

**Юрий Валерьевич БУРТЫЛЬ**,  
начальник отдела диагностики дорог  
и научных разработок  
РУП "Белорусский дорожный  
инженерно-технический центр"

**Иван Иосифович ЛЕОНОВИЧ**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры  
"Строительство  
и эксплуатация дорог"  
Белорусского национального  
технического университета

## ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ РОВНОСТИ ПОКРЫТИЯ И ПРОЧНОСТИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

### INTERRELATIONSHIPS BETWEEN THE ROAD PAVEMENT EVENNESS AND ITS STRENGTH

В статье приведен обзор существующих зависимостей ровности покрытий от прочности нежестких дорожных одежд. Полученные математические решения в некоторой степени подтверждают гипотезу о взаимосвязи этих двух параметров. На основании проведенных исследований предлагается внести изменения в существующие системы диагностики, в основу которых может быть положен анализ динамики изменения ровности покрытия за срок службы.

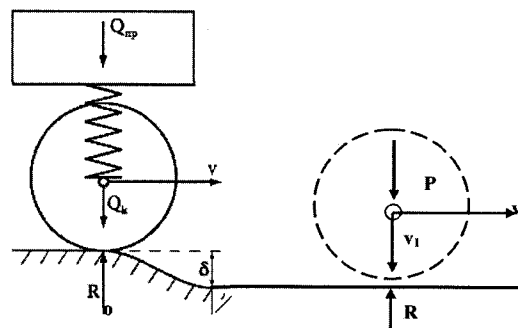
This paper gives an overview of the general relationships between the evenness and strength of non-rigid road pavements. The mathematical solutions obtained prove, to some extent, the theory of relationship between these two parameters. A number of changes to the existing diagnostics systems are proposed to be made on the basis of the studies fulfilled. The analysis of the dynamics of changes in the pavement evenness with time can be taken as the basis for the diagnostics systems.

#### ВВЕДЕНИЕ

Ввиду многообразия факторов, влияющих на прочность дорожных одежд и ее изменение с течением времени, определить истинное прочностное состояние дорожных конструкций затруднительно. Кроме того, при всяком взаимодействии нагрузки с материалом нежестких покрытий в вязкой стадии в процессе эксплуатации появляются необратимые деформации, что не позволяет в полной мере говорить о применении в расчетах теории упругости. В то же время с точки зрения механики неровность обусловлена накоплением неравномерно распределенных необратимых (пластических) деформаций. Процесс накопления происходит интенсивнее в наиболее ослабленных точках материала покрытия и в местах возникновения усиленного динамического воздействия транспортной нагрузки в течение всего срока службы. В результате уменьшения объема материала, вследствие накопления необратимой деформации возникают неровности на покрытии. Длительное формирование неровностей приводит к образованию устойчивого профиля с собственными колебательными частотами, что предполагается принять за характеристику прочности дорожной одежды. В доказательство выдвинутых гипотез предлагается рассмотреть некоторые существующие теории взаимосвязи этих двух характеристик.

#### ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВЛИЯНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ ПОКРЫТИЯ НА ДИНАМИКУ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ

При движении по автомобильной дороге транспортное средство в любой момент времени может оказаться на выступе или впадине волны различной формы и длины. При этом вектор его скорости  $v$  в момент нахождения на выступе направлен по касательной к поверхнос-



$Q_{сп}$  — вес автомобиля с грузом;  $Q_k$  — вес колеса с мостом;  
 $v$  — горизонтальная составляющая скорости;  
 $v_1$  — вертикальная составляющая скорости;  
 $P$  — сила давления на покрытие от веса автомобиля и веса колеса;  $R_o, R$  — сила реакции опоры;  
 $\delta$  — величина неровности

**Рис. 1.** Схема воздействия колеса автомобиля на дорожное покрытие в момент прохождения неровности

ти, отрывая колесо от покрытия на доли секунды. Опускаясь на покрытие со скоростью  $v_1$ , колесо свою потенциальную энергию в момент соприкосновения с покрытием преобразует в кинетическую, воздействуя на покрытие динамической силой (рис. 1).

