

УДК 625.8

ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕЖЁСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ В СОВРЕМЕННОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ ПРАКТИКЕ

Арус Навар Набиль аспирант,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, 92nawararous@gmail.com,
Горячев Михаил Геннадьевич, д-р техн. наук, проф.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, kafedra_sed@mail.ru.

Аннотация. Современная методология проектирования нежестких дорожных одежд начала развиваться от простейших приёмов, основанных на эмпирических закономерностях. Довольно быстро международная практика проектирования перешла на использование полуэмпирических методов с различными базисными теоретическими моделями. Полуэмпирические методы многие десятилетия являются наиболее широко распространёнными и довольно хорошо апробированными. С учётом полученного опыта их применения в той или иной стране эти методы корректировались, но их теоретическая составляющая оставалась неизменной. Конкуренцию полуэмпирическим методам составляют механико-эмпирические модели, появившиеся несколько позднее и которые помимо расчёта позволяют также осуществлять прогнозирование показателей эксплуатационного состояния, т.е. проверять полученные инженерные решения на соответствие эксплуатационным нормативным требованиям норм или пожеланиям Заказчика.

Стало очевидным, что будущее проектирования дорожных одежд за механико-эмпирическими методами. Сдерживание их широкого внедрения связано с маркетинговой стоимостью, местным консерватизмом и недостаточной статистикой о точности прогнозирования эксплуатационных показателей. Но даже в тяжёлых экономических условиях, например, таких, как в Сирийской Арабской Республике переход на механико-эмпирические методы проектирования дорожных одежд обеспечит наибольшую эффективность инженерных решений.

Ключевые слова: проектирование нежестких дорожных одежд.

REVIEW AND ANALYSIS OF DESIGN METHODS FOR FLEXIBLE ROAD PAVEMENTS TO ASSESS THEIR EFFECTIVENESS IN MODERN INTERNATIONAL PRACTICE

Arous Navar Nabil, postgraduate,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, 92nawararous@gmail.com
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia,
Goryachev Mikhail G., Dr. Sc., professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, kafedra_sed@madi.ru.

Abstract. The modern methodology for designing flexible road pavements began to develop from the simplest techniques based on empirical laws. Quite quickly, international practice moved to the use of semi-empirical methods with various basic theoretical models. Semi-empirical methods have been the most widespread and fairly well tested for many decades. Taking into account the experience gained in their application in a particular country, these methods were corrected, but their theoretical component remained unchanged. Semi-empirical methods compete with mechanical-empirical models that appeared later, which, in addition to calculation, also make it possible to predict indicators of the operational state, allowing verification of engineering solutions for compliance with operational requirements, regulatory rules or customer wishes. It became clear that the future of pavement design would be with mechanical-empirical methods. Restraining their widespread adoption is associated with marketing value, local conservatism and insufficient statistics on the accuracy of forecasting performance indicators. But even in difficult economic conditions, for example, such as in the Syrian Arab Republic, the transition to mechanical-empirical methods of pavement design will provide the greatest efficiency of engineering solutions for flexible road pavements.

Key words: design of flexible road pavements.

Введение

Процесс проектирования нежёстких дорожных одежд является относительно сложным процессом. Проблематика обусловлена стохастической природой факторов влияния на работу конструкции: климатических условий, транспортных нагрузок, характеристик дорожно-строительных материалов и грунтов. Взаимное влияние данных факторов прогнозировать крайне затруднительно. Разработать универсальную математическую модель, которая смогла бы связать эти факторы и

позволила бы установить значения напряжений и деформаций, возникающих в слоях дорожной одежды с различным поведением, задача архисложная.

Большая часть различий известных математических моделей связана с отсутствием точного количественного описания механики разрушения материалов слоёв. Поэтому широкое распространение получили методы проектирования, носящие эмпирический характер.

Но, несмотря на все эти различия между методами проектирования, все они считаются в той или иной степени корректными с учётом области их ограничений и поэтому результаты, получаемые по ним, неправильно считать однозначно ошибочными [5, 10].

