

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ДОРОГ

И.И. ЛЕОНОВИЧ, доктор технических наук, профессор
Белорусский национальный технический университет

Ю.В. Буртыль, заместитель начальника управления диагностики
дорог и мостов республиканского унитарного предприятия
«Белорусский дорожный инженерно-технический центр»,
Минск, Беларусь

В статье рассматриваются вопросы прогнозирования формирования необратимых деформаций дорожных одежд, как с учетом известных теоретических моделей, так и на основании предложенной автором аппроксимированной модели изменения ровности покрытий дорог во времени.

The article examines the formation of irreversible deformation prediction pavements, as based on the known theoretical models, and on the basis proposed by the author of the approximated model changes evenness of roads over time.

Введение

Деформации в слоях дорожной одежды характеризуют общее снижение прочности конструкции, сопровождаемое дальнейшим разрушением и разуплотнением материалов. Неровности покрытия автомобильной дороги формируются по причинам возникновения необратимых деформаций в покрытии и слоях дорожной одежды, под действием транспортных нагрузок и погоднo-климатических факторов. При эксплуатации автомобильной дороги прирост неровностей непосредственно связан с приростом деформаций. Рассматривая процесс накопления неровностей можно утверждать об интенсивности формирования деформаций, и в дальнейшем, прогнозировать снижение прочности дорожной конструкции.

Причинами возникновения неровностей 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 формирования деформаций и неровностей дорожных одежд

Рассматривая процесс прогнозирования необратимых деформаций, мы одновременно рассматриваем процесс формирования неровностей. Можно утверждать, что эти два процесса взаимосвязаны и отражение деформации материалов в дорожной одежде на покрытии зависит от общей жесткости дорожной конструкции (1)

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

где Δl – неровности, отражаемые на покрытии, мм; ε_N – суммарная необратимая деформация в слоях дорожной одежды, мм; R – коэффициент отражения деформаций, 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;

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 колеса от покрытия, что может спровоцировать кратковременную потерю управления автомобилем при высоких скоростях, особенно на мокром покрытии;

г) снижение скорости движения транспортного потока, вследствие широкого разброса частот колебаний автомобиля, вызванных неровностями, приводит к снижению 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, и общая деформация определяется исходя из ее составляющих: обратимой (упругой) и необратимой (пластической).

В зарубежных исследованиях для прогнозирования деформаций разработаны модели, учитывающие такие параметры как напряжения, начальную деформацию в материалах, количество приложенных нагрузок, эмпирические параметры уравнений регрессии, полученные в результате испытаний. В таблице 1 приведены некоторые модели расчета необратимых деформаций (ϵ_N) зарубежных разработчиков.

Таблица 1 – Формулы для расчета необратимых деформаций при воздействии повторных нагрузок

Формула	Параметры формулы	Разработчик, источник
1	2	3
$\epsilon_N = a + b \cdot \lg N$	N-количество приложенных расчетных нагрузок, единиц a,b – параметры модели	Barksdale R.D., University of Michigan(Англия)[1]
$\epsilon_N = \epsilon_1 + a \cdot \lg N + b \cdot (\lg N)^2$	ϵ_1 – остаточная начальная деформация, возникающая при первом приложении нагрузки, мм; N - количество приложенных расчетных нагрузок, единиц; a,b – параметры модели.	Leng J., North Carolina State university (США) [2]

1	2	3
$\varepsilon_N = A \cdot ((\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_s)^b \cdot (B + \lg N)$	<p>A, b, B – параметры модели, являющиеся постоянными для различных материалов, σ_1, σ_3 – нормальные напряжения по площадкам, МПа, σ_s – предельный девиатор напряжений, МПа.</p>	<p>Cheung L.W., the University of Nottingham (Великобритания) [3]</p>
$\varepsilon_N = \varepsilon_6 \cdot (NE/10^6)^b \cdot [E_{(10^\circ\text{C})} / E_{(15^\circ\text{C})}]^{0.5} \cdot k_c \cdot k_r \cdot k_s$	<p>ε_6 – деформация при прохождении 10^6 циклов нагрузки, мм; NE – количество приложений нагрузки, единиц; $E_{(10^\circ\text{C})}$ – модуль упругости при 10°C; $E_{(15^\circ\text{C})}$ – модуль упругости при 15°C; k_c – коэффициент для различных типов асфальтобетона (1-1,5); k_r – коэффициент вероятности; k_s – коэффициент неоднородности грунтов</p>	<p>Petit C., Diakhaté M., Université de Limoges (Франция) [4]</p>
$\varepsilon_N = (A + m \cdot N) \cdot (1 - \exp[-B \cdot N])$	<p>N – количество приложенных расчетных нагрузок, единиц; m, A, B – параметры уравнения регрессии.</p>	<p>Wolff H., Visser A. [5]</p>

