

doi: 10.5862/MCE.57.4

Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий

*Аспирант В.Н. Герцог,
канд. техн. наук, доцент Г.В. Долгих,
канд. техн. наук, доцент Н.В. Кузин,
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия*

Аннотация. В статье выполнен обзор и анализ работ, направленных на поиск эмпирических зависимостей, связывающих показатели продольной и поперечной ровности с параметрами деформируемости дорожных конструкций и ее отдельных элементов. В рамках этого анализа приведены данные натурных экспериментов и лабораторных исследований деформируемости материалов трехосным сжатием многократно прикладываемой нагрузкой.

Выполнен анализ методов расчетов деформаций, базирующихся на реологических моделях, в том числе теории наследственной ползучести. Приведены результаты работ по обоснованию допускаемых и предельных неровностей, формирующихся в продольном и поперечном направлении.

Предложен новый способ расчета допускаемой глубины неровности, учитывающий характеристики транспортного средства, в том числе время контактного взаимодействия колеса с покрытием, зависящее от скорости движения автомобиля. Предложенный способ расчета предельных величин неровностей позволяет обеспечить требуемый уровень потребительских свойств (скорость и безопасность движения) на протяжении всего срока службы дорожной конструкции.

Ключевые слова: ровность; глубина неровности; глубина колеи; время контактного взаимодействия шины и покрытия

Введение

От показателей ровности покрытий дорожных одежд зависят потребительские свойства дороги: скорость и безопасность движения. Действующие нормативные документы не регламентируют расчет дорожных одежд по критериям продольной и поперечной ровности. Этот недостаток в некоторой степени компенсируется расчетом по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна и в песчаном дополнительном слое основания дорожной одежды. Отметим, что обеспечение сопротивления сдвигу не гарантирует отсутствие деформаций уплотнения грунтов и дискретных материалов, которые носят пластический характер и влияют на ровность. Расчеты по сопротивлению сдвигу гарантируют, что в рассчитываемом элементе конструкции не возникнут касательные напряжения, превышающие предельные значения по условию пластичности, положенному в основу расчета, но при этом возможно возникновение определенных пластических деформаций сдвига. Также отметим, что при относительно высоких температурах асфальтобетона и толщине покрытия в нем наряду с напряжениями и деформациями от изгиба возникают вертикальные нормальные напряжения и соответствующие им деформации сжатия. Этот вывод подтверждают специалисты РГСУ [1, 2] и СибАДИ [3–5].

Из этого становится очевидной необходимость дополнения расчетов дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу методами их проектирования по критериям ровности. Поэтому работы, направленные на разработку таких способов расчета и обоснование норм ровности покрытий, являются актуальными для дорожной отрасли.

Обзор литературы

Ровность покрытий нежестких дорожных одежд на стадии их проектирования можно обеспечивать расчетом по двум принципиально разным критериям сопротивления:

- сдвигу в грунте земляного полотна и слое основания дорожной одежды из дискретных материалов;
- развитию пластических деформаций, обуславливающих величину неровностей.

Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий

Таким образом, задача проектирования дорожных одежд с требуемой ровностью покрытий сводится к их проектированию по двум предельным состояниям. Методы расчета по сопротивлению сдвигу можно разделить на три группы.

1. Основанные на применении модели линейно деформируемого полупространства. К ним относят решение Н.П. Пузыревского, допускающее возникновение предельного состояния в крайних точках фундамента, а также решения Н.Н. Маслова, И.В. Яропольского и др., допускающие развитие неустойчивых областей определенной глубины в грунтовом полупространстве. К этой же группе относятся и методы расчета грунтов земляного полотна, разработанные специалистами дорожной отрасли [6–10].

2. Базирующиеся на применении криволинейных поверхностей скольжения, которые применяются в практике расчета оснований фундаментов и откосов грунтовых сооружений, в том числе насыпей и выемок земляного полотна. Основы этого направления заложены В.Феллениусом, предложившим считать, что сдвиг грунта происходит по поверхности круглоцилиндрического очертания [11].

3. Полученные в рамках теории предельного равновесия грунта и предназначенные для расчета грунтовых оснований различных фундаментов [12–18].

Несмотря на глубокую проработку вопросов проектирования земляных сооружений по сопротивлению сдвигу, основная масса работ специалистов дорожной отрасли выполнена в области совершенствования расчета дорожных конструкций по критериям ровности и прогнозированию пластического деформирования. К таким работам относятся исследования, выполненные:

- в Московском государственном автомобильно-дорожном университете (МАДИ-ТУ) под руководством проф. Ю.М. Яковлева (кандидатские диссертации З.А. Мевлетдинова [19], М.Г. Горячева [20]) и проф. М.С. Коганзона (кандидатские диссертации А.В. Эдельмана [21], С.Ю. Каныгиной [22], В.Б. Фадеева [23], Е.В. Жустаревой [24]);
- в Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии под руководством проф. А.В. Смирнова (кандидатские диссертации А.С. Александрова [25], Н.В. Кузина [26]);
- в СоюздорНИИ под руководством проф. В.Д. Казарновского (кандидатская диссертация А.С. Пилипенко [27]);
- в Ростовском государственном строительном университете (докторская диссертация В.П. Матуа [28] и кандидатская диссертация Д.В. Чирва [29]).

В общем виде критерий расчета записывают в виде условий [19–29]

$$h_{\phi} \leq h_{\text{пр}}; \quad S_{\phi} \leq S_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где h_{ϕ} – глубина неровности, формирующейся в продольном или поперечном направлении, мм; $h_{\text{пр}}$ – предельное значение глубины неровности, мм; S_{ϕ} и $S_{\text{пр}}$ – фактическое и предельное значение остаточной деформации, мм.

Условия (1) представляют собой сравнения разных параметров. Согласно первому условию фактическая глубина неровности, формирующейся в продольном или поперечном направлении, не должна превышать ее предельное значение. Второе условие требует, чтобы остаточная деформация, накапливаемая дорожной конструкцией, не превышала ее предельного значения. В работе [30] показано, что эти условия можно связать, представив глубину неровности разностью остаточных деформаций, накапливаемых в расчетной точке и в точке, в которой эта деформация имеет минимальное значение. Тогда критерий расчета принимает вид [30]:

$$S_{\phi\text{max}} - S_{\phi\text{min}} \leq h_{\text{пр}}. \quad (2)$$

Разработке методов расчета остаточных деформаций посвящено много работ. Отметим, что в некоторых из них предпринимаются попытки классифицировать разработанные методы [31–33]. Общим недостатком этих методов является то, что остаточная деформация рассчитывается либо в грунте земляного полотна и слоях дорожной одежды из дискретных материалов, либо в слоях из монолитных материалов (асфальтобетон и т.п.). Переход от этих деформаций к деформации, накапливаемой на поверхности покрытия, выполняется путем ввода коэффициентов, определяемых опытным путем. Для этого при ремонтах и реконструкциях дорог в местах их пересечения с различными коммуникациями, требующими переустройства, отрываются траншеи, в которых полностью виден поперечный профиль дорожной конструкции. В таких разрезах

выполняют измерение смещений поверхностей слоев и определяют вклад пластического перемещения поверхности слоя в общую глубину неровности.

По мнению авторов, рациональнее использовать эмпирические методики, основанные на экспериментальных данных [34]. Появление и развитие эмпирических методов расчета принято связывать с экспериментами, выполненными специалистами США на тестовых дорогах, по которым пропускали тяжелый транспорт и вели учет движения. Первый подобный эксперимент был поставлен в 1951 г. специалистами WASHO в г. Малад штата Айдахо [35, 36]. После реорганизации WASHO в AASHO¹ в 1958–1960 гг. были проведены аналогичные испытания дорог г. Оттава штата Иллинойс [37]. Эти испытания дали большой толчок для развития методов проектирования дорожных конструкций. Исследования возглавил В.Н. Кэри-младший, а данные о работоспособности дорожных конструкций были тщательно задокументированы и заархивированы для возможности последующего доступа и анализа. В это же время аналогичные испытания были проведены в Великобритании [38].