В США до 2008 г. при проектировании дорожных одежд использовался метод *AASHTO* (Американской ассоциацией государственных служащих автомобильных дорог и транспорта), изложенной во «Временном руководстве по разработке жёстких и нежёстких дорожных одежд», основу которого составляли материалы натуральных экспериментов, проведённых на экспериментальных участках с различными характеристиками слоёв дорожных одежд и параметрами транспортной нагрузки [4]. На основе статистической обработки натуральных исследований на построенных дорогах, а также материалов специальных экспериментов на опытных участках были выявлены зависимости между прочностью дорожных одежд и суммарным количеством приложенных нагрузок и составлены графики эквивалентных толщин дорожных одежд.

Проводимые исследования в разных странах дают неодинаковые, и даже противоречивые результаты. Объясняется это различием в методике испытаний, разнообразием применяемых материалов в дорожных одеждах и, конечно, особенностями климатических условий стран, в которых выполнялись опытные работы.

Современной и наиболее перспективной группой методов назначения конструкций нежестких дорожных одежд является механико-эмпирические методы (*МЭМ*), которые пришли на смену базовых решений из теории упругости. Лидерами в развитии данного подхода являются США.

Методы *МЭМ* являются по сути полуэмпирическими: при анализе напряжённого состояния дорожной одежды используются расчётные схемы и решения теории упругости, а также эмпирические зависимости между напряжениями и деформациями с одной стороны и параметрами внешней нагрузки (величиной и количеством приложений) – с другой стороны. Особенностью проектирования нежестких дорожных одежд с применением данной группы методов является назначение критериев эксплуатационных характеристик на конец расчётного срока службы.

Основная часть

В период с 1954 по 1969 гг. «Институт асфальтобетона» опубликовал восемь изданий руководств по эмпирическому расчёту толщины дорожных одежд. В 1991 г. был опубликован девятый выпуск, который был основан на механико-экспериментальной методологии. В этой методике проектирования дорожная одежда рассматривается как многослойная упругая система. Материалы в каждом слое характеризуются модулем упругости и коэффициентом Пуассона. Транспортное воздействие выражается через общее количество повторений эквивалентной нагрузки на одну ось 80 кН (18000 фунтов), приложенной к дорожному покрытию на двух наборах сдвоенных шин [3].

Метод «Института асфальтобетона» используется для проектирования нежестких дорожных одежд, включающих слои из асфальтобетона и щебёночных (гравийных) материалов, в том числе обработанных органическими вяжущими. Данный подход является единственным, при котором возможно проектировать дорожную одежду

только из асфальтобетонных смесей по всей толщине. К недостаткам метода следует отнести отсутствие апробации для холодных территорий. Кроме того, при расчёте устанавливается общая толщина асфальтобетона, а вот выбор видов асфальтобетона для набора слоёв остаётся на усмотрение проектировщика, хотя характеристики асфальтобетонов могут существенно различаться. Метод считается довольно популярным, хотя и в меньшей степени, чем метод *AASHTO* и имеется опыт его применения [12].

Российский метод проектирования нежестких дорожных одежд — это процесс конструирования и расчёта системы «дорожная одежда — рабочий слой земляного полотна» на прочность, морозоустойчивость и осушение с технико-экономическим обоснованием вариантов с целью выбора наиболее экономичного в данных условиях. При расчёте дорожных одежд используют решения теории упругости для слоистого полупространства, лежащего на упругом основании с учётом сцепления слоёв на границе контакта.

Главным аргументом функции требуемого модуля упругости дорожной одежды E_{mp} является суммарное количество приложений расчётной нагрузки $\sum N_p$ [1]:

$$E_{mp} = k_p \cdot 98,65 \cdot (\lg \sum N_p - c), \text{ Мпа,}$$

где k_p — подкоренное отношение расчётного контактного давления к нормативному контактному давлению для осевой нагрузки 10 т; данный множитель был введён в результате ошибочных умозаключений о влиянии величины расчётной нагрузки на методику расчёта;

c — эмпирический параметр.

