

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-5-25-30

***Горшкова Н.Г., Александров Д.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: nggor@yandex.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ МЕТОДОМ СТРУКТУРНЫХ ЧИСЕЛ

Аннотация. Дорожная одежда является одной из главных составляющих автомобильных дорог, её состояние обеспечивает безопасность и скорость дорожного движения. Современная дорожная одежда – это сложная инженерная конструкция, она состоит из поэтапно уложенных слоёв дорожно-строительных материалов, которые обладают различными физико-механическими свойствами. Эти свойства учитываются для обеспечения безопасного движения транспортных средств в любое время года с расчётной скоростью с предотвращением аварийных ситуаций и снижения удобства движения. Для расчета дорожных одежд существует несколько методов, одним из которых является метод структурных чисел. Проанализирована возможность его применения для конструирования и расчета дорожной одежды. В статье приведена возможность использования этого, достаточно простого метода, применяемого во многих странах, на конкретном примере. Поскольку в России активно переходят на проектирование составов асфальтобетонных смесей по методу Суперпейв, который позволяет повысить эксплуатационные характеристики дорожных покрытий, данный метод имеет преимущества при конструировании и расчете дорожных одежд, заключающиеся в простоте использования.

Ключевые слова: метод структурных чисел, конструирование дорожной одежды, методы расчета конструкций дорожных одежд, конструктивные слои.

Введение. За последние полвека создано большое количество разнообразных методов расчета дорожных одежд. У нас в стране был разработан и успешно применяется уже несколько десятилетий полуэмпирический метод, который включает оценку прочности конструкции в целом (с использованием эмпирической зависимости допускаемого упругого прогиба от числа приложений нагрузки) и оценку прочности с учетом напряжений, возникающих в отдельных конструктивных слоях и устанавливаемых с использованием решений теории упругости. Метод основан на расчетах и применении номограмм, построенных при решении задач теории упругости для модели многослойной среды. С учетом этих принципов разработаны специализированные программы расчета, позволяющие рассчитывать достаточно много вариантов конструкций дорожных одежд [1].

Основная часть. В мировой практике все методы можно разделить на две основные категории: аналитические и эмпирические. С помощью аналитических методов рассчитываются дорожные одежды, которые подвергаются нагрузкам более 10 млн эквивалентной нагрузки на одну ось (ESAL). Аналитические методы заключаются в анализе исходных данных, их интерпретации и преобразовании в значение нагрузочной пропускной способности дорожных одежд.

Эмпирические же методы применяются для дорожных одежд с низкой нагрузкой. Однако, если есть сомнения в том, что данная дорожная

одежда выдержит рассчитанную нагрузку, для проверки применяют аналитический метод. Чем более сложным является метод расчета, тем более повышенные требования предъявляются к исходным данным [2].

К эмпирическим методам относят:

- метод калифорнийского числа SBR, который основан на определении несущей способности земляного полотна;
- каталогизированный метод, который базируется на типовых конструкциях дорожных одежд, созданных для различных случаев применения;
- метод DCP, в котором для обнаружения дефектов в дорожной одежде используется динамический конусный пенетrometer;
- метод индексирования дорожных одежд, при котором дорожным одеждам разных конструкций назначается свой индекс, зависящий от структурного числа;
- метод структурных чисел, в котором разным типам материала присваиваются определенные (структурные) коэффициенты [3].

Также на территории большинства стран Европы и США широкое распространение получили каталоги дорожных одежд. Каталоги представляют собой сборник типовых дорожных одежд с уже подобранными и рассчитанными слоями, оптимально подходящими для данной местности. Каталоги позволяют экономить время при проектировании автомобильных дорог, т.к. все расчеты произведены заранее. В РФ

по заданию Росавтодора в настоящее время ведется разработка типовых каталогов дорожных одежд жесткого и нежесткого типов [4].

В настоящее время возросла необходимость совершенствования методики расчета дорожных одежд. Для решения данной проблемы более детально изучено и проанализировано динамическое воздействие многоосных транспортных средств [5], так как исследования напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции показывают, что основное разрушающее воздействие на автомобильную дорогу производят грузовые многоосные автопоезда, движение которых осуществляется с нагрузками, нередко превышающими нормативные.