С момента проведения эксперимента по испытанию дорожных одежд потоком транспортных нагрузок, поставленного специалистами AASHTO, прошло достаточно много времени, но эмпирические методы расчета конструкций во многих штатах США применяются до сих пор. Для совершенствования этих методов разрабатывается новое оборудование, способное имитировать воздействие современных транспортных средств. Эмпирические методы проектирования приобрели популярность во всем мире, а в экспериментальных исследованиях работоспособности дорожных одежд возникла острая необходимость. В связи с этим разработана и принята международная программа полномасштабных ускоренных испытаний покрытий (*full-scale accelerated pavement testing, сокращенно «f-sAPT»*).

В рамках программы запланированы и частично выполнены испытания дорожных конструкций в Австралии, Бразилии, Германии, Голландии, Китае, США (штаты Виргиния, Дакота, Индиана, Калифорния, Канзас, Луизиана, Миннесота, Флорида), Швеции, ЮАР, Японии. Безусловно, экспериментальные данные, полученные в рамках этой программы, уникальны и могут быть использованы во многих странах мира.

Математические модели, созданные за рубежом, связывают глубину неровности с параметрами нагрузки и материала [39]. Глубина неровностей, формирующихся на поверхности покрытий в результате транспортных нагрузок, определяется экспериментально при помощи передвижных или стационарных имитаторов.

Ранее в СССР были кольцевые стенды для испытаний дорожных одежд тяжелой нагрузкой. Один из лучших таких стендов был построен в г. Омске на базе Омского филиала СоюздорНИИ и применен для исследования процесса упругопластического деформирования в диссертациях А.В. Смирнова [40] и В.Н. Кускова [41]. После распада СССР в 90-х гг. XX в. оборудование было демонтировано, а стенд перестроен в автостоянку. За рубежом отношение к испытательным стендам иное: так, австралийский аналог омского оборудования – кольцевой стенд в г. Крайстчер, применявшийся в исследованиях 1969–1983 гг., – подвергся реконструкции и в новом исполнении используется с 1986 г. до настоящего времени.

В связи с этим в настоящее время имеется возможность анализа данных только зарубежных исследований. Эти данные можно использовать для математического моделирования процесса изменения ровности покрытий дорожных одежд. Работы специалистов РФ можно применять для определения предельной глубины неровностей.

Постановка цели и задач

Выполненный анализ работ предшественников позволяет авторам сформулировать цель публикации и поставить задачи, решение которых необходимо для ее достижения.

Цель работы состоит в математическом обосновании норм ровности асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.

¹ В настоящее время реорганизована в AASHTO

Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий

Задачи:

- 1) разработать математическую модель расчета предельной глубины продольных неровностей;
- 2) выполнить обоснование предельной глубины колеи на асфальтобетонном покрытии из условий обеспечения прочности дорожной конструкции скорости и безопасности движения.

Описание исследования

В первых работах глубину колеи h_k связывали с числом проходов нагрузки, температурой асфальтобетонного покрытия и рядом параметров математической модели. В общем виде такие математические модели [34, 42, 43] можно представить формулой

$$h_k = a \cdot N^b \cdot T^Q, \quad (3)$$

где N – число приложенных нагрузок, ед.; T – температура асфальтобетона; a , b и Q – параметры модели, являющиеся параметрами напряженного состояния (коэффициент b зависит от величины, возникающих напряжений) и материала (коэффициенты a и Q зависят от вида асфальтобетона).

Последующие эксперименты, выполненные Л. Саном и соавт. [34, 44], показали, что параметр b модели (3) является мерой напряженного состояния, определяемой степенной функцией отношения касательных напряжений в асфальтобетоне τ к их предельному значению $\tau_{пр}$, то есть прочности на сдвиг:

$$b = \left(\frac{\tau}{\tau_{пр}} \right)^c, \quad (4)$$

где c – параметр модели, зависящий от вида асфальтобетона.

Дальнейшим развитием модели (3) стал учет влияния на глубину колеи скорости движения транспортного средства [39], который достигнут применением принципа эквивалентности Пела – Тейлора [45]. В результате этого зависимость (3) с учетом (4) приобрела вид [39]:

$$h_k = a \cdot \left(\frac{v_{ф}}{v_{HVS}} \cdot N \right) \left(\frac{\tau}{\tau_{пр}} \right)^c \cdot T^Q, \quad (5)$$

где $v_{ф}$ и v_{HVS} – фактическая скорость движения транспортного средства и скорость имитатора нагрузки при испытании.

Прочность на сдвиг определяется статическими испытаниями путем вдавливания металлического плунжера в образец асфальтобетона (рис. 1, а). Прочность на сдвиг вычисляется произведением максимальной величины усилия проникновения плунжера P_{max} на коэффициент k , принимаемый равным 0,339. Рассмотренные модели (3) и (5) применимы только в тех случаях, когда колея является поверхностной, то есть формируется вследствие сдвига асфальтобетона в покрытии. Для такой колеи характерны выпоры асфальтобетона по ее краям, вдоль траектории движения (рис. 1, б).



Рисунок 1. Схемы лабораторных и полевых испытаний:
а – вдавливание металлического плунжера для определения прочности на сдвиг [27];
б – измерение глубины поверхностной колеи

Для расчета величины глубинной колеи тоже применяют эмпирические методы, отличающиеся от моделей (3) и (5) тем, что глубина колеи связывается с пластической деформацией грунтов или дискретных материалов [46]. Пластические деформации определяются экспериментально с применением динамических приборов трехосного сжатия, позволяющих прикладывать сколь угодно много повторных нагрузок [46]. Н. Одермат с соавт. [47] выполнили испытания четырех одинаковых дорожных конструкций имитатором HVS. Эксперименты проведены в грунтовом канале испытанием специально созданной модели дорожной конструкции. Земляное полотно модели глубиной 3 м отсыпано послойно из пылеватого песка, влажность и плотность которого в момент испытаний были близки к оптимальным значениям. Дорожная одежда выполнена двухслойной с покрытием из асфальтобетона толщиной 7,6 см и щебеночного основания толщиной 22,8 см. Для измерения деформаций в земляном полотне на различных горизонтах размещены катушки ε -ти. Выполнен анализ экспериментальных данных, авторы работы [47] пришли к выводу, что глубину колеи на поверхности можно вычислить по формуле

$$h_k = 10^{-12} \cdot (10^6 \cdot \varepsilon_{zy})^{3,55}, \quad (6)$$

где ε_{zy} – упругая вертикальная деформация пылеватого песка, возникающая в верхней точке земляного полотна сечения, расположенного по оси симметрии нагрузки, д.е.

Если в зависимости (6) выполнить преобразования, то можно получить:

$$h_k = 10^{-12} \cdot 10^{21,3} \cdot \varepsilon_{zy}^{3,55} = 10^{9,3} \cdot \varepsilon_{zy}^{3,55}. \quad (6.1)$$

В этой же работе предложена эмпирическая формула, связывающая глубину колеи с пластической деформацией, накапливаемой грунтом земляного полотна ε_{zp} . В соответствии с этой формулой глубина колеи определяется как

$$h_k = 0,0545 \cdot \varepsilon_{zp}^{0,49}. \quad (7)$$

Исследование Н. Одермата открыло возможность расчета глубины колеи через упругие и пластические деформации грунта земляного полотна, которые можно вычислять, применяя аналитические решения теории упругости и пластичности, а также различные математические модели [33]. Отметим, что для вычисления этих деформаций возможно применение обобщающих моделей, разработанных на основе теории наследственной ползучести, в которой функция времени заменена функцией числа нагрузок [48, 49]. Таким образом, специалистам дорожной отрасли открывается хорошая перспектива разработки эмпирических методов расчета дорожных конструкций по критериям глубинного и поверхностного колееобразования, но для реализации этого требуется глубокий и тщательный анализ литературных данных.