Следует отметить, что в российском методе количество параметров и характеристик, задействованных в процессе проектирования, довольно велико и охватывает большинство факторов, влияющих на конечный результат. Также стоит отметить, что все параметры специфичны для

условий регионов Российской Федерации и поэтому не могут применяться напрямую к другим условиям. По своей сути российская методика может быть отнесена к *МЭМ*. К сожалению, она слабо приспособлена для прогнозирования эксплуатационного состояния. В Сирии пока отсутствует опыт применения российского метода проектирования нежестких дорожных одежд.

Методологически родственным российскому методу является экспериментальный метод *RStO12*, используемый в Германии, разработанный Ассоциацией автомобильных дорог и транспорта.

Суммарное количество приложений расчётной нагрузки массой 10 т рассчитывается по следующей формуле [8]:

$$B = N \cdot EDTA^{(sv)} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365, \text{ ед.},$$

Где N – расчётный срок службы, годы;

$EDTA^{(sv)}$ – среднесуточный трафик для грузовых транспортных средств;

f_1 – коэффициент, зависящий от количества полос движения;

f_2 – коэффициент, зависящий от ширины полосы движения;

f_3 – коэффициент, учитывающий величину продольного уклона дороги;

f_z – показатель ежегодного прироста грузовых транспортных средств.

Обязательными правилами конструирования по методу *RStO12* является обеспечение модуля деформации на поверхности грунта земляного полотна не менее 45 МПа и на поверхности нижнего слоя основания не менее 120 МПа [8, 11].

Метод *RStO12* хорошо систематизирован и без особых затруднений позволяет определить типовую дорожную конструкцию. Однако он

экспериментальный и апробирован только для условий Германии. В Сирии отсутствует опыт проектирования по методу *RStO*.

Очень широкое распространение в мировой практике получил метод проектирования *AASHTO-93*, который был впервые опубликован в 1961 г. Данный метод был основан на обширных экспериментальных результатах крупнейших в истории дорожного строительства испытаний организации *AASHTO*, проведённых в период с 1958 по 1960 гг. возле г. Оттава (штат Иллинойс). Предпринята попытка учёта уровня надёжности проектных решений, дренажной способности зернистых материалов, оценивается снижение работоспособности дорожной одежды. Величина расчётной нагрузки составляет 8,2 т [2], что ниже расчётных нагрузок, принятых в странах Евразийского экономического союза и Европы [1, 8].

Уравнение для расчёта дорожных одежд в руководстве *AASHTO-93* выглядит следующим образом:

$$\lg(W_{18}) = Z_R \cdot S_o + 9,36 \cdot \lg(SN + 1) - 0,20 + \\ + \frac{\lg\left[\frac{(\Delta PSI)}{(4,2 - 1,5)}\right]}{0,4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \lg(M_r) - 8,07,$$

где W_{18} – суммарное количество приложений расчётной осевой нагрузки размером 18 тыс. фунтов (8,2 т) за расчётный срок службы дорожной одежды, ед.;

Z_R – коэффициент надёжности;

S_o – стандартное отклонение грузового трафика от среднего ожидаемого;

SN – общее структурное число (на поверхности дорожной одежды), которое определяется как сумма структурных чисел всех слоёв и грунта земляного полотна;

ΔPSI – снижение работоспособности;

M_r – модуль упругости грунта земляного полотна, фунт/кв. дюйм.

Используя данные о транспортном потоке, показателях R , ΔPSI , M_r по специальной номограмме определяется структурное число SN . Затем рассчитываются толщины слоёв дорожного покрытия с соблюдением следующего соотношения:

$$SN_{общ} \leq a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3,$$

где $SN_{общ}$ – общее структурное число для всей дорожной одежды (рассчитывается по специальным номограммам);

D_1 , D_2 , D_3 – соответственно толщины слоёв покрытия из асфальтобетона, слоя основания и дополнительного слоя основания, см;

m_2 , m_3 – коэффициенты дренирования неукрепленного слоя основания и дополнительного слоя основания.