Представленные модели сориентированы в основном на силовые факторы: прочность дорожной конструкции и величину нагрузки (напряжения). Необратимые деформации наиболее интенсивно формируются при условии превышения фактического количества нагрузок над расчетным значением. Общая схема развития деформации при приложении нагрузки приведена на рисунке 1, при этом участок длительно развивающихся деформаций аппроксимировано можно представить линейной зависимостью.

Для дорожной одежды прочность и надежность будут обеспечены при выполнении условия (2)

$$\sum_{i=1}^t \frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_i} \geq 1 \quad (2)$$

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

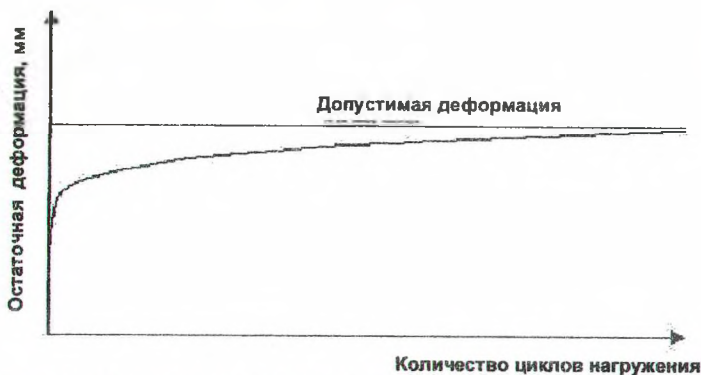


Рисунок 1 – Изменение необратимой деформации при повторных нагружках

В прогнозных моделях не учитывается ряд факторов, оказывающих существенное влияние на процессы формирования 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 периодичностью приложения нагрузки в интервалах 0,1-0,01 с.

б) при возникновении переменных напряжений на элементарную площадку асфальтобетонного покрытия: на стадии подъезда транспортного средства к площадке, непосредственного воздействия и воздействия после снятия нагрузки присутствует эффекта Баушингера, при котором пластические деформации формируются при изменении знака напряжений не зависимо от величины нагрузки [6].

в) изменение структуры дорожной одежды при перемешивании материалов и свойств битума в асфальтобетоне, влияние водной среды, дефекты на покрытии не позволяют рассматривать объект воздействия – дорожную конструкцию как стабильную систему, имеющую фиксированные прочностные характеристики в течении

длительного времени.

г) при высоких температурах асфальтобетонное покрытие работает не только в упругой стадии, но и в пластичной (закон вязкого течения) и в этом случае модель прогнозирования деформаций не будет соответствовать математической модели строго для упругой деформации.

Оценить величину неровностей при проведении исследований проще. Глубина неровностей на покрытии определяется как разность смещений поверхности покрытия в рассматриваемой точке неровности и в точке, в которой смещение имеет наименьшее значение. Необходимо разработать модель прогнозирования необратимых деформаций на основании прогнозирования неровностей, что позволит в перспективе реализовать на практике и внедрить полученную модель в действующие системы оценки эксплуатационного состояния дорог.

Прогнозирование формирования неровностей нежестких дорожных одежд

Для разработки модели прогнозирования неровностей, на основании существующих современных исследований принимаем общие концептуальные решения:

1) с увеличением нагрузки от транспортных средств величина остаточных деформаций увеличивается и математически, аппроксимировано может быть представлена линейной зависимостью (рис. 1);

2) прирост деформации во времени наблюдается во всех слоях дорожной конструкции и для участков дорог с прочностью, не соответствующей проектной, этот процесс изначально более интенсивный;

3) деформации, сформированные от воздействия погодноклиматических условий, не имеют устойчивой закономерности развития и, следовательно, не могут быть смоделированы;

4) суммарные деформации, сформированные в дорожной конструкции, как в слоях покрытия, так и в нижележащих слоях отражаются на покрытии автомобильной дороги в виде неровностей, имеющих различную форму и длину (рис. 2);

5) прогнозируя развитие неровностей, можно прогнозировать

развитие необратимых (остаточных, пластических) деформаций.