В рамках решения этой задачи нами получена модель пластического деформирования грунтов [31, 32], подстановка которой в зависимость (7) позволяет вычислять глубину колеи. Таким образом, задача пластического деформирования решена нами в предыдущих исследованиях.

Второй не менее важной задачей расчета дорожных конструкций по критериям ровности является обоснование предельных значений неровностей. Решению этой задачи посвящено достаточно много работ, их общим недостатком является слабое математическое обоснование или его отсутствие вообще.

В настоящее время известно большое количество эмпирических зависимостей, связывающих показатели ровности покрытия по ПКРС-2У или толчкомеру ТХК-2 с прочностью дорожной одежды и ее сроком службы. Такие зависимости приведены в таблице 1.

Таблица 1. Формулы прогнозирования изменения продольной ровности асфальтобетонного покрытия

Авторы		Формула	Прибор
Демишкан В.Ф. (ХАДИ) [50]		$S_T = \frac{0,5 \cdot S_0}{\sqrt[3]{0,12 \cdot K_{пр}}} \cdot \exp(0,08 \cdot T),$	ПКРС-2У или ТХК
где S_0 – начальное значение показателя ровности, соответствующее вводу дороги в эксплуатацию, измеренное либо ПКРС-2У, либо ТХК-2, см/км; $K_{пр}$ – коэффициент прочности дорожной одежды; T – продолжительность периода эксплуатации, соответствующая моменту времени расчета показателя S_T , годы.			
Жабин В.И., Мельницкий М.А., Герасимов О.В. [51, с. 84]		$S_T = 2,358 \cdot S_0^{0,82} \cdot K_{пр}^{-0,053} \cdot \exp(0,089 \cdot T).$	ПКРС-2У или ТХК-2
Комбинированная модель Золотаря – Каленовой	Золотарь И.И. [52]	$S_{ТХК} = 3,58 \cdot (h_p^{1,7} + 6,74)^{1,042};$	толчкомер ТХК
		$S_{ПКРС} = 2,81 \cdot S_{ТХК} + 294;$	ПКРС-2У
	Каленова Е.В. [53]	$E_{\min} = 294,77 - 11,477 \cdot h_p$	Связывает модуль упругости E_{\min} и просвет под рейкой h_p
	Выводы авторов	$S_{ТХК} = 3,58 \cdot \left(\left[\frac{294,77 - E_{\min}}{11,477} \right]^{1,7} + 6,74 \right)^{1,042};$	толчкомер ТХК-2
$S_{ПКРС} = 10,06 \cdot \left(\left[\frac{294,77 - E_{\min}}{11,477} \right]^{1,7} + 6,74 \right)^{1,042} + 294,$		ПКРС-2У	
где h_p – просвет под трехметровой рейкой			

Решение для предельной глубины продольных неровностей получить несложно. Для этого из зависимостей И.И. Золотаря достаточно выразить просвет под рейкой, который равен:

$$h_p = \left[\left(\frac{S_{ТХК}}{3,58} \right)^{\frac{1}{1,042}} - 6,74 \right]^{\frac{1}{1,7}}; \quad h_p = \left[\left(\frac{S_{ПКРС} - 294}{10,06} \right)^{\frac{1}{1,042}} - 6,74 \right]^{\frac{1}{1,7}}. \quad (8)$$

Если в формулах (8) значения показателей ровности по ТХК и ПКРС принять соответствующими их предельным значениям, то из полученных формул можно рассчитать предельную глубину продольных неровностей. При этом мы получим значения, близкие к данным табл. 1 и не зависящие от скорости движения, которая при оценке ровности приборами ТХК и ПКРС-2У обеспечивается практически постоянной, равной 50 ± 5 км/ч. Поэтому такой путь решения

задачи приводит к тому, что нормы ровности учитывают не все параметры, обуславливающие потребительские свойства дороги.

В работе [23] установлено, что между просветами под рейкой, прикладываемой в продольном и поперечном направлениях, существует корреляционная связь. На основе этого нормы ровности в прямом направлении были пересчитаны на ровность в поперечном направлении [23]. И.А. Золотарь [52] получил эмпирические зависимости, связывающие показания приборов ТК-2У и ПКРС-2 с просветами под рейкой, что позволило вычислить предельные значения неровностей на поверхности покрытий, устраиваемых на дорогах различных технических категорий. В таблице 2 приведены предельные значения неровностей.

Таблица 2. Предельные значения неровностей

Категория дороги	Тип конструкции	Предельные значения неровностей при состоянии покрытия, мм			Автор
		отличное	хорошее	удовлетворительное	
I–IV	Не классифицируется	1,5	3,0	5,0	А.В. Смирнов
I	Капитальный	Нет	Нет	4,6	В.Б. Фадеев
II	Капитальный	Нет	Нет	4,9	
III	Капитальный	Нет	Нет	5,4	
	Облегченный	Нет	Нет	6,1	
IV	Облегченный	Нет	Нет	15,3	И.А. Золотарь
I	Не классифицируется	Нет	2	5	
II		Нет	3	7	
III		Нет	4	9	
IV		Нет	6	12	
I	Не классифицируется	Нет	3,1	5,3	М.С. Коганзон
II		1,4	4,8	6,7	
III		2,5	5,5	7,5	
IV		6,0	7,7	8,5	

Примечание: значения, рекомендуемые В.Б. Фадеевым, показывают предельную глубину колеи, нормы ровности других авторов ограничивают глубину продольных неровностей.

Специалистами предпринимались попытки математического обоснования допускаемых и предельных глубин неровностей.

Так, обоснование глубины неровности было проведено А.С. Александровым [30, 54, 55]. В качестве отправной идеи использовалась известная зависимость динамического коэффициента от вертикальной скорости в точке соударения и деформации тела при статическом действии груза. Динамический коэффициент без учета массы ударяемого тела определим по классической формуле

$$K_{\text{дин}} = 1 + \sqrt{\frac{\vartheta_0^2}{g \cdot U}}, \quad (9)$$

где ϑ_0 – скорость в точке соударения тел, м/с; g – ускорение свободного падения тела, м/с²; U – деформация тела при статическом действии груза (прогиб покрытия), м.

Используя зависимость А.К. Бируля, позволяющую определить скорость в точке соударения колеса с покрытием через скорость движения, величину и шаг неровности в формуле (9), авторы [30, 54, 55] дают ее в виде

$$K_{\text{дин}} = 1 + \sqrt{\frac{1}{g \cdot U} \cdot \left(\frac{2 \cdot h \cdot \vartheta}{S} \right)^2}, \quad (10)$$

где ϑ – скорость горизонтального движения автомобиля, м/с; S – расстояние между неровностями (шаг неровностей), м.

Уравнение (10) решают относительно величины h :

$$h = \frac{S}{2 \cdot g} \sqrt{g \cdot U \cdot (1 - K_{\text{дин}})^2}. \quad (11)$$

Для определения допустимой величины неровности в формулу (11) подставляют требуемое значение скорости движения, наиболее вероятную величину динамического коэффициента, принимаемую равной 1,3, а также выражение для определения упругого прогиба. В результате вычисляют допустимые значения неровностей [30, 54, 55], которые являются функцией скорости движения, протяженности (шага) неровности и общего модуля упругости дорожной одежды.