Каждый слой дорожной одежды характеризуется модулем упругости, а поверхность слоёв – структурным числом (рис. 1). Структурные числа находят по номограмме. Толщина слоёв дорожной одежды рассчитывается по следующим уравнениям:

- для слоя покрытия $D_1 > \frac{SN_1}{a_1}$;
- для слоя основания $D_2 > \frac{SN_2 - a_1 \cdot D_1}{a_2 \cdot m_2}$;
- для дополнительного слоя основания

$$D_3 > \frac{SN_3 - a_1 \cdot D_1 - a_2 \cdot D_2 \cdot m_2}{a_3 \cdot m_3}.$$

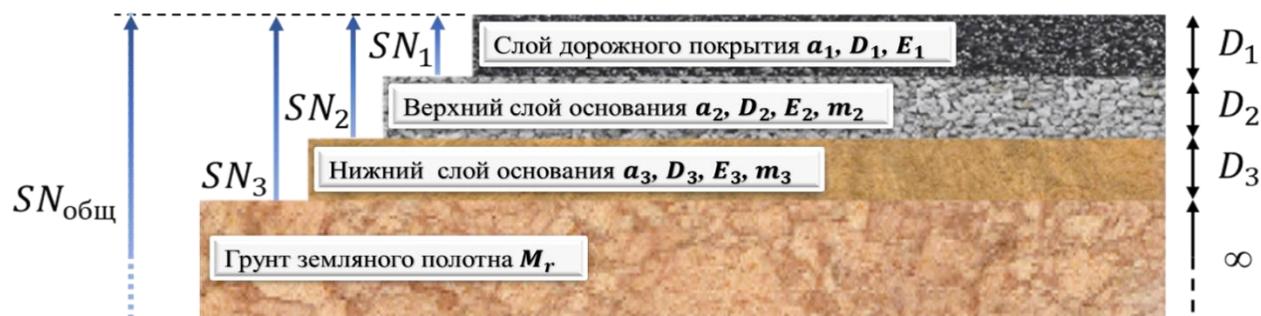


Рис. 1. Принципиальная расчётная схема дорожной одежды в методе AASHTO-93

Одним из основных недостатков метода AASHTO-93 является его достоверность в узких условиях эксплуатации, ограниченных только местом проведения экспериментальных исследований. Как и в методе «Института асфальтобетона» количество слоёв дорожной одежды ограничено тремя слоями, а уже при конструировании требуемая толщина слоя может быть разделена на более тонкие слои на усмотрение разработчика. Тем не менее, данный метод остаётся ведущим в странах Ближнего Востока.

В 2008 г. AASHTO выпустил временное издание механико-эмпирическое практическое руководство по проектированию дорожных одежд MEPDG. Выпущенное руководство было разработано в рамках проекта «Национальной программы совместных исследований автомобильных дорог (NCHRP)» и нескольких последующих проектов, в которых приняли участия многие агентства.

Новая методология проектирования дорожных одежд MEPDG включает задействование сразу нескольких сложных моделей и, следовательно, требует гораздо большего количества различных исходных данных, чем это предусмотрено в методе AASHTO-93. Основные исходные данные затрагивают трафик, характеристики материалов и климатические условия [7].

Метод MEPDG основан на итеративном процессе, в соответствии с которым проектировщик задаёт предварительную конструкцию дорожной одежды, а затем выполняют её проверку на соответствие заданным

показателям эксплуатационного состояния (продольной ровности, колеяности, проценту усталостных трещин) на конец расчётного срока службы. Происходит постепенный подбор толщин слоёв дорожной одежды в поиске наиболее технико-экономически выгодного их сочетания. Блок-схема алгоритма метода *MEPDG* показана на рис. 2 [9].

Одним из больших преимуществ метода *MEPDG* является комплексный подход к входным данным, который обеспечивает более реалистичное представление факторов, действующих на дорожную одежду. Одно из основных ограничений этого метода заключается в том, что для его реализации требуется очень дорогое программное обеспечение. В Сирии пока нет опыта внедрения метода *MEPDG*.

Проводя концептуальное сравнение рассмотренных методов проектирования нежестких дорожных одежд (таблица), можно сделать вывод, что российский метод и метод *MEPDG* являются наиболее полно учитывающими стохастические факторы условий эксплуатации [6].