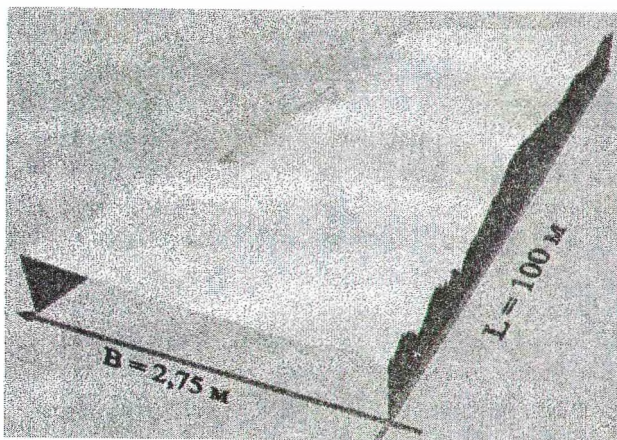


Рисунок 2 – Профиль покрытия автомобильной дороги с зафиксированными неровностями

Теоретическое обоснование прогнозирования формирования неровностей на покрытии дороги можно сформулировать, основываясь на гипотезе линейного суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера, описывающие процессы накопления повреждений (3)

$$\sum_{i=1}^t \frac{N}{N_i} \geq 1, \quad (3)$$

где t – расчетный период, лет; N – допустимое количество расчетных автомобилей в год, единиц; N_i – фактическое количество расчетных автомобилей в год, единиц.

Принимая гипотезу о линейной аппроксимированной зависимости между нагрузкой и деформацией, с учетом формул (2) и (3), с учетом погодно-климатических факторов получаем зависимость (4)

$$\sum_{i=1}^t \frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_i} = \sum_{i=1}^t \frac{N}{N_i} \cdot R_1, \quad (4)$$

где R_1 – коэффициент, учитывающий влияние погодно-климатических факторов, $R_1 > 1$.

Исходя из формулы (1) зависимость (4) запишем в виде (5)

$$\sum_{i=1}^t \frac{\Delta l}{\Delta l_i} \cdot R = \sum_{i=1}^t \frac{N}{N_i} \cdot R_1, \quad (5)$$

где Δl – допустимый прирост неровностей за год, мм; Δl_i – фактический прирост неровностей за год, мм.

Фактический прирост неровностей за расчетный период определяем по формуле (6)

$$\sum_{i=1}^t \Delta l_i = \frac{R}{R_1} \cdot \sum_{i=1}^t \frac{\Delta l \cdot N_i}{N} \quad (6)$$

Международные требования к ровности покрытия сформированы и прописаны в нормативных документах [7,8], в том числе и для стран Таможенного союза [9]. Величину неровностей для автомобильной дороги определяют на эталонном участке и принимают за единицу измерения количество неровностей на линейной дистанции L (мм/м). На участке дороги протяженностью L фактически прирост неровностей к концу расчетного периода определяем по формуле (7)

$$\sum_{i=1}^t \Delta l_i = \frac{l_t - l_0}{L}, \quad (7)$$

где l_t – объем неровностей к концу расчетного срока службы, мм/м; l_0 – объем неровностей при вводе участка в эксплуатацию, мм/м.

Учитывая, что допустимый прирост неровностей (Δl) рассчитывается на участке аналогичной длины, полученная модель прогнозирования объема неровностей к концу расчетного срока определяется по формуле (8)

$$l_t = \frac{R}{R_1} \cdot \sum_{i=1}^t \frac{\Delta l \cdot N_i}{N} + l_0. \quad (8)$$

Практические исследования ровности асфальтобетонных покрытий

Реализация разработанной модели на практике вызывает определенные трудности и необходимо на примере сети автомобильных дорог сформировать модель применимую к существующим методам измерений и фактическому состоянию дорог.

