Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <http://t-s.today/>

2015, Том 2, №4 / 2015, Vol 2, No 4 <http://t-s.today/issues/vol2-no4.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/03TS415.pdf>

DOI: 10.15862/03TS415 (<http://dx.doi.org/10.15862/03TS415>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Углова Е.В., Тиратурян А.Н. Оценка влияния толщин слоев нежестких дорожных одежд на их напряженно-деформированное состояние // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 2, №4 (2015)
<http://t-s.today/PDF/03TS415.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Uglova E.V., Tiraturjan A.N. [Assessment of the layer thicknesses impact for non-rigid pavements on their stress-strain behavior] Russian journal of transport engineering, 2015, Vol. 2, no. 4. Available at:
<http://t-s.today/PDF/03TS415.pdf> (In Russ.)

УДК 625.73

Углова Евгения Владимировна

ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», Россия, Ростов-на-Дону¹

Заведующая кафедрой

Доктор технических наук, профессор

E-mail: Uglova.ev@yandex.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=456806

Тиратурян Артем Николаевич

ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», Россия, Ростов-на-Дону

Старший научный сотрудник

Кандидат технических наук

E-mail: tiraturjan@list.ru

Оценка влияния толщин слоев нежестких дорожных одежд на их напряженно-деформированное состояние

Аннотация. В статье приведен анализ влияния толщин слоев нежестких дорожных конструкций в пределах строительных допусков на напряженно-деформированное состояние нежесткой дорожной одежды. При этом рассматриваются требования и допустимые погрешности толщин слоев, регламентированные нормативными документами СНиП 3.06.03-84 «Автомобильные дороги» (действовавшем по 2012 год включительно) и СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги» (введен в действие с 2013 года).

Для моделирования напряженно-деформированного состояния нежестких дорожных в рамках проведенных исследований, применялся программный комплекс MNLayer, реализующий точное решение теории упругости для расчета напряженно-деформированного состояния многослойной среды и позволяющий осуществлять расчет всех его компонентов при воздействии равномерно распределенной статической нагрузки. Полученные в ходе проведенных численных исследований результаты позволили сделать вывод, о том что неоднородность по толщине слоев нежестких дорожных одежд, находящаяся в пределах допускаемых СНиП 3.06.03-85 серьезно влияет на картину ее напряженно-деформированного состояния. Ужесточение требований к толщине слоев нежестких дорожных одежд, реализованное в СП 78.13330.2012 позволяет в значительной степени уменьшить влияние вариации толщин слоев дорожной одежды на ее напряженно-деформированное состояние.

¹ 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162

Ключевые слова: автомобильная дорога; нежесткие дорожные одежды; неоднородность; коэффициент вариации; напряженно-деформированное состояние; допуски; напряжения

Одной из наиболее актуальных и злободневных проблем дорожной отрасли является обеспечение долговечности нежестких дорожных одежд. Это связано с тем, что дорожная одежда воспринимает на себя все нагрузки от интенсивного транспортного потока, а также негативное воздействие природно-климатических факторов, являясь при этом самым дорогим и ответственным элементом автомобильной дороги.

Пожалуй, основным показателем, характеризующим состояние дорожной одежды, является ее несущая способность, характеризуемая общим модулем упругости нежесткой дорожной одежды. При этом следует отметить, что если еще недавно для оценки общего модуля упругости дорожной одежды применялся в основном только длиннобазовый рычажный прогибомер, характеризующийся достаточно низкой производительностью измерений, то уже сейчас при оценке прочности нежестких дорожных одежд используются высокопроизводительные установки FWD (рисунок 1) [1-3].

Безусловно производительность установки FWD, позволяющая обследовать порядка 40 км/смену открывает новые возможности для анализа данных о прочности и несущей способности эксплуатируемых дорожных одежд. И здесь на первый план наряду со значением общего модуля упругости дорожной одежды выходит такой показатель как его однородность [4-6].

Рисунок 1. Установка для оценки прочности нежесткой дорожной одежды FWD Primax 1500
Figure 1. Plant for assessment of the non-rigid pavements FWD Primax 1500 strength

Данная установка была применена на участке автомобильной дороги М4 «ДОН» при проведении работ по оценке состояния нежесткой дорожной конструкции на обследованном участке. Регистрация общего модуля упругости дорожной одежды на обследованном участке осуществлялась с интервалом 100 м.