Для более объективного обоснования норм продольной ровности воспользуемся работой [56], в которой получена формула для определения динамического усилия, передаваемого колесом автомобиля на покрытие, в зависимости от величины неровности. Согласно этой работе давление от колеса на покрытие определяется по формуле

$$p = \frac{m_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_n}}{t \cdot \pi \cdot R^2}, \quad (12)$$

где m_k – масса, приходящаяся на колесо автомобиля, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; h_n – глубина неровности (амплитуда волны), м; t – время контактного воздействия, с; R – радиус отпечатка колеса, м.

Решив уравнение (12) относительно величины неровности, получим формулу

$$h_n = \frac{\Delta h_n}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{p \cdot t \cdot \pi \cdot R^2}{m_k} \right)^2, \quad (13)$$

где Δh_n – множитель перехода от размерности в м к другим единицам длины (при расчете в мм $\Delta h_n = 10^3$, а при расчете в см $\Delta h_n = 100$).

Для упрощения зависимости (13) введем в нее выражение для определения массы m_k , которое имеет вид:

$$m_k = \frac{p \cdot \pi \cdot R^2}{g}. \quad (14)$$

Выполнив подстановку (14) в (13) и преобразования, получим:

$$h_n = \frac{\Delta h_n \cdot t^2 \cdot g}{2}. \quad (15)$$

Время контактного воздействия шины на покрытие определим как продолжительность ее проезда через точку, то есть отношением диаметра контакта $D = 2 \cdot R$ к скорости движения

$$t = \frac{2 \cdot R}{g}. \quad (16)$$

Подставив зависимость (16) в выражение (15), получим формулу

$$h_n = \frac{\Delta h_n \cdot 2 \cdot R^2 \cdot g}{g^2}. \quad (17)$$

Предельная глубина продольной неровности $h_{\text{пр}}$ определяется при подстановке в формулу (17) требуемой скорости движения $g_{\text{тр}}$. Выполнив такую подстановку, получим:

$$h_{\text{пр}} = \frac{\Delta h_n \cdot 2 \cdot R^2 \cdot g}{g_{\text{тр}}^2}. \quad (18)$$

Для определения требуемой скорости движения воспользуемся данными И.И. Золотаря, регламентирующими минимально допустимую скорость движения смешанного транспортного потока в начале и конце эксплуатации [52, с. 24], которые приведены в таблице 3.

Отметим, что в настоящее время предельная величина просвета под трехметровой рейкой при сдаче в эксплуатацию асфальтобетонного покрытия составляет 3 мм. Данные таблицы 3 позволяют дифференцировать предельные значения просветов под трехметровой рейкой для покрытий дорог различных категорий.

Таблица 3. Требуемая скорость движения смешанного транспортного потока

Категория дороги	В начале эксплуатации		В конце эксплуатации		Предельная глубина неровностей, мм	
	км/ч	м/с	км/ч	м/с	в начале эксплуатации	в конце эксплуатации
I	100	27,8	65	18,1	0,87	2,06
II	85	23,6	50	13,9	1,20	3,48
III	75	20,8	45	12,5	1,55	4,30
IV	60	16,7	35	9,7	2,42	7,10
V	45	12,5	30	8,3	4,30	9,67

В.Б. Фадеев провел многочисленные измерения просветов под двухметровой рейкой, прикладываемой в поперечном направлении, и трехметровой – в продольном. В результате установлено, что между просветами под двухметровой рейкой S_2 и трехметровой рейкой S_3 существует корреляционная связь, определяемая уравнением [23, с. 9]:

$$S_2 = 5,4 + 2,56 \cdot S_3. \quad (19)$$

Подставив в выражение (19) зависимость (18), получим:

$$h_k = 5,4 + 2,56 \cdot \frac{\Delta h_n \cdot 2 \cdot R^2 \cdot g}{g_{тр}^2}. \quad (20)$$

Вычисленные по формуле (20) предельные значения глубины колеи приведены в таблице 4, в которой также указаны значения, регламентируемые ОДН218.0.006-2002.

Таблица 4. Предлагаемые и нормативные предельные значения глубины колеи

Категория дороги	Нормы поперечной ровности, мм		
	Глубина колеи по ОДН218.0.006-2002		Предельная глубина колеи по формуле (18)
	Допустимая	Предельная	
I	4	20	10,7
II	7	20	14,3
III	12	20	16,4
IV	25	30	23,6
V	30	35	30,2

Из сопоставления данных таблицы 4 следует, что рекомендуемые авторами значения норм поперечной ровности меньше предельных значений, но больше допускаемых значений, регламентируемых ОДН218.0.006-2002. Значения, предлагаемые в данной публикации, учитывают скорость движения транспортного потока, поэтому являются более обоснованными.

Заключение

Выполненный обзор показал следующее.

1. Известно большое количество работ, анализ которых позволяет разработать методы прогнозирования процессов развития поверхностной и глубинной колеи на асфальтобетонных покрытиях автомобильных дорог. При этом в качестве отправной идеи при разработке метода прогнозирования развития поверхностной колеи может быть принята зависимость (5).

Разрабатывая метод прогнозирования развития глубинной колеи, можно отталкиваться от зависимости (7), в которой возможно применение:

- аналитических решений теории пластичности;
- различных математических моделей, связывающих величину накапливаемой пластической деформации с числом приложенных нагрузок и значениями главных напряжений;
- обобщающих моделей, разработанных на основе применения принципа теории наследственной ползучести, в которой функция времени заменена функцией числа нагрузок [48, 50].

Таким образом, открывается перспектива разработки эмпирических методов расчета дорожных конструкций по критериям глубинного и поверхностного колееобразования.

Одним из возможных вариантов решения является предложенная нами модель пластического деформирования грунта [31, 32], которая при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ имеет вид

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - 2 \cdot \mu \cdot \sigma_3}{E_{\text{ПН}}} \cdot (1 + a \cdot \lg N);$$

$$E_{\text{ПН}} = M \cdot p_a \cdot \left[\left(\frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{p_a} \right)^2 + \frac{6 \cdot (1 + \mu)}{1 - 2 \cdot \mu} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{3 \cdot p_a^2} \right]^\lambda, \quad (21)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения в наиболее опасной точке земляного полотна, Па; $E_{\text{ПН}}$ – нелинейный продольный модуль пластической деформации, определяемый экспериментально по данным трехосных испытаний и являющийся аналогом модулей упругости и деформации, Па; N – число нагрузок; p_a – атмосферное давление; a , M и λ – параметры грунта, определяемые по данным трехосных испытаний, зависящие от показателей физических свойств (плотности, влажности) и гранулометрического состава.

Зависимости (21) могут быть записаны в виде формулы

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - 2 \cdot \mu \cdot \sigma_3}{M \cdot p_a} \cdot \left[\left(\frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{p_a} \right)^2 + \frac{6 \cdot (1 + \mu)}{1 - 2 \cdot \mu} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{3 \cdot p_a^2} \right]^{-\lambda} \cdot (1 + a \cdot \lg N). \quad (22)$$

Подстановка модели (22) в зависимость (7) приводит к формуле

$$h_k = 0,0545 \cdot \left\{ \frac{\sigma_1 - 2 \cdot \mu \cdot \sigma_3}{M \cdot p_a} \cdot \left[\left(\frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{p_a} \right)^2 + \frac{6 \cdot (1 + \mu)}{1 - 2 \cdot \mu} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{3 \cdot p_a^2} \right]^{-\lambda} \cdot (1 + a \cdot \lg N) \right\}^{0,49}. \quad (23)$$

После преобразований получим:

$$h_k = 0,0545 \cdot \left(\frac{\sigma_1 - 2 \cdot \mu \cdot \sigma_3}{M \cdot p_a} \right)^{0,49} \cdot \left[\left(\frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{p_a} \right)^2 + \frac{6 \cdot (1 + \mu)}{1 - 2 \cdot \mu} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{3 \cdot p_a^2} \right]^{-0,49 \cdot \lambda} \cdot (1 + a \cdot \lg N)^{0,49}. \quad (24)$$

Формулы (22) и (23) связывают глубину колеи с пластической деформацией грунта или дискретного материала в наиболее опасной точке, то есть в точке с наиболее неблагоприятной комбинацией главных напряжений. В настоящее время нами при помощи трехосных испытаний разработана экспериментальная методика для определения параметров грунта a , M и λ в моделях (21)–(24). Для некоторых глинистых и песчаных грунтов эти параметры определены. Суть этой методики авторы приведут в следующей публикации, в которой также обсудят влияние параметров грунта a , M и λ на величину пластической деформации.