При динамическом ударе колеса изменение результирующего контактного воздействия, исходя из законов кинематики, определяется выражением

$$R \cdot \Delta t = m_k \cdot v_1, \quad (1)$$

где  $R$  — результирующая контактного взаимодействия, кН;

$\Delta t$  — время контактного воздействия, с;

$m_k$  — масса автомобиля, кг;

$v_1$  — скорость движения колеса, м/с.

Скорость колеса в момент контакта с поверхностью определяется законами динамики из выражения

$$v_1 = \sqrt{2g \cdot \delta}, \quad (2)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $\delta$  — величина неровности (амплитуда волны), м.

Значение контактного давления на дорожное покрытие определяется по формуле

$$P = \frac{R}{\pi \cdot r^2}, \quad (3)$$

где  $P$  — сила давления на покрытие, МПа;  
 $r$  — радиус отпечатка колеса, м.

Подстановкой в выражение (3) параметров, полученных по зависимостям (1) и (2), получаем значение давления на покрытие в виде выражения

$$P = \frac{m_k \cdot \sqrt{2g \cdot \delta}}{\Delta t \cdot \pi \cdot r^2}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что при постоянных значениях параметров массы и радиуса отпечатка колеса транспортного средства значение давления на асфальтобетонное покрытие зависит от времени воздействия  $\Delta t$  (скорости движения) и амплитуды волны  $\delta$  (величины неровности).

### ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РОВНОСТИ ПОКРЫТИЯ И ПРОЧНОСТИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

В подтверждение приведенных выкладок экспериментальными исследованиями А. Р. Рзаева установлено влияние формы и размера отдельных коротких неровностей проезжей части на динамику движения автомобиля. По его утверждению, увеличение динамического давления колеса на покрытие возникает с ростом радиуса неровности, давления воздуха в шинах и скорости движения автомобиля. Также подробно рассмотрел влияние дорожных условий на колебания ходовой части Бомхард [1], установив зависимость коэффициента динамичности от состояния проезжей части (очень хорошее, хорошее волнистое, с большими неровностями) и скорости движения автомобиля. А. Г. Малофеев [2] отметил, что в зависимости от величины и шага неровностей водители выбирают такую скорость движения, при которой динамическое воздействие характеризуется коэффициентом динамичности в пределах 1,30–1,35.

Профессором А. К. Бируля [3] в 1970-х годах была предложена зависимость (5) между прочностью дорожной одежды и ровностью покрытия от суммарной массы брутто пропущенных автомобилей:

$$N_p = \left( \frac{3,7}{I_y} \right)^{3,85} \cdot (0,0084 \cdot (S_k - S_n))^{0,4 + (6,7/I_y)^{2,13}}, \quad (5)$$

где  $N_p$  — число проходов автомобилей, приведенных к расчетной нагрузке на ось, шт.;  
 $S_k, S_n$  — соответственно конечная (на время  $t$ ) и начальная ровность покрытия для толчкомера, см/км;  
 $I_y$  — значение прогиба конструкции дорожной одежды, см.

Искомое выражение ровности на момент ее оценки зависит от начального значения ровности покрытия,

времени эксплуатации автомобильной дороги и прочностных характеристик дорожной одежды.

По данным исследований О. А. Красикова [4] установлено, что величина относительного изменения ровности покрытия зависит в основном от прочности и однородности дорожной одежды, характеризуемой стандартом отклонения модуля упругости, а также суммарной интенсивностью движения. Полученное выражение математической модели, описывающее изменение ровности дорожных покрытий во времени  $S_t$ , представлено выражением

$$S_t = S_0 \left[ 1 + c \cdot E_{\min}^d \cdot N_c(t)^{a \cdot E_{\min}^b} \right], \quad (6)$$

где  $S_0$  — начальное значение ровности покрытия, см/км;  
 $E_{\min}$  — минимальный модуль упругости с заданной надежностью при односторонней доверительной вероятности, МПа;  
 $N_c$  — суммарная интенсивность, приведенная к расчетной нагрузке, авт.;  
 $t$  — время службы дорожной одежды, с;  
 $a, b, c, d$  — параметры, значения которых устанавливаются на основании эксперимента.