Как видно из рисунка 2 при достаточно высокой несущей способности дорожной одежды на обследованном участке (среднее значение модуля упругости составляет $E_{общ}=728 \text{ МПа}^2$) автомобильной дороги четко видна неоднородность значений общих модулей упругости, характеризуемая коэффициентом вариации $C_v=0.21$.

² Испытания проводились при температуре покрытия дорожной одежды $t=5^\circ\text{C}$.

Рисунок 2. Общий модуль упругости нежесткой дорожной одежды на эксплуатируемом участке автомобильной дороги М-4 «ДОН», зарегистрированный с использованием установки ударного нагружения FWD

Figure 2. Generic modulus of elasticity for the non-rigid pavements on the operated auto-road section M-4 "DON" registered with the use of a shock loading plant FWD

Несомненно, различные значения модулей упругости слоев нежестких дорожных одежд могут быть связаны с различными факторами, такими как влажность грунта, неравномерность уплотнения слоя грунта земляного полотна и щебеночного основания, неоднородность асфальтобетонной смеси. Однако не следует выпускать из внимания и факт влияния толщин слоев дорожной одежды, которые также могут различаться в пределах допусков установленных СНиП 3.06.03-84 «Автомобильные дороги» (действовавшем по 2012 год включительно) и СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги» (введен в действие с 2013 года).

Так в соответствии со СНиП 3.05.03-84 при устройстве слоев покрытия, и основания допускается следующая погрешность:

для слоев асфальтобетонных покрытий и оснований:

Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 15 до 20 мм, остальные — до ± 10 мм.

для всех остальных типов покрытий и оснований:

Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений в пределах от минус 22 (минус 15) до 30 (20) мм, остальные — до ± 15 (10) мм.

В нормативном документе СП 78.13330.2012 были ужесточены требования по толщине устраиваемых слоев дорожных одежд:

для слоев асфальтобетонных покрытий и оснований:

Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до $\pm 10\%$, остальные до $\pm 5\%$ ($\pm 10\%$).

для всех остальных типов покрытий и оснований:

Не более 10% результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до $\pm 10\%$, но не более ± 20 мм остальные до $\pm 7\%$ но не более ± 15 мм.

Важно отметить, что различия в толщине слоев дорожной одежды оказывают непосредственное влияние и на картину напряженно-деформированного состояния нежесткой дорожной одежды. Для оценки влияния изменения толщин слоев дорожной одежды в пределах допустимых значений проведем моделирование ее напряженно-деформированного состояния для следующих случаев.

1. Толщина слоев дорожной одежды полностью соответствует проектным значениям.
2. Толщина слоев дорожной одежды уменьшена в пределах допуска по СНиП 3.06.03-84.
3. Толщина слоев дорожной одежды уменьшена в пределах допуска по СП 78.13330.2012.

Для моделирования напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции использовалась программа MnLayer, разработанная в техническом университете г. Миннесота, реализующем решение задачи теории упругости об определении основных компонент напряжений, деформаций и перемещений в многослойной среде под воздействием статической нагрузки [7, 8].

В качестве проектной рассматривалась конструкция, приведенная в таблице 1.

Таблица 1

Проектная конструкция дорожной одежды на участке реконструируемой дороги

Table 1

Design construction of pavement on the reconstruction road section

Наименование конструктивного слоя	Модуль упругости, МПа	Проектная толщина слоя, см	Толщина слоя, см (допуски по СНиП 3.06.03-85)	Толщина слоя, см (допуски по СП 78.13330.2012)
Щебеночно-мастичный асфальтобетон	$E_1 = 3200$	5	4	4.75
Асфальтобетон плотный из горячей крупнозернистой щебеночной смеси I марки	$E_2 = 3200$	7	6	6.65
Асфальтобетон пористый из горячей крупнозернистой щебеночной смеси I марки	$E_1 = 2000$	8	7	7.60
Крупнозернистая органоминеральная смесь	$E_2 = 700$	9	8	8.55
Оптимальная смесь из активных материалов с максимальной крупностью зерен до 40 мм	$E_3 = 480$	20	18.5	18.6
Гравийно - песчаная смесь С6, ГОСТ 25607 - 2009	$E_4 = 200$	35	33.5	32.55
Грунт земляного полотна – суглинок тяжелый	$E_5 = 41$	∞	∞	∞