2. Разработан способ расчета предельных значений глубин продольных неровностей и колеи. При этом учитывается требуемая скорость движения транспортного потока, что является более обоснованным с позиции обеспечения требуемого уровня потребительских свойств автомобильной дороги. Отметим, что пересмотр требуемых скоростей движения транспортного Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий

потока не вызывает затруднений при вычислении предельных глубин неровностей. В случае увеличения требуемой скорости предельные значения глубины уменьшаются, а при уменьшении – возрастают.

Литература

1. Матуа В.П., Чирва Д.В., Матуа Р.В. Влияние упруговязкопластических свойств асфальтобетонов на накопление остаточных деформаций в слоях покрытий автомобильных дорог // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. №10. С. 71–77.
2. Углова Е.В., Илиополов С.К., Селезнев М.Г. Усталостная долговечность эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2009. 244 с.
3. Александров А.С. Расчет пластических деформаций материалов и грунтов дорожных конструкций при воздействии транспортной нагрузки // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. №2. С. 3–11.
4. Кузин Н.В., Александров А.С. Расчет упругих, упруговязких и упруговязкопластических деформаций асфальтобетонных покрытий и оснований при воздействии транспортных нагрузок // Вестник ТГАСУ. 2007. №4. С. 155–164.
5. Александров А.С. Нелинейное пластическое деформирование материалов при воздействии повторных кратковременных нагрузок // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. №10. С. 74–84.
6. Кривисский А.М. Принципы назначения конструкций дорожных одежд нежесткого типа на магистральных автомобильных дорогах: автореф. дисс....д-ра техн. наук. Л.: ЛИСИ, 1963. 31 с.
7. Калинин А.Л. Применение модифицированных условий пластичности для расчета безопасных давлений на грунты земляного полотна // Инженерно-строительный журнал. 2013. №4. С. 35–45.
8. Александров А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л. О допускаемых давлениях на грунты земляного полотна и слои дорожной одежды // Наука и техника в дорожной отрасли. 2012. №2. С. 10–13.
9. Долгих Г.В. Расчет грунтов земляного полотна по критерию безопасных давлений // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. Вып. 6 (34). С. 43–49.
10. Александров А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л. Применение критерия Друкера – Прагера для модификации условий пластичности // Наука и техника в дорожной отрасли. 2013. №2. С. 26–29.
11. Феллиниус В. Статика грунтов / пер. с нем. П.С. Рубан. М.; Л. : НКТП-СССР-Гостройиздат, 1933. С. 45–93.
12. Prandtl L. Uber die Eindringungs-festigkeit (Harte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden // Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik. 1921. Vol. 1 (1). Pp. 15–20.
13. Reissner H. Zum Erddruck problem (Concerning the earth-pressure problem) // Proceedings of the First International Congress on Applied Mechanics. Ed. C.B. Biezeno and J.M. Burgers, Delft. 1926. Pp. 295–311.
14. Meyerhof G. G. Discussion, Proc., Fifth intern. // Conf. on Soil Mech. and Found. Engr. 1961. Vol. 3. Pp. 193–194.
15. Shakibarad S., Heshmati A.A., Salehzadeh H. Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) to Predict the Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundation on Cohesionless Soil // Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE). 2011. Vol. 16. Pp. 1459–1469.
16. Vesic A.S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations. // Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. 1973. Vol. 99(1). Pp. 45–73.
17. Королев К.В. Начальная несущая способность водонасыщенного основания ленточного фундамента при различных коэффициентах порового давления // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. № 1. С. 6–9.
18. Королев К.В. Конечная (максимальная) несущая способность водонасыщенного основания ленточного фундамента // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. №4. С. 8–12.
19. Мевлетдинов З.А. Обоснование основных показателей, учитывающих влияние остаточных деформаций при расчёте дорожных одежд нежесткого типа: автореф. дисс....канд. техн. наук. М., МАДИ (ТУ), 1997. 17 с.
20. Горячев М.Г. Обоснование суммарного размера движения для расчета нежестких дорожных одежд с учетом процесса накопления остаточных деформаций: автореф. дисс....канд. техн. наук. М., МАДИ (ТУ), 1999. 17 с.

Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий

21. Эдельман А.В. Оценка влияния неупругих свойств грунта земляного полотна на работоспособность дорожных одежд нежесткого типа: автореф. дисс...канд. техн. наук. М., МАДИ (ТУ), 1993. 20 с.
22. Каныгина С.Ю. Прогнозирование остаточных деформаций дорожных одежд нежесткого типа на земляном полотне из глинистых грунтов: автореф. дисс...канд. техн. наук. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 1999. 20 с.
23. Фадеев В.Б. Влияние остаточных деформаций грунта земляного полотна на колеобразование на проезжей части дорог с нежесткими дорожными одеждами: автореф. дисс...канд. техн. наук, М.: МАДИ (ТУ), 1999. 21 с.
24. Жустарева Е.В. Влияние плотности связного грунта в рабочем слое земляного полотна на остаточные деформации нежестких дорожных одежд: автореф. дисс...канд. техн. наук. М.: МАДИ (ТУ), 2000. 20 с.
25. Александров А.С. Учет упруговязкопластических свойств связных грунтов при проектировании дорожных одежд: автореф. дисс... канд. техн. наук. Омск: СибАДИ, 2001. 24 с.
26. Кузин Н.В. Учет упруговязкопластических свойств асфальтобетонных покрытий и оснований при проектировании дорожных одежд: автореф. дисс...канд. техн. наук. Омск: СибАДИ, 2008. 19 с.
27. Пилипенко А.С. Сдвигоустойчивость глинистых грунтов в основании дорожных одежд под действием кратковременных многократных нагрузок: автореф. дисс...канд. техн. наук. М.: СоюздорНИИ, 1990. 20 с.
28. Матуа В.П. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций с учетом их неупругих свойств и пространственного нагружения: Автореф. дисс...д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2002. 40 с.
29. Чирва Д.В. Влияние упруго-вязко-пластических свойств асфальтобетона на накопление остаточных деформаций при пространственном динамическом нагружении дорожных конструкций: автореф. дисс... канд. техн. наук. Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. 22 с.
30. Александров А. С., Сиротюк В. В. Обоснование величины допустимой необратимой деформации покрытий // Наука и техника в дорожной отрасли. 2002. №1. С. 7–8.
31. Семенова Т.В., Гордеева С.А., Герцог В.Н. Определение пластических деформаций материалов, используемых в дорожных конструкциях // Вестник ТГАСУ. 2012. №4. С. 249–257.
32. Семенова Т.В., Герцог В.Н. Пластическое деформирование материалов с дискретной структурой в условиях трехосного сжатия при воздействии циклических нагрузок // Вестник СибАДИ. 2013. С. 68–73.
33. Александров А.С. Применение теории наследственной ползучести к расчету деформаций при воздействии повторных нагрузок: монография. Омск: СибАДИ, 2014. 150 с.
34. Su K., Sun L.J., Hachiya Y. Rut Prediction for Semi-rigid Asphalt Pavements // First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices. 2008. Beijing. Pp. 486–491.
35. Highway Research Board. The WASHO Road Test, Part I: Design, Construction, and Testing Procedures. Special Report 18, National Academy of Science, National Research Council, Publication 310. Washington, D.C. 1954. 121 p.
36. Highway Research Board. The WASHO Road Test, Part II: Test Data, Analysis, Findings. Special Report 22, National Academy of Science, National Research Council, Publication 360. Washington, D.C. 1955. 143 p.
37. Highway Research Board. The AASHO Road Test. Special Report 79, Publication No. 1012, National Academy of Sciences – National Research Council, Washington, D.C. 1962. 117 p.
38. Lee A.R., Croney D. British Full-Scale Pavement Design Experiments // Proceedings, International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, Ann Arbor, MI, August 1962. Pp. 114–136.
39. Eisenmann J., Hilmer A. Influence of wheel load and inflation pressure on the rutting effect at asphalt pavement experiments and theoretical investigations // Proceedings of the sixth international conference on the structural design of asphalt pavements. 1987. Pp. 392–403.
40. Смирнов А.В. Теоретические и экспериментальные исследования работоспособности нежестких дорожных одежд: дисс...д-ра. техн. наук, Москва, 1991. 389 с.
41. Кусков В.Н. Прогноз сроков службы дорожных одежд на основе стендовых испытаний: дисс...канд. техн. наук. 1986. 179 с.

