

ПРОДЛЕНИЕ СРОКОВ СЛУЖБЫ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ: ТРИВИАЛЬНЫЕ И НЕТРИВИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ

Канд. техн. наук **А.Е. Мерзликін,**
инженер **Я.Н. Корчажников**
(ФАО "РОСДОРНИИ)

Контактная информация: merzlikin07@gmail.com

Описаны три способа продления сроков службы нежестких дорожных одежд (ДО) при проектировании. Во-первых, показано как влияет на срок службы ДО точность прогнозирования периода весеннего оттаивания земляного полотна. Рекомендуется в расчетную схему ДО ввести оттаявшую и неоттаявшую части земляного полотна. Во-вторых, показано, что игнорирование физической нелинейности щебеночно-гравийно-песчаных материалов в определенных условиях может привести к сокращению срока службы ДО примерно в 1,5 раза. В-третьих, показано, что на участках автомобильных дорог, на которых появляются заторы, ДО должны проектироваться с учетом расчетных характеристик асфальтобетона, полученных при длительности действия нагрузки более 0,1 с. При проектировании ДО нижние слои покрытия или верхние слои основания следует назначать из пористого, плотного, высокоплотного или дисперсно-армированного асфальтобетонов.

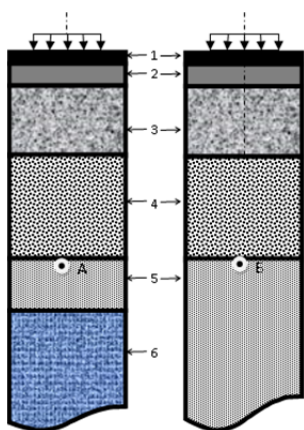
Ключевые слова: *весеннее оттаивание земляного полотна, расчетная схема дорожной одежды, физическая нелинейность, зернистый материал, затор.*

Точность прогнозирования периода весеннего оттаивания земляного полотна

Одним из тривиальных способов недопущения сокращения срока службы нежестких дорожных одежд является снижение допустимых нагрузок на оси тяжелых транспортных средств на протяжении периода весеннего оттаивания грунта земляного полотна. Допустимые нагрузки снижаются не только в России, но и в ряде зарубежных стран, для которых характерны холодные периоды года (Беларусь, Казахстан, Канада, Норвегия, Финляндия, Швеция, Франция, США и др.). В США ограничения вводятся в 19 штатах на период от 8 до 9 недель. Установлено, что временное снижение допустимой осевой нагрузки в период весенне-

го оттаивания на 20-50 % в США дает возможность увеличить срок службы некоторых дорожных одежд на 62-95 % [1].

К концу зимнего периода глубина промерзания ниже покрытия дорожных одежд может составить более 2 м. В весенний период оттаивание начинается на поверхности дорожной одежды и продолжается в нижних слоях. Такие условия крайне неблагоприятны для дорожной конструкции, так как оттаивание произошло, но влага не может уходить вниз из-за промерзшего грунта. Эта влага, скапливающаяся в грунте, становится причиной максимального снижения сопротивления сдвиговым напряжениям в грунте от транспортных нагрузок. Логично предположить, что наибольшие сдвиговые напряжения возникнут в относительно тонком слое оттаявшего грунта, который лежит на толстом промерзшем слое земляного полотна. Для подтверждения этой гипотезы рассчитали активные сдвигающие напряжения в верхних частях: во-первых, слоя толщиной 20 см оттаявшего грунта (точка А) и, во-вторых, полностью оттаявшего земляного полотна (точка Б). На **рис. 1** представлены рассчитанные дорожные конструкции и таблица с исходными данными для их расчета под нагрузкой со следующими расчетными параметрами: давление на покрытие, величиной 0,6 МПа, равномерно распределенное по площади круга диаметром 37 см. Расчетные характеристики материалов слоев приняли по ОДН 218.046-01 [2]. Характеристики замороженного грунта установили на основании исследований [3].