При анализе напряженно-деформированного состояния нежесткой дорожной конструкции рассматривались следующие критические напряжения и деформации [9, 10]:

- Растягивающие напряжения и относительные деформации на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев (σ_{xx} , ϵ_{xx});
- Сжимающие напряжения на поверхности слоя основания (σ_{zz});
- Сжимающие напряжения на поверхности грунта земляного полотна (σ_{zz});
- Вертикальные перемещения на поверхности слоя асфальтобетона (U_z).

Таблица 2

Напряжения в проектной конструкции нежесткой дорожной одежды

Table 2

Stresses in the design construction of the non-rigid pavement

Расстояние от поверхности дорожной одежды до точек наблюдения, см	σ_{xx} , МПа	σ_{yy} , МПа	σ_{zz} , МПа	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{zz}	U_z , мм
Поверхность покрытия	-1.05E+00	-1.05E+00	-6.90E-01	-1.64E-04	-1.64E-04	-1.94E-05	4.81E-01
Нижняя граница пакета а/б слоев	2.83E-01	2.83E-01	-1.95E-01	1.26E-04	1.26E-04	-1.97E-04	6.88E-01
Поверхность слоя основания	3.31E-02	3.31E-02	-1.93E-01	1.27E-04	1.27E-04	-3.08E-04	6.87E-01
Поверхность грунта земляного полотна	1.15E-03	1.15E-03	-8.75E-03	9.28E-05	9.28E-05	-2.33E-04	5.85E-01

Таблица 3

Напряжения в проектной конструкции нежесткой дорожной одежды
(допуски по СНиП 3.06.03-85)

Table 3

Stresses in the design construction of the non-rigid pavement
(tolerances according to SNiP 3.06.03-85)

Расстояние от поверхности дорожной одежды до точек наблюдения, см	σ_{xx} , МПа	σ_{yy} , МПа	σ_{zz} , МПа	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{zz}	U_z , мм
Поверхность покрытия	-1.16E+00	-1.16E+00	-6.90E-01	-1.89E-04	-1.89E-04	2.08E-06	5.29E-01
Нижняя граница пакета а/б слоев	3.62E-01	3.62E-01	-2.31E-01	1.58E-04	1.58E-04	-2.42E-04	5.04E-01
Поверхность слоя основания	3.23E-02	3.23E-02	-2.37E-01	1.49E-04	1.49E-04	-3.71E-04	5.05E-01
Поверхность грунта земляного полотна	1.34E-03	1.34E-03	-1.05E-02	1.11E-04	1.11E-04	-2.79E-04	3.75E-01

Таблица 4

Напряжения в проектной конструкции нежесткой дорожной одежды
(допуски по СП 78.13330.2012)

Table 4

Stresses in the design construction of the non-rigid pavement
(tolerances according to SP 78.13330.2012)

Расстояние от поверхности дорожной одежды до точек наблюдения, см	σ_{xx} , МПа	σ_{yy} , МПа	σ_{zz} , МПа	ε_{xx}	ε_{yy}	ε_{zz}	U_z , мм
Поверхность покрытия	-1.08E+00	-1.08E+00	-6.90E-01	-1.71E-04	-1.71E-04	-1.34E-05	4.97E-01
Нижняя граница пакета а/б слоев	2.95E-01	2.95E-01	-2.07E-01	1.32E-04	1.32E-04	-2.07E-04	4.70E-01
Поверхность слоя основания	3.33E-02	3.33E-02	-2.04E-01	1.33E-04	1.33E-04	-3.25E-04	4.70E-01
Поверхность грунта земляного полотна	1.21E-03	1.21E-03	-9.34E-03	9.89E-05	9.89E-05	-2.48E-04	3.54E-01

Как видно из представленных таблиц при максимальном уменьшении толщины слоев дорожной одежды (находящихся в пределах допуска по СНиП 3.06.03-85) растягивающее напряжение на нижней границе пакета слоев асфальтобетона увеличивается на 22%, а относительная деформация растяжения на 20%. Аналогично и сжимающие напряжения на поверхности слоев основания и грунта земляного полотна увеличиваются на 17% по сравнению со значениями напряжений, рассчитанных для проектной конструкции. Максимальное отличие между значениями напряжений и деформаций, рассчитанных для проектной дорожной конструкции и конструкции с толщинами, уменьшенными в соответствии с СП 78.13330.2012 не превышает 6%.

