings State Enterprise Russian State Road Research Institute]. Moscow, (9), 51–59 (in Russian).
 14. Petkevicius E., Petkevicius R. (2006) Analysis and Evaluation of Qualitative Parameters of Highway Asphalt Concrete Pavements in Lithuania. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (1), 21–26 (in Russian).

Received: 18.02.2021

Accepted: 20.04.2021

Published online: 31.05.2021