№ слоя	h, см	E, МПа	μ
1	5	1800	0,25
2	7	1200	0,25
3	30	450	0,3
4	46	120	0,3
5	20 и ∞	38	0,35
6	∞	3800	0,2

Рис. 1. Расчетные схемы и характеристики материалов слоев сравниваемых дорожных конструкций

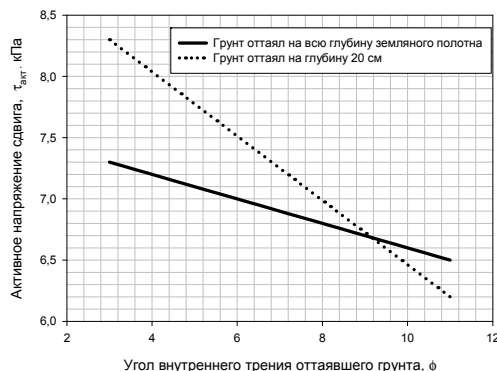


Рис. 2. Зависимость активных напряжений сдвига в оттаявшем грунте на глубину 20 см и на всю глубину земляного полотна

Активные напряжения сдвига $\tau_{акт}$ рассчитывали по известной [4] формуле (1):

$$\tau_{акт} = [(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) * \sin \varphi] / (2 * \cos \varphi) , \quad (1)$$

где

σ_1 – максимальное главное напряжение;

σ_3 – минимальное главное напряжение;

φ – угол внутреннего трения грунта.

При этом активные напряжения сдвига определяли для грунтов, которые в водонасыщенном состоянии имеют угол внутреннего трения от 3 до 11 град.

Опираясь на данные ОДН 218.046-01 [2], к таким грунтам можно отнести глины, суглинки, супеси и пылеватые пески. Зависимости, представленные на **рис. 2**, показывают, что сдвигоустойчивость грунтов насыщенных водой в слое толщиной 20 см и лежащих на твердом замороженном основании, меньше, чем сдвигоустойчивость грунтов, которые оттаяли на всю глубину земляного полотна. На основании этого можно сделать два важных вывода:

- *во-первых*, необходимо изменить применяемую в настоящее время расчетную схему дорожных одежд для районов, для которых характерны холодные периоды года, т.е. в расчетной схеме следует учитывать часть нижележащего промерзшего земляного полотна, другими словами, жесткое основание;
- *во-вторых*, продление срока службы дорожной одежды зависит от точности прогнозирования периода весеннего оттаивания земляного полотна.

Учет особых свойств зернистых материалов

Одним из нетривиальных способов продления срока службы нежестких дорожных одежд является учет при их расчете физической нелинейности щебня и других зернистых материалов. В действующей в настоящее время в России методике расчета дорожных одежд [2] модуль упругости щебней, щебеночно-гравийных смесей и песков не зависит от места и глубины расположения слоев из этих материалов в конструкции дорожной одежды или от воздействующих на них нагрузок. Тем не менее, известно [5, 6], что модуль упругости зернистых материалов возрастает с увеличением интенсивности возникающих в них напряжений.

Анализируя влияние физической нелинейности щебня, расположенного в основании дорожной конструкции, на максимальные горизонтальные напряжения в асфальтобетонных покрытиях, нами показано [7], что физическая нелинейность щебня проявляется максимальным образом в дорожных одеждах с тонкими (4-9 см) асфальтобетонными покрытиями. Также практический интерес представляет ответ на вопрос о влиянии физической нелинейности щебеночной смеси, расположенной в основании, на напряженное состояние грунта земляного полотна. Для ответа на этот вопрос провели численный анализ дорожной одежды (табл. 1), для которой при расчете по действующей методике [2] определяющим критерием прочности является сдвигоустойчивость грунта. При расчете дорожной одежды использовалась нагрузка интенсивностью $p=0,6$ МПа, равномерно распределенная по круговой площадке диаметром $D=37$ см. Суммарное количество приложений нагрузки до капитального ремонта, которое предполагается пропустить в течение 10 лет – 750 000 ед.