Модель деградации ровности с учетом результатов изменения коэффициента прочности дорожной конструкции предложена учеными Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета [5]. Приведенные математические модели адекватны экспериментальным данным в соответствии с критерием Фишера для асфальтобетонных (7) и чертосщебеночных покрытий (8):

$$S(t) = \frac{S(t_0) \cdot 0,5}{\sqrt[3]{0,12 K_{np}}} \cdot \exp(0,08t), \quad (7)$$

$$S(t) = \frac{S(t_0) \cdot 0,6}{\sqrt[3]{0,10 K_{np}}} \cdot \exp(0,09t), \quad (8)$$

где  $S(t)$  — ровность покрытия на момент прогнозирования, см/км;  
 $S(t_0)$  — начальная ровность покрытия, см/км;  
 $K_{np}$  — коэффициент прочности дорожной одежды;  
 $t$  — время эксплуатации дорожной одежды, лет.

Изучение зависимости ровности покрытий от прочностных характеристик дорожных одежд проводилось не только на стадии эксплуатации автодороги, но и на стадии ее проектирования. Так, на основании значений минимальных требуемых модулей упругости дорожных одежд и исследований И. А. Золоторя по изучению вопросов изменения требуемой ровности к концу срока службы дорожной одежды получена зависимость требуемого модуля упругости  $E_{\min}$  от ровности покрытия [6]

$$E_{\min} = -11,477 \cdot S + 294,77, \quad (9)$$

где  $S$  — допустимая ровность покрытия к концу срока службы дорожной одежды, измеренная по трехметровой рейке, мм.

Предполагается, что минимальный модуль упругости при расчете дорожной одежды можно назначать исходя из требуемой ровности покрытия к концу службы

дорожной одежды для интенсивности менее 40 000 транспортных единиц за расчетный период [7].

Неровности покрытия при воздействии с колесом автомобиля вызывают дополнительные вертикальные перемещения несущей части автомобиля, что в свою очередь приводит к динамическому воздействию транспортного средства на покрытие автомобильной дороги. На основании исследований А. В. Смирнова [8] установлена зависимость допустимой необратимой деформации покрытий нежестких дорожных одежд и ровности покрытий

$$h_{\text{доп}}^{\text{нж}} = \frac{1}{2\nu} \sqrt{g \cdot S^2 \cdot (K_{\text{дин}}^{\text{доп}} - 1)^2 \cdot \frac{p \cdot (1 - \mu_{\text{уср}}^2) \cdot D}{E_{\text{экв осн}}}}, \quad (10)$$

где  $\nu$  — скорость движения автомобиля, м/с;  
 $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $S$  — ровность покрытия, м/км;  
 $K_{\text{дин}}^{\text{доп}}$  — допустимый динамический коэффициент;  
 $p$  — статическое давление колеса, МПа;  
 $\mu_{\text{уср}}$  — усредненный коэффициент Пуассона дорожной одежды;  
 $E_{\text{экв осн}}$  — эквивалентный модуль упругости дорожной одежды;  
 $D$  — диаметр отпечатка колеса расчетного автомобиля, м.

На современном этапе расчета нежестких дорожных одежд по данным исследований МАДИ предполагается, что дорожную одежду следует проектировать с таким расчетом, чтобы под действием многократных кратковременных подвижных нагрузок в течение совокупной за срок службы дорожной одежды продолжительности расчетных периодов остаточные деформации, вызванные пластическими смещениями, не превышали величины, допустимой по условию обеспечения эксплуатационной ровности. Условие прочности по сдвигу имеет вид:

$$K_{\text{пр}} \cdot T \leq T_{\text{доп}}, \quad (11)$$

где  $K_{\text{пр}}$  — коэффициент прочности при расчете по сдвигу, принимаемый в соответствии с предложениями МАДИ;  
 $T$  — активное напряжение сдвига в грунте земляного полотна от действующей нагрузки, МПа;  
 $T_{\text{доп}}$  — допустимое напряжение сдвига, МПа.