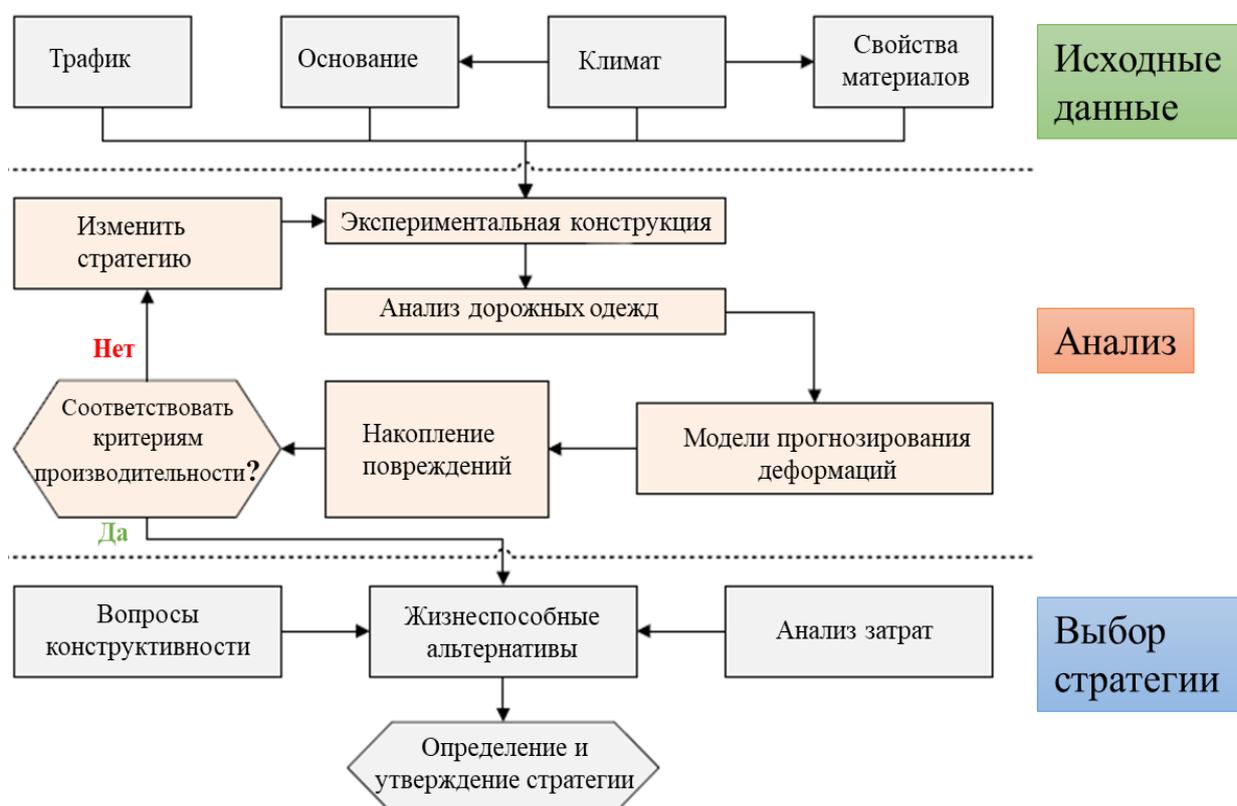


Рис. 2. Блок-схема проектирования нежестких дорожных одежд по методу *MEPDG* (NCHRP, 2004)

Таблица

Концептуальные различия и сравнение различных методов проектирования нежестких дорожных одежд

Параметры	Институт асфальтобетона	<i>RStO</i>	<i>AASHTO-93</i>	Российский метод	<i>MEPDG</i>
Трафик	Используется концепция <i>ESAL</i>	Да	Используется концепция <i>ESAL</i>	Да	Да
Климат	Да	Только мороз	Только для штата Иллинойс	Да	Да
Способность земляного полотна	Да	Нет	Да	Да	Да
Нелинейная характеристика несвязанного материала	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Модуль упругости горячего асфальтобетона	Нет	Нет	Нет	Да	Да
Модуль упругости несвязанного материала	Нет	Нет	Нет	Да	Да
Характеристики асфальта	Да	Нет	Нет	Да	Да
Прогноз деформаций	Нет	Нет	Нет	Да	Да
Уровень проектной надежности	Нет	Нет	Да	Да	Да
Почасовая информация об изменении климата (температура воздуха, осадки, скорость ветра, солнечная активность, относительная влажность)	Нет	Нет	Нет	Нет	Да