Таблица 1

Расчетные параметры исходной дорожной одежды

№ слоя	Материал	Толщина, h, см	Модуль упругости, М, МПа, при расчете по критериям:			Кэф-фициент Пуассона, μ	Плотность, кгс/м ³
			изгиб монолитных слоев	сдвигоустойчивость грунта	прогиб покрытия		
1	Асфальтобетон	3	4500	1800	3200	0,25	2400
2	Асфальтобетон	9,5	2800	1200	2000	0,25	2300
3	Щебеночная смесь	29	280	280	280	0,3	1800
4	Песок	48	120	120	120	0,3	2000
5	Суглинок легкий	∞	30	30	30	0,35	2000

Для оценки влияния нелинейных свойств зернистого основания на напряженно-деформированное состояние (НДС) дорожной одежды и, в том числе, на активное напряжение сдвига в грунте земляного полотна, применили модель нелинейности, которая описывается выражением (2), заимствованным из Руководства по механико-эмпирическому методу проектирования дорожных одежд США (MEPDG) [8]:

$$M_r = K_1 p_a (\theta/p_a)^{K_2} (\tau_{oct} p_a + 1)^{K_3} , \quad (2)$$

где

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ – сумма главных напряжений;

τ_{oct} – касательное напряжение на октаэдрических площадках;

p_a – атмосферное давление ($p_a=101$ кПа);

K_1, K_2, K_3 – коэффициенты, полученные по результатам экспериментов.

Для определенности в качестве зернистого основания использовали щебеночно-гравийно-песчаную смесь, имеющую зерновой состав близкий к С2 по ГОСТ 25607-2009 [9] (рис. 3).

Эмпирические коэффициенты такой смеси следующие: $K_1=0,620$, $K_2=1,022$ и $K_3=-0,895$ [10]. Для оценки влияния нелинейных свойств вышеописанного зернистого основания на активное напряжение сдвига в грунте применили следующий упрощенный алгоритм расчета с помощью программы АЛГОФОРТ, реализующей точное решение задачи теории упругости о НДС для многослойного полупространства [11]. Полученные напряжения на оси нагружения корректировали, учитывая гравитационные напряжения (собственный вес вышележащих слоев):

- для вертикальных напряжений σ_z по формуле (3):

$$\sigma_z = \sigma_1 = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i , \quad (3)$$

где

n – количество слоев или подслоев, лежащих над рассматриваемой точкой;

γ_i – плотность i -ого слоя или подслоя, кгс/м³;

h_i – толщина i -ого слоя или подслоя, см;

- для горизонтальных напряжений σ_r по формуле (4) [12]:

$$\sigma_r = \sigma_3 = \sigma_z (0,5 + \mu) , \quad (4)$$

где

μ – средневзвешенный коэффициент Пуассона слоев и полупространства, лежащих под рассматриваемой точкой ($\mu=0,35$).

Кроме того, алгоритм расчета включал следующее:

- модуль упругости, коэффициент Пуассона и толщину асфальтобетонных из верхнего и нижнего слоев, а также песка и грунта во всех расчетах задали равными значениям, которые ранее исполь-

- зовали при расчете исходной дорожной одежды по критерию сдвигаустойчивости грунта;
- слой основания был разделен на 4 подслоя, задав материалу каждого подслоя исходные модуль упругости, коэффициент Пуассона и толщину;
 - в точках, расположенных в середине толщины каждого подслоя и на оси нагружения, были определены главные напряжения от заданной нагрузки (итерация 1);
 - в соответствии с формулой модели MEPDG и, учитывая полученные напряжения и их корректировку, были рассчитаны новые модули упругости материала каждого подслоя для использования их во второй итерации;
 - корректировка напряжений в подслоях состояла в том, что горизонтальные растягивающие напряжения приравнялись нулю, так как растяжение не может возникать в зернистом материале;
 - для каждого подслоя была выполнена проверка отличия новых модулей упругости от модулей упругости, полученных в предыдущей итерации; расчеты заканчивались, если новые модули упругости всех подслоев отличаются от полученных в предыдущей итерации не более чем на 5 %.