Для определения  $T_{\text{доп}}$  была предложена формула

$$T_{\text{доп}} = 0,03516 \cdot \left[ \lg(\Delta U) - (0,26 + 0,13\bar{B}) \lg(1 + 0,1N_{\text{р.сум}}) + 1,3 - 0,7\bar{B} \right], \quad (12)$$

где  $\Delta U$  — допустимый за срок службы дорожной одежды прирост необратимой (остаточной) деформации, мм;  
 $\bar{B}$  — среднее значение коэффициента консистенции грунта земляного полотна;  
 $N_{\text{р.сум}}$  — суммарное за срок службы дорожной одежды число проходов осей расчетного веса.

Допустимый за срок службы прирост остаточной деформации определяется по формуле

$$\Delta U = 0,041 \cdot \left[ (S_x - 4,7)^{0,76} - (S_n - 4,7)^{0,76} \right], \quad (13)$$

где  $S_x$  — показатель толчкомера (ТХК-2), см/км, в конце срока службы дорожной одежды;

$S_n$  — показатель толчкомера (ТХК-2), см/км, в начале срока службы дорожной одежды.

По мнению А. В. Смирнова [10, с. 170], уменьшение прочности или сдвиг в слоях дорожных одежд приводит постепенно к накоплению неровности на поверхности покрытия и к соответственному возрастанию коэффициентов динамичности.

Исследования, проводимые в различные периоды времени, позволили сформировать устойчивое мнение о взаимосвязи изменения ровности покрытия при снижении прочности дорожной одежды. По результатам исследований, проведенных рядом научных коллективов Российской Федерации (ГипродорНИИ, МАДИ и т. д.), установлено, что ровность поверхности покрытия и прочность дорожной одежды имеют устойчивую корреляционную связь, что позволяет сделать вывод о прочности нежестких дорожных конструкций как первопрочине изменения ровности покрытия [11]. Однако следует заметить, что существующие зависимости имеют разную основу и не могут быть представлены одной конкретной математической моделью, устанавливающей единый закон на весь эксплуатационный период эксплуатации дороги.

#### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ НАЗНАЧЕНИЯ РЕМОНТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ОСНОВАНИИ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ РОВНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

В настоящий момент появляется необходимость в разработке специальных методов и нормативных документов, регламентирующих проведение экспресс-оценки долговечности дороги по упрощенной схеме измерения и расчета для значительных по протяженности объемов [12]. При изменении ровности покрытия изменяется динамический коэффициент и увеличивается значение необратимых деформаций покрытий, что снижает прочность дорожной одежды [13].

Основной задачей является определение времени начала интенсивного разупрочнения и разрушения. В то же время продольная ровность покрытия — величина однозначная, и количество факторов, влияющих на точность ее измерений, сводится к минимуму. Установлено, что и прочность, и ровность зависят от одного и того же показателя — суммарной массы брутто пропущенных автомобилей, что позволяет сделать предположение о связи их между собой [14]. Динамика изменения ровности покрытия во времени зависит от состояния дорожной одежды и земляного полотна и является количественной характеристикой несущей способности. В процессе исследований было выявлено, что на практике развитие ровности предполагает две стадии:

- приращение ровности в зависимости от количества приложенных нагрузок;
- текущее состояние изменения ровности (незначительное приращение ровности) в пределах установленных значений

В то же время скорость деформации асфальтобетона при увеличении приложенных нагрузок также со временем уменьшается, приобретая свойство текучести [15].

Предполагается, что, установив математическую зависимость изменения ровности покрытия за срок службы, мы получим возможность оценить интенсивность накопления пластических (остаточных) деформаций дорожной одежды. Полученное уравнение определяет изменение ровности на период межремонтного срока

службы и частично отражает изменение реологических свойств асфальтобетона за этот период. Проводя анализ полученного уравнения, можно предположить как и насколько изменился и сформировался профиль автомобильной дороги, сформировался ли он в пределах нормативных значений.