1) Предполагается, что для дорог, где фактическое количество расчетных автомобилей превышает расчетное, разработанная модель не будет работать. Теоретически такая конструкция превысила расчетные нагрузки и нуждается в реконструкции. Однако существующая сеть республиканских дорог Республики Беларусь на 60 % состоит из дорог с превышением суммарных расчетных нагрузок за срок службы, но работоспособность по основным эксплуатационным параметрам обеспечена. Поддерживающий ремонт проводится не на всем протяжении участка дороги и, следовательно, оценить участок в целом сложно.

В этом случае необходимо принять для дорог с интенсивностью соответствующей установленным интервалам условный расчетный срок службы (T) и оценивать допустимый объем неровностей за этот период. Переход от расчетных нагрузок к фактическому сроку службы предложен Г.С. Бахрахом [10]. Тогда формула (8) для дорог с интенсивностью в одинаковом интервале примет вид (9)

$$l_t = \frac{R}{R_1} \cdot T \cdot \sum_{i=1}^t \Delta l + l_0 \quad (9)$$

Оценивать величину неровностей к концу срока службы необходимо для каждой классификации дорог отдельно. Классификация интенсивности движения и расчетных сроков службы принять в соответствии с таблицей 2.

2) Практически оценивать величину неровностей на дорожном покрытии необходимо в полном объеме, в том числе неровности в виде просадок различной длины и неровностей в виде волн на продольном профиле. При широком диапазоне длин неровностей их измерение невозможно только с помощью трехметровой рейки и приборов типа «толчкомер» различной конструкции. Рейки в виду ограничения длины, измеряют неровности определенной длины волны, при этом неровности в виде выбоин и трещин не суммируются. Индикаторы вертикальных перемещений, установленные на автомобиле, при определенном сочетании частоты колебаний установки и объекта измерения (резонанс) ошибочно фиксируют суммарное перемещение подвески. Также следует учитывать износ материалов измерительной системы приборов такого типа.

Таблица 2 – Расчетный срок службы для дорог с интенсивностью движения расчетных автомобилей

Интенсивность движения расчетных автомобилей, авт/сут.	Расчетный срок службы, лет
200-400	6
400-800	8
800-1000	10
1000-1500	12
1500-2000	13
более 2000	14

Профилометрический метод позволяет измерять неровности широкого диапазона, а измерительная система, основу которой составляют лазерные датчики высокой частоты, имеет устойчивую систему отсчета при проведении измерений. Интегрирующим показателем измерения неровностей может служить показатель ровности IRI, представляющий собой отношение величины суммарного перемещения эталонной массы автомобиля к длине участка, и который приводится в единицах м/км или мм/м.

Принимаем в качестве параметра, оценивающего величину неровностей индекс ровности IRI. Прогнозную модель (9) при ее применении в практических исследованиях запишем в виде (10)

$$IRI_t = \frac{R}{R_1} \cdot T \cdot \sum_{i=1}^t \Delta I + IRI_0, \quad (10)$$

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

3) Допустимый прирост неровностей покрытия (ΔI) зависит от типа дорожной конструкции и погодно-климатических факторов. Теоретически сложно установить требования к ежегодному приросту неровностей для различных вариантов конструкций и сочетаний погодных условий эксплуатации.

В течение 12 лет (2001-2013) в РУП «Белдорцентр» проводились ежегодные измерения ровности покрытий на республиканских дорогах. На основании данных измерений на 253 опытных участках построены эмпирические зависимости изменения ровности во времени. Классификации участков определялась по интенсивности движения, дорожной одежде и типа местности по увлажнению.

В зависимости от наличия и характеристики источников увлажнения участки дороги разделяются по типу местности и типу дорожной одежды, в соответствии с нормативными требованиями [11]. Проведенные испытания подтверждают прирост неровностей, отражаемых на покрытии по аппроксимированной линейной зависимости, на примере 3 участков (рис. 3-5).

Тип дорожной одежды по капитальности соответствует интенсивности движения и на наиболее прочных конструкциях, при существующей интенсивности движения, прирост неровностей 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. 3).