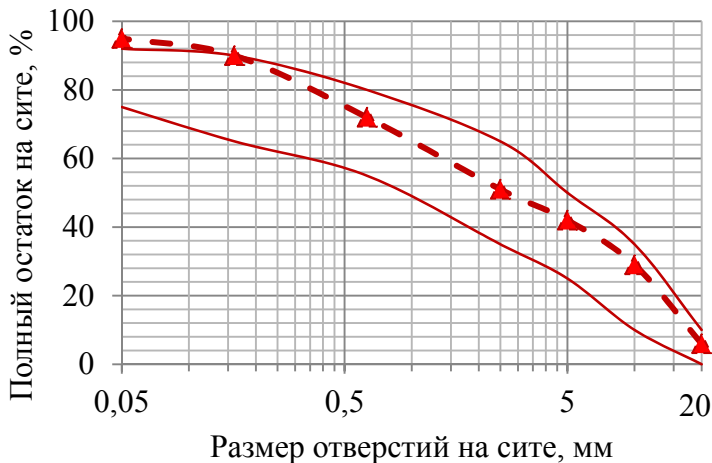


Рис. 3. Зерновой состав щебеночно-гравийно-песчаной смеси основания в границах смеси С2 [9]

Первый же цикл итераций, проведенный по этому алгоритму, показал, что значение активного напряжения сдвига в грунте значительно увеличилось. Для уменьшения и получения исходного его значения несколько раз интуитивно увеличивали толщину щебеночного слоя. При

толщине щебеночного слоя 41 см расчетные циклы завершили, так как исходные и полученные с учетом физической нелинейности значения активного напряжения сдвига сравнялись с точностью около 4 %.

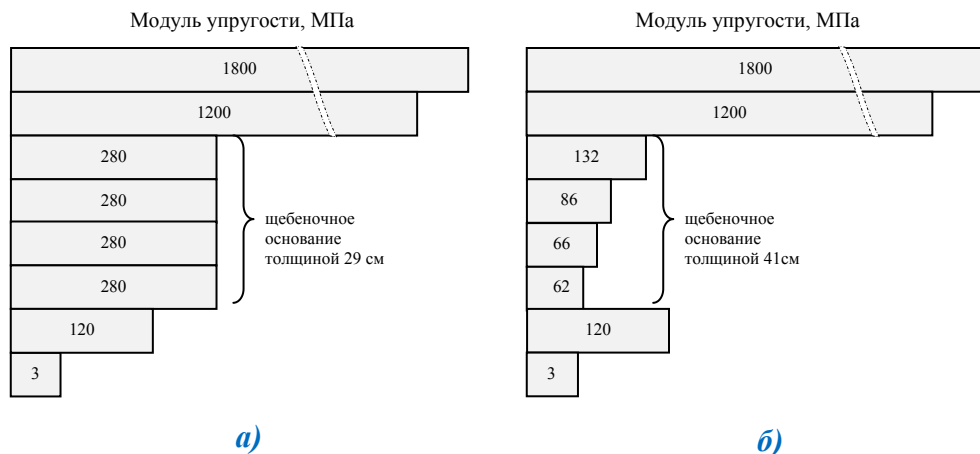


Рис. 4. Модули упругости слоев и подслоев исходной конструкции (а) и конструкции с учетом физической нелинейности щебеночно-гравийно-песчаной смеси основания (б)

На **рис. 4** показаны эпюры модулей упругости исходной конструкции в первой итерации первого цикла расчетов (толщина основания – 29 см) и конструкции, полученной с учетом физической нелинейности щебеночно-гравийно-песчаной смеси основания в последней итерации последнего цикла расчетов (толщина основания – 41 см).