Для участка дороги определяются средние годовые значения ровности за срок службы до текущего года. Линейную зависимость по средним значениям изменения ровности во времени определяли методом наименьших квадратов, получая при этом максимально приближенное уравнение к точечным значениям средней годовой ровности для выбранной автодороги. Выбросовые значения — значения, являющиеся ошибочными, измеренные или рассчитанные по какой-либо причине некорректно, — определяли на основании критерия Граббса и исключали из дальнейших расчетов. Полученное уравнение является фактическим уравнением изменения ровности покрытия за межремонтный срок службы, указанный в таблице 1.

Для сравнительной оценки степени снижения ровности дорожных покрытий необходимо установить нормативное уравнение изменения ровности. Принимали, что в первый год службы ровность покрытия соответствует требованиям ТКП 059 при приемке работ в эксплуатацию, а на последний год службы ровность должна быть менее значений, указанных в ТКП 140 при проведении диагностики эксплуатируемых дорог. Как результат, получили две прямые, характеризующие нормативное и фактическое изменение ровности.

Место расположения точки пересечения двух уравнений определяет необходимость и вид проведения ремонтных мероприятий. Наиболее выгодное расположение точки пересечения — максимально удаленное от точки № 2 влево, наиболее худшее состояние дороги — максимальное удаление точки пересечения от точки № 2 вправо (рис. 2). При этом точка № 1 — нормативное значение при вводе в эксплуатацию, точка № 2 — нормативное значение для эксплуатируемых дорог в момент окончания срока службы.

Запишем для нормативного значения ровности уравнение (14), для фактического — (15):

$$IRI_{норм} = K_{норм} \cdot T_{сл} + B_{норм}, \quad (14)$$

$$IRI_{факт} = K_{факт} \cdot T_{сл} + B_{факт}, \quad (15)$$

где  $IRI_{норм}$  — значение ровности покрытия, прогнозируемое при нормативном развитии событий, м/км;

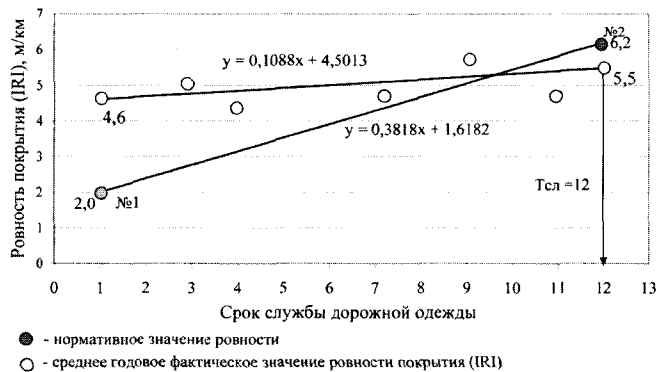
$IRI_{факт}$  — фактическое значение ровности покрытия, м/км;

$T_{сл}$  — срок службы дорожной одежды, лет.

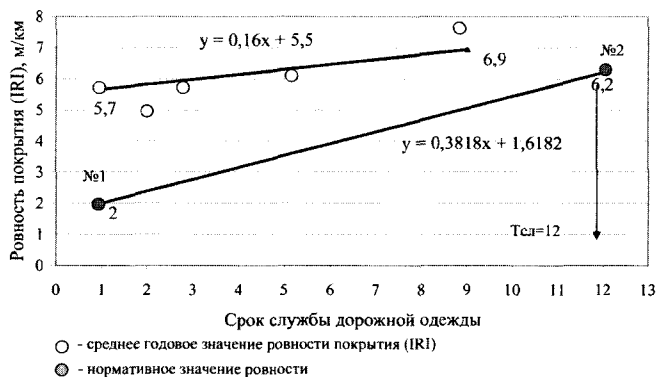
Условием, достаточным для обеспечения прочностного состояния участка автомобильной дороги, является выполнение системы неравенств:

**Таблица 1. Рекомендуемый срок службы дорожной одежды**

Категория автомобильной дороги	Срок службы $T_{сл}$ , лет
I	14
II	13
III	11
IV	8
V	6



**Рис. 2.** Пример построения точки пересечения нормативных и эксплуатационных значений в пределах срока службы



**Рис. 3.** Пример расположения точки пересечения нормативных и эксплуатационных значений за пределами срока службы

$$\begin{cases} K_{факт} < K_{норм} \\ \frac{B_{факт} - B_{норм}}{K_{норм} - K_{факт}} < T_{сл} \end{cases} \quad (16)$$

При условии отсутствия пересечения в пределах установленного срока службы  $T_{сл}$  пересечение определяется за границами точки № 2, определяющей нормативное значение ровности (рис. 3). В этом случае, чем более отдаляется точка пересечения от нормативного значения вправо, тем менее значение остаточного срока службы дорожной одежды.