Наибольший интерес представляет конструирование и расчет дорожной одежды методом структурных чисел, на конкретном примере расчета показана результативность данного метода (1 вариант) и сравнительный анализ с применяемым в настоящее время в РФ методом (вариант 2). Метод дополнен зависимостью структурного коэффициента грунта от модуля упругости последнего и корреляционной зависимостью основного параметра метода – «суммы структурных чисел» от требуемого модуля упругости дорожной конструкции.

Метод структурных чисел отличается от принятого в РФ метода проектирования нежестких дорожных одежд относительной простотой

[6], он применяется в США с 1993 г. ассоциацией AASHTO. Метод структурных чисел активно используют в большинстве стран мира, т.к. он имеет ряд преимуществ: простота использования, быстрота получения результатов и возможность учета влияния климатических особенностей на поведение и характеристики материала, а также он позволяет без труда вводить в расчет новые материалы. Как и у всех «шаблонных» расчетов, надежность результатов здесь зависит от точности исходных параметров. Первым шагом, который определяет надежность расчета, является выбор для каждого слоя коэффициента, зависящего от его материала.

Метод заключается в том, что каждому виду материала, применяемого в дорожной одежде, присваивается определенный коэффициент K_c . Сумма произведений этих коэффициентов на толщину используемого слоя характеризует несущую способность дорожной конструкции. Так, структурные коэффициенты – аналоги значений модуля упругости, а сумма структурных чисел – аналог общего расчетного модуля упругости конструкции в соответствии с методикой, применяемой в настоящее время в РФ и описанной в ОДН [7] по нормативам СП [8]. Коэффициенты K_c конструктивных слоев из различных материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты конструктивных слоев из различных материалов

Тип материала	Значение K_c , см ⁻¹
Асфальтобетон плотный для верхнего слоя покрытия	0,173
То же, для нижнего слоя покрытия	0,165
Асфальтобетон пористый	от 0,079 до 0,150
Старый асфальтобетон	0,087
Щебень (CBR > 80 %)	0,055
Щебень старого основания	0,047
Щебень, укрепленный цементом	0,067
Природный гравий типа 1	0,047
Природный гравий типа 2	0,039
Грунт типа 1	0,031
Грунт типа 2	0,024
Гравий, укрепленный цементом	0,047
Песок	от 0,015 до 0,02
АГБ типа К (с добавлением комплексного вяжущего)	0,102

Чтобы конструкция удовлетворяла необходимым требованиям, нужно, чтобы сумма структурных чисел $\sum c$ была равна или больше расчетной суммы $\sum c_p$, зависящей от суммарного расчетного числа приложений расчетной нагрузки за требуемый срок службы [9]. В соответствии с данным методом, меняя тип материала конструкции, можно уменьшить толщину дорожной

одежды, что и показано в следующем расчете на примере дорожной одежды для дороги II технической категории из двухслойного асфальтобетонного покрытия на двухслойном щебеночном основании [10].

Для получения более экономичной, но равнопрочной конструкции, уменьшив толщины слоев асфальтобетона, но увеличим толщину

слоев основания, чтобы сохранить сумму структурных чисел. Уменьшим слои плотного и пористого асфальтобетона до минимальных толщин в соответствии с ОДН 218.046-01 [7] на 1 см. Увеличиваем толщины слоев основания: щебень,

укрепленный органическим вяжущим на 4 см, щебень по способу заклинки на 1 см. Получаем новую конструкцию дорожной одежды и сумму структурных чисел для 2-го варианта в табл. 3.

Таблица 2

Расчет суммы структурных чисел для 1-го варианта

Материал слоя	Толщина слоя, h , см	Модуль упругости, E , МПа	Структурный коэффициент, K_c , см^{-1}	Структурное число, $Ч_c = K_c h$
1. Плотный асфальтобетон	6	3200	0,173	1,038
2. Пористый асфальтобетон	8	2000	0,142	1,136
3. Щебень, укрепленный комплексным вяжущим	10	600	0,067	0,67
4. Щебень, уложенный по способу заклинки	20	450	0,055	1,1
5. Песок	30	130	0,017	0,51
		$E_0=297$		$\sum c=4,454$

Таблица 3

Расчет суммы структурных чисел для 2-го варианта

Материал слоя	Толщина слоя, h , см	Модуль упругости, E , МПа	Структурный коэффициент, K_c , см^{-1}	Структурное число, $Ч_c = K_c h$
1. Плотный асфальтобетон	5	3200	0,173	0,865
2. Пористый асфальтобетон	7	2000	0,142	0,994
3. Щебень, укрепленный комплексным вяжущим	11	600	0,067	0,737
4. Щебень, уложенный по способу заклинки	24	450	0,055	1,32
5. Песок	32	130	0,017	0,544
		$E_0=297,6$		$\sum c=4,460$