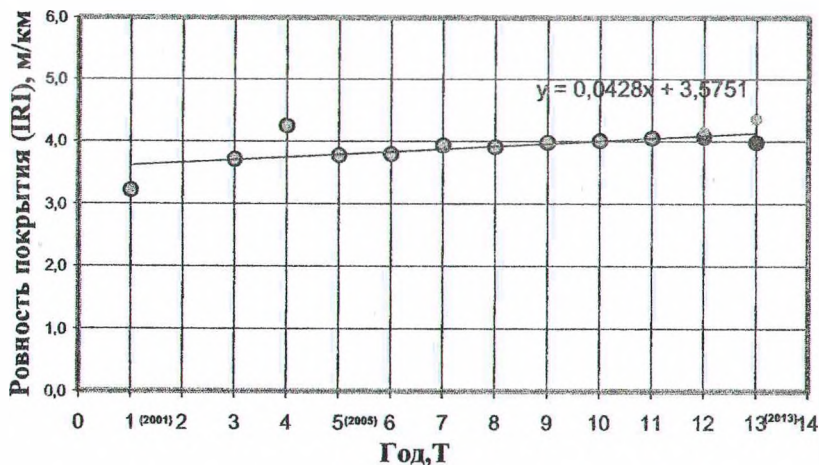


Рисунок 3 —Изменения ровности на участке Подъезд к г. Брест км 0-2 (прирост неровностей 0,0428 мм/м·год)

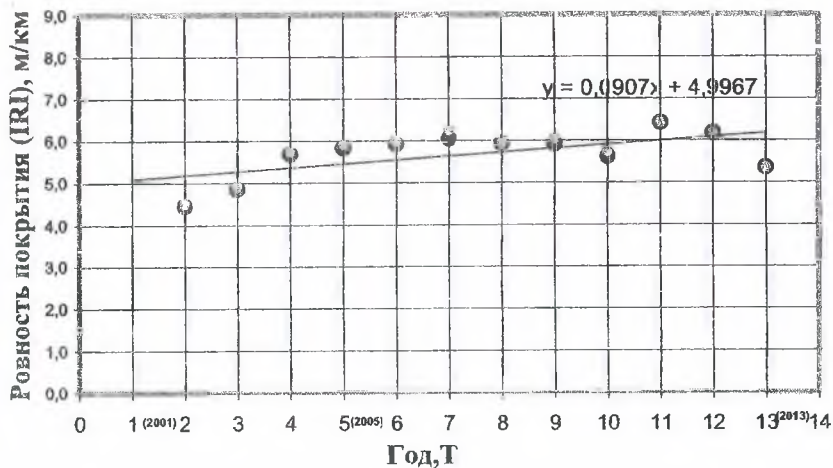


Рисунок 4 –Изменения ровности на участке а/д Молодечно - Сморгонь км 39-50 (прирост неровностей 0,0907 мм/м·год)

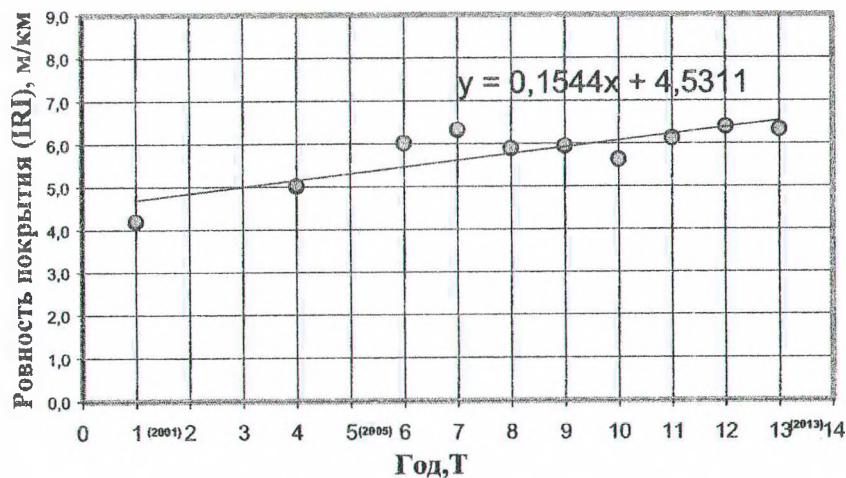


Рисунок 4 –Изменения ровности на участке а/д Житковичи - Д.Городок-граница Украины км 66-88 (прирост неровностей 0,154 мм/м·год)

Таблица 3 – Результаты измерений ежегодного прироста неровностей на дорогах с различными условиями эксплуатации

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	облегченный	0,12
200-400	1	облегченный	0,15
	2		0,18
	3		0,21

Окончательная аппроксимирующая модель прогнозирования неровностей на дорожном покрытии запишем в виде (11)

$$IRI_t = T \cdot R_\phi + IRI_0, \quad (11)$$

где IRI_t – суммарная неровность на покрытии к концу расчетного срока, м/км; T – расчетный срок службы, лет; R_ϕ – фактический прирост неровностей за год, в зависимости от типа дорожной одежды, местности по увлажнению и интенсивности движения расчетных автомобилей, мм/м·год; IRI_0 – начальная суммарная неровность на покрытии в первый год расчетного срока, м/км.