42. Myers L.A. Drakos C., Roque R. The combined effects of tire contact stresses and environment on surface rutting and cracking performance // Proceedings of the ninth international conference on asphalt pavements, Copenhagen, Denmark. 2002. Pp. 1–15.
43. Sousa J.B., Craus J., Monimith C. L. Summary report on permanent deformation on asphalt concrete // SHRP-A-318, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C., 1994. Pp. 40–60.
44. Sun L.J., Bi Y. Top-down cracking analysis and control for asphalt pavements // Proceedings of the tenth international conference on the structural design of asphalt pavements, Quebec, Canada. 2006. Pp. 110–116.
45. Pell P.S., Taylor F. Fatigue characteristic of bituminous materials // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 1974. Vol. 43. Pp. 310–323.
46. Balay J.M., Kerzreho J.P. Assessment of French design method for flexible pavement by mean of the LCPC.s ALT facility // 3rd International Conference APT'08. Madrid, Spain, 1-3 Octobre. 2008. Pp. 1–12.
47. Odermatt N., Janoo V., Magnusson R. Analysis of Permanent Deformation in Subgrade Material Using a Heavy Vehicle Simulator (CD-ROM) // Proceedings of the First International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno, Nev., Oct. 18–20, 1999. Pp. 247–302.
48. Александров А.С., Киселева Н.Ю. Пластическое деформирование гнейс и диабазматериалов при воздействии повторяющихся нагрузок // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. №6. С. 49–59.
49. Александров А.С. Пластическое деформирование гранодиоритового щебня и песчано-гравийной смеси при воздействии трехосной циклической нагрузки // Инженерно-строительный журнал. 2013. №4. С. 22–34.
50. Демишкан В.Ф. Усовершенствование управления состоянием автомобильных дорог при условиях ограниченных ресурсов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. ХАДИ (ТУ). Харьков, 2000. 17 с.
51. Жабин В.И., Мельницкий М.А., Герасимов О.В. Эмпирическая оценка прочностных характеристик нефтегравийных покрытий автодорог // Лесной журнал. 2013. №3. С. 79–85.
52. Золотарь И.А. К определению остаточных деформаций в дорожных конструкциях при многократных динамических воздействиях на них подвижных транспортных средств. СПб.: Изд-во ВАТТ, 1999. 31 с.
53. Каленова Е.В. Совершенствование методики расчета при проектировании нежестких дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2009. 22 с.
54. Александров А.С., Гордеева С.А. О допускаемых и предельных значениях неровностей асфальтобетонных покрытий дорожных одежд жесткого типа // Автомобильная промышленность. 2011. №2. С. 31–35.
55. Александров А.С. Критерии расчета дорожных конструкций по ровности, допускаемые и предельные неровности // Вестник гражданских инженеров. 2008. №4. С. 97–104.
56. Буртыль Ю., Леонович И. Взаимозависимости ровности покрытия и прочности дорожной одежды [Электронный ресурс]. URL: <http://bsc.by/story/vzaimozavisimosti-rovnosti-pokrytiya-i-prochnosti-dorozhnoy-odezhdy> (дата обращения 10.12.2012).

*Виталий Николаевич Герцог, г. Омск, Россия
+7(3812)651563; эл. почта: vitgerc@bk.ru*

*Геннадий Владимирович Долгих, г. Омск, Россия
+7(3812)651563; эл. почта: gennadiy1987_87@mail.ru*

*Николай Владимирович Кузин, г. Омск, Россия
+7(3812)651563; эл. почта: vitgerc@bk.ru*

© Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В., 2015

doi: 10.5862/MCE.57.4

Calculation criteria for road pavement evenness. Part 1: substantiating the flatness standards of asphalt concrete pavement

V.N. Gercog,*Siberian State Automobile And Highway Academy
+7(3812)651563; e-mail: vitgerc@bk.ru***G.V. Dolgikh,***Siberian State Automobile And Highway Academy
+7(3812)651563; e-mail: gennadiy1987_87@mail.ru***N.V. Kuzin,***Siberian State Automobile And Highway Academy
+7(3812)651563; e-mail: vitgerc@bk.ru*

Key words

evenness; depth of unevenness; rut depth; the time of contact; mutually interacting tire and coatings

Abstract

This article gives an overview and analysis of the works aimed at finding empirical dependencies linking the indicators of longitudinal and transverse evenness with the parameters of the deformability of road constructions and its individual elements. We list the data of field experiments and laboratory studies of triaxial deformation of materials by a repeatedly applied load.

The methods of calculating the deformation based on rheological models, including the theory of hereditary creep, have been analyzed. The results of studies substantiating the acceptable and the critical individual irregularities formed in the longitudinal and transverse directions are discussed.

A new method of calculating the acceptable depth of irregularities, allowing for the characteristics of the vehicle, including the time of contact interaction between the wheel and the pavement that depends on the speed of the vehicle, has been suggested. The proposed method of calculating the critical values of irregularities ensures the required level of consumer characteristics (i.e. speed and traffic safety) over the whole lifetime of the road structure.

References

1. Matua V.P. Vliyaniye uprugoviyazkoplasticheskikh svoystv asfaltobetonov na nakopleniye ostatochnykh deformatsiy v sloyakh pokrytiy avtomobilnykh dorog [Influence of elastoviscoplastic properties of asphalt on the accumulation of residual strain in the layers of highways coatings]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2009. No. 10. Pp. 71–77. (rus)
2. Uglova Ye.V. *Ustalostnaya dolgovechnost ekspluatiruyemykh asfaltobetonnykh pokrytiy* [The fatigue life of asphalt concrete coatings exploited]. Rostov-on-Don.: RGSU, 2009. 244 p. (rus)
3. Aleksandrov A.S. Raschet plasticheskikh deformatsiy materialov i gruntov dorozhnykh konstruksiy pri vozdeystvii transportnoy nagruzki [Calculation of plastic deformation of materials and soil road constructions under the influence of traffic loads]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2009. No.2. Pp. 3–11. (rus)
4. Kuzin N.V., Aleksandrov A.S. Raschet uprugikh, uprugoviyazkikh i uprugoviyazkoplasticheskikh deformatsiy asfaltobetonnykh pokrytiy i osnovaniy pri vozdeystvii transportnykh nagruzok [Calculation of elastic, viscoelastic and elastic-deformation of asphalt concrete pavement and foundations under the influence of traffic loads]. *Vestnik of TSUAB*. 2007. No.4. Pp. 155–164. (rus)
5. Aleksandrov A.S. Nelineynoye plasticheskoye deformirovaniye materialov pri vozdeystvii povtornykh kratkovremennykh nagruzok [Nonlinear plastic deformation of materials under the influence of intermittent loads]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2008. No. 10. Pp. 74–84. (rus)
6. Krivisskiy A.M. *Printsipy naznacheniya konstruksiy dorozhnykh odezhd nezhestkogo tipa na magistralnykh avtomobilnykh dorogakh. Avtoref....d-ra tekhn. nauk.* [The principles of purpose road structures in the non-rigid type of trunk roads. Doctoral theses]. Saint Petersburg: LISI. 1963. 31 p. (rus)