Предполагается выдвигать условия назначения ремонтных мероприятий (капитальный, текущий ремонт или содержание), устанавливая при этом совокупностью следующих неравенств (17)–(19):

— текущий ремонт или содержание:

$$\begin{cases} K_{факт} < K_{норм} \\ \frac{B_{факт} - B_{норм}}{K_{норм} - K_{факт}} > T_{норм}; \end{cases} \quad (17)$$

— капитальный ремонт:

$$\begin{cases} K_{факт} > K_{норм} \\ \frac{B_{факт} - B_{норм}}{K_{норм} - K_{факт}} < 1; \end{cases} \quad (18)$$

— капитальный ремонт с выполнением фрезерования:

$$\begin{cases} K_{факт} > K_{норм} \\ \frac{B_{факт} - B_{норм}}{K_{норм} - K_{факт}} > 1; \end{cases} \quad (19)$$

Значение коэффициента  $K_{\text{факт}}$  и значение годовой ровности определяет интенсивность снижения прочности дорожной одежды, а также устанавливает дальнейшие условия эксплуатации автомобильной дороги. В случае, когда прочность дорожной одежды обеспечена (по расчетам), предполагается, что вследствие длительной эксплуатации профиль автодороги уже сформирован и изменение ровности покрытия находится в "текущей" фазе в пределах нормативных значений. При этом количество микропросадок, образованных под воздействием транспортных средств на дороге, незначительно. Это подтверждается отсутствием значительного числа коротких волн, обеспечивающих относительно стабильное значение ровности при ежегодных измерениях.

При небольших величинах коэффициента  $K_{\text{факт}}$ , но при стабильно высоких значениях ровности покрытия, превышающих нормативные, принимается, что несущая способность дорожной одежды не обеспечена и требуется устройство выравнивающих слоев покрытий. При этом профиль автодороги считается сформированным, а устройство выравнивающих слоев эффективным. При интенсивном изменении ровности покрытия в течение принятого срока службы возможно дальнейшее снижение несущей способности и интенсивное формирование микропросадок дорожной одежды. В этом случае необходимо рассматривать вопрос об усилении основания дорожной одежды или переустройстве слоев покрытия.

Своевременно определяя начало процесса интенсивного снижения прочности асфальтобетонного покрытия посредством анализа изменения ровности покрытия, возможно предупредить преждевременное разрушение и деформацию всех слоев дорожной одежды. Таким образом, динамика изменения ровности покрытия на различных этапах эксплуатации дороги определяет ее работоспособность и долговечность. Предложенные разработки могут послужить дополнением к существующим системам оценки ТЭС автодорог с целью оптимального выбора первоочередных ремонтных мероприятий.