Полученные результаты подтверждают, что неоднородность по толщине слоев нежестких дорожных одежд, находящаяся в пределах допускаемых СНиП 3.06.03-85 серьезно влияет на картину ее напряженно-деформированного состояния. Ужесточение требований к толщине слоев нежестких дорожных одежд, реализованное в СП 78.13330.2012 позволяет в значительной степени уменьшить влияние вариации толщин слоев дорожной одежды на ее напряженно-деформированное состояние.

ВЫВОДЫ:

- Проведена экспериментальная оценка состояния нежесткой дорожной конструкции на участке автомобильной дороги М4 «ДОН» с использованием установки динамического нагружения FWD Primax 1500. Выявлен значительный разброс значений общих модулей упругости дорожной одежды на обследованном участке. Коэффициент вариации составляет $C_v=0.21$.
- С использованием программного комплекса MNLayer проведен анализ напряженно-деформированного состояния нежестких дорожных конструкций при условии уменьшения их толщин в пределах допусков, регламентируемых нормативными документами СНиП 3.06.03-85 «Автомобильные дороги» и СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги».
- При максимальном уменьшении толщины слоев дорожной одежды (находящихся в пределах допуска по СНиП 3.06.03-85) растягивающее напряжение на нижней

границе пакета слоев асфальтобетона увеличивается на 22%, а относительная деформация растяжения на 20%. Аналогично и сжимающие напряжения на поверхности слоев основания и грунта земляного полотна увеличиваются на 17% по сравнению со значениями напряжений, рассчитанных для проектной конструкции. Максимальное отличие между значениями напряжений и деформаций, рассчитанных для проектной дорожной конструкции и конструкции с толщинами, уменьшенными в соответствии с СП 78.13330.2012 не превышает 6%.

- Выявленный в рамках проведенного моделирования вклад неоднородности толщин жестких дорожных одежд в изменение напряженно-деформированного состояния жесткой дорожной конструкции может найти отражение в рамках разработки вероятностных моделей прогнозирования срока службы дорожных конструкций и их остаточного ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Horak, E. Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations / E. Horak - Pretoria: University of Pretoria, 2006. - 16 p.
2. Hurtgen H. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik. Zum viskoelastischen und viskoplastischen Verhalten von Asphalt. / H. Hurtgen. Heft 361 - 1982.
3. Углова Е.В., Тиратурян А.Н. Оценка прочности нежестких дорожных одежд. Опыт применения установки динамического нагружения FWD Primax на участках автомобильной дороги М-4 «ДОН» // Дорожная держава. - 2014. - №57. - С. 55-60.
4. Кокодеева Н.Е. Методологические основы комплексной оценки надежности автомобильных дорог в системе технического регулирования дорожного хозяйства: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.11 / Кокодеева Наталья Евсигнеевна / ГОУВПО "Петербургский государственный университет путей сообщения". - СПб. - 2012. - 322 с.
5. Столяров В.В., Зверкова Е.Е., Фомина А.С. Оценка надежности нежестких дорожных одежд на основе законов распределения общих модулей упругости // Дороги и мосты. 2014. №30. С. 153-174.
6. Углова Е.В., Тиратурян А.Н. Исследование однородности и прочности нежесткой дорожной конструкции с использованием установки динамического нагружения FWD // Дороги и мосты. - 2015. - №33. - С. 163-174.
7. Lev Khazanovich, Qiang Wang MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board> List of Issues> Volume 2037> DOI: 10.3141/2037-06.
8. Burmister, D.M. Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Application to the Design of Airport Runways. Highway Research Board Proceedings, Vol. 23, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1943, pp. 126-144.
9. Huang, Y.H. Pavement Analysis and Design, 2nd ed. Pearson Education, Upper Saddle River, N.J., 2004.
10. Chadbourn, B., S. Dai, P. Davich, J. Siekmeier, and D. Van Deusen Pavement Designer's Guide for MnDOT Flexible Pavement Design. Office of Materials and Road Research, Minnesota Department of Transportation, Minneapolis, 2002.