7. Kalinin A.L. Primeneniye modifitsirovannykh usloviy plastichnosti dlya rascheta bezopasnykh davleniy na grunty zemlyanogo polotna [Use of the modified conditions of plasticity for calculating sound pressure at the soil subgrade]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 4. Pp. 35–45. (rus)
8. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L. O dopuskayemykh davleniyakh na grunty zemlyanogo polotna i sloi dorozhnoy odezhd [About permitted ground pressure of subgrade and pavement layers]. *Science and Engineering for Highways*. 2012. No.2. Pp. 10–13. (rus)
9. Dolgikh G.V. Raschet gruntov zemlyanogo polotna po kriteriyu bezopasnykh davleniy [Calculation of subgrade soil by criteria of safety pressures]. *Vestnik SibADI*. Omsk: SibADI. 2013. Vol. 6 (34). Pp. 43–49. (rus)
10. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L. Primeneniye kriteriya Drukera – Pragera dlya modifikatsii usloviy plastichnosti [Application of the criterion of Drucker - Prager to modify the conditions of plasticity]. *Science and Engineering for Highways*. 2013. No. 2. Pp. 26–29. (rus)
11. Fellenius V. *Statika gruntov* [Statics of soils]. Moscow: NKTP-SSSR-Gostroyizdat. 1933. (rus)
12. Prandtl L. Uber die Eindringungs-festigkeit (Harte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1921. Vol. 1 (1). Pp. 15–20.
13. Reissner H. Zum Erddruck problem (Concerning the earth-pressure problem). *Proceedings of the First International Congress on Applied Mechanics*. Ed. C.B. Biezeno and J.M. Burgers, Delft. 1926. Pp. 295–311.
14. Meyerhof G.G. Discussion, Proc., Fifth Intern. Conf. on Soil Mech. and Found. Engr. 1961. Vol. 3. Pp. 193–194.
15. Shakibarad S., Heshmati A.A., Salehzadeh H. Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) to Predict the Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundation on Cohesionless Soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*. 2011. Vol. 16. Pp. 1459–1469.
16. Vesic A.S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*. 1973. Vol. 99(1). Pp. 45–73.
17. Korolev K.V. Nachalnaya nesushchaya sposobnost vodonasyshchennogo osnovaniya lentochnogo fundamenta pri razlichnykh koeffitsiyentakh porovogo davleniya [The initial carrying capacity of water-saturated grounds strip foundation with different coefficients of pore pressure]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2013. No. 1. Pp. 6–9. (rus)
18. Korolev K.V. Konechnaya (maksimalnaya) nesushchaya sposobnost vodonasyshchennogo osnovaniya lentochnogo fundamenta [Ultimate (maximum) load-bearing capacity of water-saturated grounds strip foundation]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2013. No. 4. Pp. 8–12. (rus)
19. Mevletdinov Z.A. *Obosnovaniye osnovnykh pokazateley, uchityvayushchikh vliyaniye ostatochnykh deformatsiy pri raschete dorozhnykh odezhd nezhestkogo tipa* [Justification of the main parameters that take into account the effect of residual deformation in the calculation of road clothes of nonrigid type]. Moscow: MADI (TU). 1997. 17 p. (rus)
20. Goryachev M.G. *Obosnovaniye summarnogo razmera dvizheniya dlya rascheta nezhestkikh dorozhnykh odezhd s uchetom protsessa nakopleniya ostatochnykh deformatsiy* [Justification of the total size of the motion for the calculation of non-rigid road surfacing process, taking into account the accumulation of residual deformations]. Moscow: MADI (TU). 1999. 17 p. (rus)
21. Edelman A.V. *Otsenka vliyaniya neuprugikh svoystv grunta zemlyanogo polotna na rabotosposob-nost dorozhnykh odezhd nezhestkogo tipa* [Assessing the impact of inelastic properties of the soil subgrade on the performance of non-rigid type of road pavement]. Moscow: MADI (TU). 1993. 20 p.
22. Kanygina S.Yu. *Prognozirovaniye ostatochnykh deformatsiy dorozhnykh odezhd nezhestkogo tipa na zemlyanom polotne iz glinistykh gruntov* [Prediction of residual deformations of non-rigid road pavement type on the subgrade of clay soils]. Moscow: MADI (TU). 1999. 20 p. (rus)
23. Fadeyev V.B. *Vliyaniye ostatochnykh deformatsiy grunta zemlyanogo polotna na koleyobrazovaniye na proyezhchey chasti dorog s nezhestkimi dorozhnyimi odezhdami* [Influence of residual strains in the soil subgrade rutting on roadways with non-rigid pavement]. Moscow: MADI (TU). 1999. 21 p. (rus)
24. Zhustareva Ye.V. *Vliyaniye plotnosti svyaznogo grunta v rabochem sloye zemlyanogo polotna na ostatochnyye deformatsii nezhestkikh dorozhnykh odezhd* [Influence of density of cohesive soil in the working layer of the roadbed on the residual deformation of nonrigid road clothes]. Moscow: MADI (TU). 2000. 20 p. (rus)
25. Aleksandrov A.S. *Uchet uprugoviyazkoplasticheskikh svoystv svyaznykh gruntov pri proyektirovani dorozhnykh odezhd* [Accounting elastoviscoplastic properties of cohesive soils in the design of road pavements]. Omsk: SibADI. 2001. 24 p. (rus)

Gercog V.N., Dolgikh G.V., Kuzin N.V. Calculation criteria for road pavement evenness. Part 1: substantiating the flatness standards of asphalt concrete pavement