Заключение

Несмотря на значительную популярность полуэмпирических методов проектирования дорожных одежд, наиболее высокой степенью достоверности и качеством учёта условий эксплуатации автомобильных дорог обладают механико-эмпирические модели. Для разработки наиболее эффективных конструктивных решений, связанных с задачей

восстановления разрушенной в ходе войны транспортной сети Сирийской Арабской Республики, целесообразно осуществить переход на проектирование нежестких дорожных одежд по методу *MEPDG*.

Список литературы

1. Проектирование нежестких дорожных одежд. ОДН 218.046-01 / Министерство транспорта Российской Федерации. Государственная служба дорожного хозяйства. – М., 2001.
2. AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures // American Association of State Highway and Transportation Officials. – Washington, DC. – 1993.
3. Asphalt Institute, MS-1. Thickness Design: Full Depth Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets. //Asphalt Institute. – Lexington – 1970.
4. El-Badawy S.M. et al. Comparison of Idaho pavement design procedure with AASHTO 1993 and MEPDG methods //Transportation and Development Institute Congress 2011: Integrated Transportation and Development for a Better Tomorrow. – 2011. – С. 586-595.
5. Huang Y.H. Pavement analysis and design. 2nd edition. – 2004. С. 475-485.
6. Li Q. et al. Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view // Journal of Modern Transportation. – 2011. – №. 2. – С. 114-133.
7. Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. A Manual of Practice, American Association of State Highway and Transportation Officials executive committee, 2010. – 204 с.
8. Neuerungen im Vorschriftenwerk. RStO12. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe, 2012. – 48 с.
9. Olidis C., Hein D. Guide for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures materials characterization: Is your agency ready //2004 annual conference of the transportation association of Canada. – 2004.
10. Papagiannakis A. T., Masad E. A. Pavement design and materials. – John Wiley & Sons. – 2017. С. 363-370.
11. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen. RSTO 200. FORSCHUNG Gesellschaft für Strassen und VERKEHRWESEN. Ausgabe. BAST. – 2000.
12. Scherocman J.A. Pavement design by the asphalt institute method // Ohio Highway Engineering Conference Proceedings. – 1970. С. 111-115.

References

1. *Proektirovanie nezhyostkih dorozhnyh odezhd, ODN 218.046-01* (Design of flexible pavements, ODN 218.046-01), Moscow, 2001.
2. *Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASTHO*, Washington, DC, 1993.
3. *Asphalt Institute (MS-1). Thickness Design: Full Depth Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets*. Asphalt Institute, Lexington, 1970.
4. El-Badawy S. M. et al. Comparison of Idaho pavement design procedure with AASHTO 1993 and MEPDG methods. *Transportation and Development Institute Congress 2011, Integrated Transportation and Development for a Better Tomorrow*, 2011, pp.586-595.
5. Huang Y. H. *Pavement analysis and design. 2nd edition*, 2004, pp.475-485.
6. Li Q. et al. Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. *Journal of Modern Transportation*, 2011,19(2), pp.114-133.
7. Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. *A Manual of Practice, American Association of State Highway and Transportation Officials executive committee*, 2010, 204 p.
8. *Neuerungen im Vorschriftenwerk. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe, RStO12*, 2012, pp 48.
9. Olidis C., Hein D. Guide for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures materials characterization: Is your agency ready. *annual conference of the transportation association of Canada*, 2004.
10. Papagiannakis A. T., Masad E. A. *Pavement design and materials. John Wiley & Sons*, 2017, pp 363-370.
11. *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, RSTO 200. FORSCHUNG Gesellschaft für Strassen und VERKEHRWESEN, Ausgabe, BAST*, 2000.
12. Scherocman J. A. Pavement design by the asphalt institute method. *Ohio Highway Engineering Conference Proceedings*, 1970, pp111-115.

Рецензент: В.В. Ушаков, д-р техн. наук, проф. МАДИ