## ВЫВОДЫ

1. Обобщенные выводы рассмотренных теорий взаимосвязи ровности покрытий и прочности дорожных одежд сводятся к общим закономерностям, утверждающим, что ровность покрытий постоянно меняется, а неровности имеют тенденцию накапливаться со временем. Степень изменения ровности покрытия во времени зависит от несущей способности оснований и земляного полотна. Чем мощнее основание, тем более гарантирована стабильность ровности покрытия дороги, а значит и постоянное значение коэффициента динамичности автомобильной нагрузки. В то же время устранение дефектов путем проведения ремонтов на стадии завершения формирования деформаций материалов является запоздалым, иногда малоэффективным и дорогостоящим решением.
2. Применяемые методики обработки измерений не позволяют по данным испытаний определить запас работоспособности дорожных конструкций. Усталостные свойства материалов и время начала интенсивного их разупрочнения затруднительно измерить и предупредить на основании принятых в практике методов в объемах сети республиканских дорог. Решением этих проблем может стать системный анализ ровности покрытия и скорости развития ее регрессии. В настоящий момент гораздо важнее предупредить формирование критических деформаций в значительных объемах и не допустить интенсивного накопления пластических деформаций в конструкции. На основании предложенных выкладок разрабатываются дополнения к системе назначения ремонтных мероприятий, позволяющие при прочих равных характеристиках участков, назначенных в ремонт, аргументировано выбрать наиболее проблемный.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bomhard, F. I. Verfahren zur Messung der Dynamischen Beim Kraftwagen / F. I. Bomhard. — Munchen, 1959. — 168 p.
2. Малофеев, А. Г. Исследование динамического воздействия автомобиля на жесткие дорожные одежды в процессе эксплуатации дорог: автореф. дис... канд. техн. наук: 12.08.78 / А. Г. Малофеев; Сиб. автодор. ин-т. — Омск, 1978. — 22 с.
3. Бируля, А. К. Конструирование и расчет жестких одежд автомобильных дорог / А. К. Бируля. — М.: Издательство "Транспорт", 1964. — 168 с.
4. Красиков, О. А. Обоснование стратегий ремонта жестких дорожных одежд: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 16.03.00 / О. А. Красиков; Моск. автом.-дор. ин-т. — М., 2000. — 44 с.
5. Демишкан, В. Ф. Усовершенствования управления состоянием автомобильных дорог при условиях ограниченных ресурсов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.11 / В. Ф. Демишкан; Хark. гос. автом.-дорож. техн. ун-т. — Харьков, 2000. — 17 с.
6. Каленова, Е. В. Совершенствование методики расчета при проектировании жестких дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 19.03.09 / Е. В. Каленова. — М., 2009. — 22 с.
7. Лугов, С. В. О связи допустимой ровности асфальтобетонных покрытий с требуемой прочностью жестких дорожных одежд / С. В. Лугов, Е. В. Каленова // Новости в дорожном деле: научн.-техн. информ.: сб., вып. 2 / ФГУП "Информавтодор"; ред. кол.: М. Н. Захарова [и др.]. — М., 2007. — С. 31-35.
8. Смирнов, А. В. Механика устойчивости и разрушения дорожных конструкций / А. В. Смирнов, А. А. Малышев, Ю. А. Агалаков; под ред. А. В. Смирнова. — Омск: СибАДИ, 1997. — 91 с.
9. Буткявичюс, С. Нагрузки на ось тяжеловесных транспортных средств и целесообразность их ограничения в неблагоприятное время года / С. Буткявичюс, К. Петкявичюс // Автомобильные дороги и мосты. — 2006. — № 1. — С. 12-18.
10. Смирнов, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования работоспособности жестких дорожных одежд: дис. ... д-ра техн. наук / А. В. Смирнов. — Омск: СибАДИ, 1989. — 391 с.
11. Мепуришвили, Д. Г. О структуре модели влияния транспортно-эксплуатационных характеристик на технический уровень и эксплуатационное состояние автомобильных дорог / Д. Г. Мепуришвили, О. М. Зозуля // Совершенствование методов оценки и повышения качества автомобильных дорог: сб. науч. тр., ГипродорНИИ; ред. кол.: А. Я. Эрастов [и др.]. — М., 1986. — С. 4-8.
12. Хусаинов, И. Ж. К диагностике автомобильных дорог / И. Ж. Хусаинов // Автомобильные дороги. — 2009. — № 4. — С. 52.
13. Александров, А. С. Обоснование величины допустимой необратимой деформации покрытий / А. С. Александров, В. В. Сиротюк // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2002. — № 1. — С. 7, 8.
14. Бируля, А. К. Конструирование и расчет жестких одежд автомобильных дорог / А. К. Бируля. — М.: Издательство "Транспорт", 1964. — 168 с.
15. Гольденблат, И. И. Строительство автомобильных дорог / И. И. Гольденблат, Н. А. Николаенко. — М.: Госстройиздат, 1960.

Статья поступила в редакцию 21.01.2011.