Устанавливая нормативное значение прироста неровностей для участков дорог одной классификации по условиям эксплуатации можем определять надежность дорожной одежды по условию (12)

$$K_{н,р} = \frac{R_\phi}{R_n} \geq 1, \quad (12)$$

где $K_{н,р}$ – коэффициент надежности дорожного покрытия; R_n – нормативное значение ежегодного прироста неровностей для дорог одной классификации, мм/м·год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неровности на покрытии отражают деформации дорожной одежды и являются показателем надежности автомобильной дороги. Прогнозирование необратимых деформаций по отдельным параметрам не может достоверно отражать реальный режим эксплуатации автомобильных дорог. Теоретические исследования определили ряд условий, учитывать которые необходимо при разработке моделей прогнозирования деформаций и неровностей.

Проведенные измерения за длительный период на опытных участках позволяют утверждать о допустимости применения линейной модели изменения неровностей при оценке сети автомобильных дорог в целом. Полученная аппроксимированная модель прогнозирования неровностей подтверждается практическими исследованиями на сети республиканских дорог. Предложенные качественные характеристики надежности дорожной одежды на основании результатов автоматизированных измерений за длительный период позволят выявлять участки дорог с наибольшим приростом неровностей и соответственно деформаций, т.е. наименьшей прочностью дорожной конструкции. Такое прогнозирование позволит планировать ремонтные мероприятия на сети дорог и устанавливать безопасные режимы движения и ограничения транспортной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base course materials / R.D. Barksdale // Proceedings of the 3 rd International conference on asphalt pavements, London, September 11-15, 1972 / University of Michigan. - London, 1972. - pp. 161-174.
2. Leng J. Characteristics and behavior of geogrid-reinforced aggregate under cyclic load : dissertation submitted Doctor of philosophy : 2002 / J. Leng; North Carolina State university. - North Carolina, USA, 2002. - 152 p.
3. Cheung L.W. Laboratory assessment of pavement foundation materials : dissertation submitted Doctor of philosophy : 1994 / L.W. Cheung ; the University of Nottingham. - Nottingham, United Kingdom, 1994. - 224 p.

4. Petit C. Fatigue performance of interfaces and longitudinal top-down cracking in multilayered pavements / Petit C., Malick D., Millien A., Phelipot-Mardelé A., Pouteau B // Road Materials and Pavement Design. – 2009. – № 10(3). – p. 609-624.
5. Wolff H. Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design institution of civil engineers transport / Wolff H., Visser A. // Proceedings of Institution of Civil Engineers Transport. – London, 1994. – pp. 259-272.
6. Буртыль, Ю.В. Критерии эксплуатационной надежности автомобильных дорог с нежесткими дорожными одеждами / Ю.В. Буртыль // Автомобильные дороги и мосты – 2012. – № 2. – С. 21–31.
7. Дороги автомобильные общего пользования. Диагностика. Определение продольного микропрофиля дорожной поверхности и международного показателя ровности IRI. Общие требования и порядок проведения : СТО МАДИ 02066517.1-2006. – Введ. 14.08.2006. – М.: 2006. – 42 с.
8. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий : СТ РК 1219-2003. – Введ. 16.07.2003 : Алматы : 2003. – 59 с.
9. Технический регламент Таможенного союза. Безопасность автомобильных дорог : ТР ТС 014/2011. – Введ. 18.11.11 : СПб. : 2011. – 30 с.
10. Бахрах, Г.С. Сопоставительная модель оценки срока службы дорожных одежд нежесткого типа по критерию усталостного растрескивания при их конструировании / Г.С. Бахрах // тр. ГП Росдорнии, Вып. 9. – М.: 1998. – С. 51-59.
11. Автомобильные дороги. Нормы проектирования : ТКП 45-3.03-19-2006. – Введ. 26.01.06. – Минск : Минстройархитектуры, 2006. – 42 с.