Таким образом, учет физической нелинейности щебеночного основания показывает, что в определенных условиях для обеспечения сдвигоустойчивости грунтов земляного полотна не достаточно жесткости слоя, толщина которого определена по традиционной методике. В вышеприведенном примере толщина основания должна быть увеличена примерно в $41/29 = 1,4$ раза. Это означает, что срок службы дорожной одежды, рассчитанной по традиционной методике, будет примерно в 1,5 раза меньше запланированного.

Учет чувствительности механических свойств асфальтобетона к скорости движения автомобилей

Характерной особенностью автомобильных дорог городских агломераций является наличие участков, на которых наблюдаются систе-

матические замедления или полные остановки потоков автомобилей. Асфальтобетонные слои дорожной одежды на этих участках нагружаются многократно циклами различной продолжительности. На протяжении срока службы дорожной одежды встречаются серии циклов не только продолжительностью 0,1 с, но и серии с периодами в десятки или сотни раз больше. Анализ вышеописанных участков указывает на низкую их долговечность [12]. На примере дорожной одежды (табл. 2) покажем, как учет чувствительности механических свойств асфальтобетона к скорости движения автомобилей приводит к более долговечным конструкциям.

Таблица 2

Конструкция дорожной одежды, выбранной для анализа

<i>Конструктивный слой</i>	<i>Материал слоя</i>	<i>Толщина слоя, см</i>
<i>Слой покрытия</i>	Асфальтобетон плотный на битуме БНД марки 60/90	4
<i>Слой покрытия</i>	Асфальтобетон пористый на битуме БНД марки 60/90	8
<i>Слой основания</i>	Асфальтобетон высокопористый на битуме БНД марки 60/90	22
<i>Слой основания</i>	Щебеночно-гравийно-песчаная смесь, обработанная цементом, М20	26
<i>Слой грунта</i>	Супесь пылеватая $W_o = 0,7WT$	

С увеличением длительности действия нагрузки уменьшается модуль упругости асфальтобетона, в том числе верхнего слоя основания (табл. 2). Это приводит к уменьшению максимальных горизонтальных растягивающих напряжений верхнего слоя основания (табл. 2). При этом уменьшаются значения его прочности на растяжение при изгибе (табл. 3).

На рис. 5 показано, что прочность на растяжение при изгибе при увеличении длительности действия нагрузки уменьшается быстрее, чем максимальные горизонтальные растягивающие напряжения. Именно по этой причине происходит преждевременное появление усталостных трещин на участках, где многократно замедляется движение тяжелых транспортных средств.

Расчетные характеристики высокопористого асфальтобетона на битуме БНД марки 60/90 при различной длительности действия нагрузки

Расчетные характеристики	Длительность действия нагрузки, с			
	0,1	1,0	10,0	600,0
Модуль упругости, МПа	2100	1510	1050	510
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	5,65	3,18	1,79	0,64