Uglova Evgeniya Vladimirovna

Rostov State University of civil engineering, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: Uglova.ev@yandex.ru

Tiraturjan Artem Nicolaevich

Rostov State University of civil engineering, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: Tiraturjan@list.ru

Assessment of the layer thicknesses impact for non-rigid pavements on their stress-strain behavior

Abstract. The article presents analysis of the layer thickness impact for the non-rigid pavement structures within construction tolerances on the stress-strain behavior of non-rigid pavement. Herewith it considers the requirements and the permissible tolerances of layer thicknesses regulated by the normative documents SNiP (Construction Standards and Regulations) 3.06.03-84 "Roadway Network" (which was in force through 2012) and SP (Construction Regulations) 78.13330.2012 "Roadway Network" (effective 2013).

To model the stress-strain behavior of non-rigid pavements in the framework of the conducted research we used a program complex MNLayer that implements the accurate solution of elasticity theory to calculate the stress-strain behavior of a multilayered medium and allows you to carry out calculation of all its components under the influence of the uniformly distributed static load. The results obtained in the course of the numerical investigations gave us the chance to conclude that the through-the-thickness heterogeneity of the non-rigid pavement layers being within the permissible SNiP 3.06.03-85 has a serious impact on the picture of its stress-strain behavior. The requirement strengthening to the thickness of the non-rigid pavement layers implemented in the SP 78.13330.2012 makes it possible to reduce the influence of the layer thickness variations of the pavement on its stress-strain behavior to a large extent.

Keywords: auto-road; non-rigid pavements; heterogeneity; coefficient of variation; stress-strain behavior; tolerances; stresses

REFERENCES

1. Horak, E. Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations / E. Horak - Pretoria: University of Pretoria, 2006. - 16 p.
2. Hurtgen H. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik. Zum viskoelastischen und viskoplastischen Verhalten von Asphalt. / H. Hurtgen. Heft 361 - 1982.
3. Uglova E.V., Tiraturyan A.N. Otsenka prochnosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd. Opyt primeneniya ustanovki dinamicheskogo nagruzheniya FWD Primax na uchastkakh avtomobil'noy dorogi M-4 «DON» // Dorozhnaya derzhava. - 2014. - №57. - S. 55-60.
4. Kokodeeva N.E. Metodologicheskie osnovy kompleksnoy otsenki nadezhnosti avtomobil'nykh dorog v sisteme tekhnicheskogo regulirovaniya dorozhnogo khozyaystva: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.11 / Kokodeeva Natal'ya Evsigneevna / GOUVPO "Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya". - SPb. - 2012. - 322 s.
5. Stolyarov V.V., Zverkova E.E., Fomina A.S. Otsenka nadezhnosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd na osnove zakonov raspredeleniya obshchikh moduley uprugosti // Dorogi i mosty. 2014. №30. S. 153-174.
6. Uglova E.V., Tiraturyan A.N. Issledovanie odnorodnosti i prochnosti nezhestkoy dorozhnoy konstruktsii s ispol'zovaniem ustanovki dinamicheskogo nagruzheniya FWD // Dorogi i mosty . - 2015. - №33. - S. 163-174.
7. Lev Khazanovich, Qiang Wang MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board> List of Issues> Volume 2037> DOI: 10.3141/2037-06.
8. Burmister, D.M. Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Application to the Design of Airport Runways. Highway Research Board Proceedings, Vol. 23, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1943, pp. 126-144.
9. Huang, Y.H. Pavement Analysis and Design, 2nd ed. Pearson Education, Upper Saddle River, N.J., 2004.
10. Chadbourn, B., S. Dai, P. Davich, J. Siekmeier, and D. Van Deusen Pavement Designer's Guide for MnDOT Flexible Pavement Design. Office of Materials and Road Research, Minnesota Department of Transportation, Minneapolis, 2002.