26. Kuzin N.V. *Uchet uprugoviyazkoplasticheskikh svoystv asfaltobetonnykh pokrytiy i osnovaniy pri proyektirovaniy dorozhnykh odezhd* [Accounting elastoviscoplastic properties of asphalt concrete pavement and foundations in the design of road pavements]. Omsk: SibADI. 2008. 19 p. (rus)
27. Pilipenko A.S. *Sdvigoustoychivost glinistykh gruntov v osnovanii dorozhnykh odezhd pod dey-stviyem kratkovremennykh mnogokratnykh nagruzok* [Sdvigoustoychivost clay soils in the bottom of road pavements under the influence of short-term multiple loads]. Moscow: Soyuzdornii. 1990. 20 p. (rus)
28. Matua V.P. *Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dorozhnykh konstruksiy s uchetom ikh neuprugikh svoystv i prostranstvennogo nagruzheniya* [A study of stress-strain state of the road constructions in view of their non-elastic properties and loading space]. Rostov-on-Don: RGSU. 2002. 40 p. (rus)
29. Chirva D.V. *Vliyaniye uprugo-vyazko-plastichnykh svoystv asfaltobetona na nakopleniye ostatochnykh deformatsiy pri prostranstvennom dinamicheskom nagruzhenii dorozhnykh konstruksiy* [Effect of elastic-viscous-plastic properties of asphalt concrete on the accumulation of residual deformations in the spatial dynamic loading of road constructions]. Volgograd: VolgGASU. 2010. 22 p. (rus)
30. Aleksandrov A. S., Sirotuk V. V. *Obosnovaniye velichiny dopustimoy neobratimoy deformatsii pokrytiy* [Justification of the value of the permissible permanent deformation of coatings]. *Science and Engineering for Highways*. 2002. No. 1. Pp. 7–8. (rus)
31. Semenova T.V., Gordeyeva S.A., Gercog V.N. *Opredeleniye plasticheskikh deformatsiy materialov, ispolzuyemykh v dorozhnykh konstruksiyakh* [Determination of plastic deformation of the materials used in road constructions]. *Vestnik of TSUAB*. 2012. No. 4. Pp. 249–257. (rus)
32. Semenova T.V., Gercog V.N. *Plasticheskoye deformirovaniye materialov s diskretnoy strukturoy v usloviyakh trekhsnogo szhatiya pri vozdeystvii tsiklicheskikh nagruzok* [Plastic deformation of materials with a discrete structure in a triaxial when exposed to cyclic loading]. *Vestnik SibADI*. 2013. Pp. 68–73. (rus)
33. Aleksandrov A.S. *Primeneniye teorii nasledstvennoy polzuchesti k raschetu deformatsiy pri vozdeystvii povtornykh nagruzok: monografiya* [Application of the theory to the calculation of hereditary creep deformation under the influence of repeated loadings: monograph]. Omsk: SibADI. 2014. 150 p. (rus)
34. Su K., Sun L.J., Hachiya Y. *Rut Prediction for Semi-rigid Asphalt Pavements*. *First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices*. 2008. Beijing. Pp. 486–491.
35. *Highway Research Board. The WASHO Road Test, Part I: Design, Construction, and Testing Procedures. Special Report 18, National Academy of Science, National Research Council, Publication 310*. Washington, D.C., 1954. 121 p.
36. *Highway Research Board. The WASHO Road Test, Part II: Test Data, Analysis, Findings. Special Report 22, National Academy of Science, National Research Council, Publication 360*. Washington, D.C., 1955. 143 p.
37. *Highway Research Board. The AASHO Road Test. Special Report 79, Publication No. 1012*, National Academy of Sciences – National Research Council, Washington, D.C., 1962. 117 p.
38. Lee A.R., Croney D. *British Full-Scale Pavement Design Experiments. Proceedings, International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Univ. of Michigan, Ann Arbor, MI. 1962. Pp. 114–136.
39. Eisenmann J., Hilmer A. *Influence of wheel load and inflation pressure on the rutting effect at asphalt pavement experiments and theoretical investigations. Proceedings of the sixth international conference on the structural design of asphalt pavements*. 1987. Pp. 392–403.
40. Smirnov A.V. *Teoreticheskiye i eksperimentalnyye issledovaniya rabotosposobnosti nezhest-kikh dorozhnykh odezhd* [Theoretical and experimental investigation of efficiency of nonrigid road clothes]. Moscow: 1991. 389 p. (rus)
41. Kuskov V.N. *Prognoz srokov sluzhby dorozhnykh odezhd na osnove stendovykh ispytaniy* [Forecast service life of road pavements based on the test bench]. Moscow: 1986. 179 p.
42. Myers L.A. Drakos C., Roque R. *The combined effects of tire contact stresses and environment on surface rutting and cracking performance. Proceedings of the ninth international conference on asphalt pavements*, Copenhagen, Denmark. 2002. Pp. 1–15.
43. Sousa J.B., Craus J., Monimith C. L. *Summary report on permanent deformation on asphalt concrete. SHRP-A-318, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C., 1994. Pp. 40–60.*
44. Sun L.J., Bi Y. *Top-down cracking analysis and control for asphalt pavements. Proceedings of the tenth international conference on the structural design of asphalt pavements*. Quebec, Canada. 2006. Pp. 110–116.

Gercog V.N., Dolgikh G.V., Kuzin N.V. Calculation criteria for road pavement evenness. Part 1: substantiating the flatness standards of asphalt concrete pavement

45. Pell P.S., Taylor F. Fatigue characteristic of bituminous materials. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 1974. Vol. 43. Pp. 310–323.
46. Balay J.M., Kerzreho J.P. Assessment of French design method for flexible pavement by mean of the LCPC.s ALT facility. *3rd International Conference APT'08*. Madrid, Spain. 1-3 October. 2008. Pp. 1–12.
47. Odermatt N., Janoo V., Magnusson R. Analysis of Permanent Deformation in Subgrade Material Using a Heavy Vehicle Simulator (CD-ROM). *Proceedings of the First International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno, Nev.* Oct. 18–20. 1999. Pp. 247–302.
48. Aleksandrov A.S., Kiseleva N.Yu. Plasticheskoye deformirovaniye gneys i diabazmaterialov pri vozdeystvii povtoryayushchikhsya nagruzok [Plastic deformation of the gneiss and diabazmaterialov when exposed to repetitive loads]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2012. No. 6. Pp. 49–59. (rus)
49. Aleksandrov A.S. Plasticheskoye deformirovaniye granodioritovogo shchebnaya i peschano-graviynoy smesi pri vozdeystvii trekhosnoy tsiklicheskoj nagruzki [Plastic deformation granodiorite gravel and sand and gravel when exposed to cyclic loading triaxial]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No.4. Pp. 22–34. (rus)
50. Demishkan V.F. *Usovershenstvovaniye upravleniya sostoyaniyem avtomobilnykh dorog pri uslo-viyakh ograniichennykh resursov* [Improvement of state management of roads under the conditions of limited resources]. Kharkov: KhADI (TU). 17 p. (rus)
51. Zhabin V.I. Empiricheskaya otsenka prochnostnykh kharakteristik neftegraviynnykh pokrytiy avtodorog [An empirical evaluation of the strength characteristics of road surfaces neftegraviynnyh]. *Lesnoy Zhurnal*. 2013. No.3. Pp. 79–85. (rus)
52. Zolotar I.A. *K opredeleniyu ostatochnykh deformatsiy v dorozhnykh konstruksiyakh pri mnogo-kratnykh dinamicheskikh vozdeystviyakh na nikh podvizhnykh transportnykh sredstv* [Determination of residual strains in road structures at multiple dynamic effects on them of moving vehicles]. Saint-Petersburg: VATT. 1999. 31 p. (rus)
53. Kalenova Ye.V. *Sovershenstvovaniye metodiki rascheta pri proyektirovanii nezhestkikh dorozhnykh odezhd s asfaltobetonnym pokrytiyem* [Improving the method for calculating the design of non-rigid road surfacing with asphalt]. Moscow: MADI (TU). 2009. 22 p. (rus)
54. Aleksandrov A.S. Gordeyeva S.A. O dopuskayemykh i predelnykh znacheniyakh nerovnostey asfaltobetonnnykh pokrytiy dorozhnykh odezhd zhestkogo tipa [About permissible limit values and roughness of asphalt concrete pavement road surfacing rigid type]. *Avtomobilnaya promyshlennost*. 2011. No.2. Pp. 31–35. (rus)
55. Aleksandrov A.S. Kriterii rascheta dorozhnykh konstruksiy po rovnosti, dopuskayemye i predelnyye nerovnosti [The criteria for the calculation of road constructions for evenness, prevent and limit irregularities]. *Bulletin of Civil Engineers*. 2008. No.4. Pp. 97–104. (rus)
56. Burtyl Yu., Leonovich I. *Vzaimozavisimosti rovnosti pokrytiya i prochnosti dorozhnoy odezhd* [Interdependency smoothness of the coating and the strength of the pavement]. URL: <http://bsc.by/story/vzaimozavisimosti-rovnosti-pokrytiya-i-prochnosti-dorozhnoy-odezhdy>. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 45–57