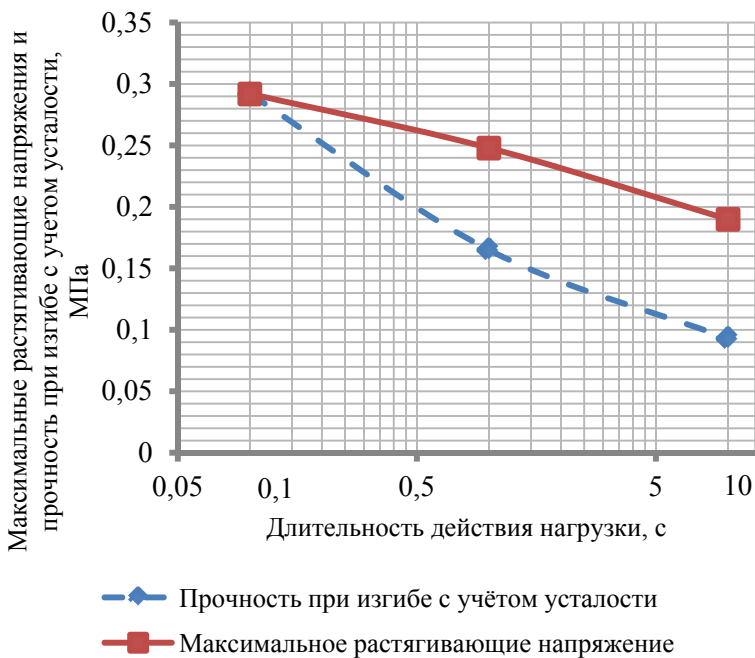


Рис. 5. Тенденция изменения максимальных растягивающих напряжений и прочности при увеличении длительности действия нагрузки

Таким образом, установлено следующее:

- на участках автомобильных дорог, на которых появляются заторы, дорожные одежды следует проектировать с учетом расчетных характеристик асфальтобетона, полученных при длительности действия нагрузки более 0,1 с;
- при конструировании нижние слои покрытия или верхние слои основания следует назначать из асфальтобетона, имеющего повышенную прочность и устойчивость к повторным нагрузкам (пористый, плотный, высокоплотный или дисперсно-армированный асфальтобетон);
- нижний слой основания желательно устраивать из материалов, обработанных неорганическим вяжущим [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Isotal J. Seasonal Truck – Load Restrictions and Road Maintenance in Countries with Cold Climate – Infrastructure Notes: Transportation, Water and Urban development Department, 1993 / The World Bank. Transport No. RD-14 FHWA (1990) Federal Highway Administration. Spring Load Restriction, Pavement Newsletter No 17, US Department of Transportation.*
2. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. – М.: Инфотраст, 2001. – 144 с.
3. *Berg L.R. Resilient Modulus Testing of Materials from Mn/ROAD, Phase 1 / L.R. Berg, R.S. Bigl, A.J. Stark, G.D. Durell. – MN/RC-96/21, Final Report. – September 1996. – 99 p.*
4. *Кривисский А.М. Новые схемы для расчета нежестких дорожных одежд / А.М. Кривисский. – М.: Автотрансиздат, 1961. – 79 с.*
5. *Hicks R. G. Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials / R.G. Hicks, C.L. Monismith // Highway Research Record. – 1971. – No 345. – PP. 15-31.*
6. *Witczak M.W. The Universal Airport Pavement Design System: Granular Material Characterization / M.W. Witczak, J. Uzan / University of Maryland, Department of Civil Engineering, MD. – 1988. – 79 P.*
7. *Мерзликун А.Е. Асфальтобетон на щебеночном основании / А.Е. Мерзликун // Автомобильные дороги. – 2015. – № 5. – С. 10-11.*
8. *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Software Version 0.910 User's Guide: Appendix D: User's Guide-Design Guide Software and Design Examples, 2002.*

9. ГОСТ 25607-2009. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2010. – 9 с.
10. Xiao Y. Best Value Granular Material for Road Foundations / Y. Xiao, E. Tutemluer. – Final Report, Department of Civil & Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. – 2012. – 167 p.
11. Приварников А.К. Упругие многослойные основания / А.К. Приварников, В.Д. Ламзюк / Днепронетровский университет. – Днепронетровск, 1985. – 162 с. – Деп. в ВИНТИ 23.12.85, №8789 – В. – Ч. 1. – 165 с.
12. Мерзликін А.Е. Как заторы влияют на долговечность покрытий / А.Е. Мерзликін, И.И. Капанадзе, В.В. Мозговой // Автомобильные дороги. – 2016. – № 4. – С. 50-53.
13. ОДМ 218.2.065-2015. Методические рекомендации по увеличению межремонтных сроков службы нежестких дорожных одежд. – М.: Информавтодор, 2016. – 59 с.

L I T E R A T U R A

1. Isotal J. Seasonal Truck – Load Restrictions and Road Maintenance in Countries with Cold Climate – Infrastructure Notes: Transportation, Water and Urban development Department, 1993 / The World Bank. Transport No. RD-14 FHWA (1990) Federal Highway Administration. Spring Load Restriction, Pavement Newsletter No 17, US Department of Transportation.
2. ODN 218.046-01. Proektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd. – М.: Informavtodor, 2001. – 144 s.
3. Berg L.R. Resilient Modulus Testing of Materials from Mn/ROAD, Phase I / L.R. Berg, R.S. Bigl, A.J. Stark, G.D. Durell. – MN/RC-96/21, Final Report. – September 1996. – 99 p.
4. Krivisskij A.M. Novye shemy dlja rascheta nezhestkih dorozhnyh odezhd / A.M. Krivisskij. – М.: Avtotransizdat, 1961. – 79 s.
5. Hicks R. G. Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials / R.G. Hicks, C.L. Monismith // Highway Research Record. – 1971. – No 345. – PP. 15-31.
6. Witczak M.W. The Universal Airport Pavement Design System: Granular Material Characterization / M.W. Witczak, J. Uzan / University of Maryland, Department of Civil Engineering, MD. – 1988. – 79 P.
7. Merzlikin A.E. Asfal'tobeton na shhebenochnom osnovanii / A.E. Merzlikin // Avtomobil'nye dorogi. – 2015. – # 5. – С. 10-11.

8. *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Software Version 0.910 User's Guide: Appendix D: User's Guide-Design Guide Software and Design Examples*, 2002.
9. *GOST 25607-2009. Smesi shhebenochno-gravijno-peschanye dlja pokrytij i osnovanij avtomobil'nyh dorog i ajerodromov.* – M.: FGUP «Standartinform», 2010. – 9 s.
10. *Xiao Y. Best Value Granular Material for Road Foundations / Y. Xiao, E. Tutemluer.* – Final Report, Department of Civil & Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. – 2012. – 167 p.
11. *Privarnikov A.K. Uprugie mnogoslujnye osnovanija / A.K. Privarnikov, V.D. Lamzjuk / Dnepropetrovskij universitet.* – Dnepropetrovsk, 1985. – 162 s. – Dep. v VINITI 23.12.85, #8789 – V. – Ch. 1. – 165 s.
12. *Merzlikin A.E. Kak zatory vlijajut na dolgovechnost' pokrytij / A.E. Merzlikin, I.I. Kapanadze, V.V. Mozgovoj // Avtomobil'nye dorogi.* – 2016. – # 4. – C. 50-53.
13. *ODM 218.2.065-2015. Metodicheskie rekomendacii po uvelicheniju mezhremontnyh srokov sluzhby nezhestkih dorozhnyh odezhd.* – M.: Informavtodor, 2016. – 59 s.

***FLEXIBLE ROAD PAVEMENTS SERVICE LIFE EXTENSION
WHEN DESIGNING: TRIVIAL AND NONTRIVIAL METHODS***

*Ph. D. (Tech.) A.E. Merzlikin,
Engineer Y.N. Korchazhnikov
(FAI «ROSDORNII»)*

Contact information: merzlikin07@gmail.com

Three methods of flexible road pavements service life extension when designing are described. Firstly, it is shown how the prediction of the subgrade spring thawing period affects the road pavement service life. It is recommended to introduce thawed and non-thawed parts of the subgrade into the design scheme of road pavements. Secondly, it is shown that ignoring the physical nonlinearity of crushed stone-gravel-sand materials under certain conditions can lead to a service life decrease of road pavements by factor of about 2 times. Thirdly, it is shown that at road sections, where congestions occurring, road pavements should be designed with taking into account the design characteristics of asphalt concrete, determined while the duration of load is more than 0.1 s. When constructing road pavements, the subbase

course or base course should be designated from porous, dense, high-density or dispersed-reinforced asphalt concretes.

Key words: *subgrade spring thawing, road pavement design scheme, physical nonlinearity, granular material, congestion.*

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В.Н. Ефименко
(Томский государственный архитектурно-строительный университет).

Статья поступила в редакцию: 02.04.2018 г.