Произведем расчет конструкции дорожной одежды с изменёнными толщинами слоев и вычислим модуль упругости для 2-го варианта по методике, применяемой в РФ [7]:

Определим модуль упругости на поверхности 5-го слоя, $E_{обц}'''$, МПа:

$$\frac{h_5}{D} = \frac{32}{39} = 0,82; \quad \frac{E_{сп}}{E_5} = \frac{25}{130} = 0,19; \quad \frac{E_{обц}''}{E_5} = 0,46;$$

$$E_{обц}''' = 130 \cdot 0,46 = 59,8 \text{ МПа}$$

Определим модуль упругости на поверхности 4-го слоя, $E_{обц}''$, МПа:

$$\frac{h_4}{D} = \frac{24}{39} = 0,61; \quad \frac{E_{обц}''}{E_4} = \frac{59,8}{450} = 0,13; \quad \frac{E_{обц}'}{E_4} = 0,28;$$

$$E_{обц}'' = 450 \cdot 0,28 = 126 \text{ МПа}$$

Определим модуль упругости на поверхности 3-го слоя, $E_{обц}'$, МПа:

$$\frac{h_3}{D} = \frac{11}{39} = 0,28; \quad \frac{E_{обц}''}{E_3} = \frac{126}{600} = 0,21; \quad \frac{E_{обц}'}{E_3} = 0,29;$$

$$E_{обц}'' = 600 \cdot 0,29 = 174 \text{ МПа}$$

Определим модуль упругости на поверхности 2-го слоя, $E_{обц}'$, МПа:

$$\frac{h_2}{D} = \frac{7}{39} = 0,18; \quad \frac{E_{обц}'}{E_2} = \frac{174}{2000} = 0,087;$$

$$\frac{E_{обц}'}{E_2} = 0,12; \quad E_{обц}' = 2000 \cdot 0,12 = 240 \text{ МПа}$$

Определим модуль упругости на поверхности 1-го слоя, $E_{обц}$, МПа:

$$\frac{h_1}{D} = \frac{5}{39} = 0,13;$$

$$\frac{E_{обц}'}{E_1} = \frac{240}{3200} = 0,08; \quad \frac{E_{обц}}{E_1} = 0,093;$$

$$E_{обц} = 3200 \cdot 0,093 = 297,6 \text{ МПа}$$

Таким образом, получены равнопрочные конструкции дорожной одежды по сравниваемым методам. Можно констатировать, что при расчете методом структурных чисел общий модуль упругости конструкции практически одинаков, но расчет производится быстрее и позволяет изменять толщины слоев, не прибегая к объемным расчетам и использованию номограмм.

В приведенных примерах расчета не учтен грунт земляного полотна, который по применяемой у нас методике входит в пакет рассчитываемых слоев. Для того, чтобы учесть грунт, необходимо увязать "наш" модуль упругости грунта с калифорнийским числом CBR, характеризующим несущую способность грунта в насыщенном водой состоянии. Исследования зарубежных специалистов показали [11, 12], что модуль упругости коррелируется с величиной CBR. Наиболее простой является эмпирическая зависимость:

$$E \approx 10CBR; CBR \approx 0,1E. \quad (1)$$

Формула (1) применима при $CBR < 10\%$. Таким образом, для расчета конструкции дорожной одежды на упругий прогиб можно использовать эту зависимость и добавить в расчет грунт земля-

ного полотна, получив равнопрочную конструкцию. Однако следует заметить, что CBR косвенно характеризует прочность материалов на сдвиг [13]. При экспериментальном определении CBR реализуются испытания статической нагрузкой, а дорожные одежды воспринимают динамические циклические нагрузки, поэтому фактические напряжения в дорожных одеждах меньше, чем при лабораторных испытаниях, что дает некоторый запас прочности.

Методу структурных чисел присущи недостатки:

1) отсутствие расчетных значений $\sum c_p$, которые зависят от суммарного расчетного количества приложений расчетной нагрузки за срок службы;

2) как учесть модуль упругости грунта, хотя для грунтов с CBR от 15 до 40 % и от 7 до 15 % в [3] приводятся значения K_s , равные соответственно 0,031 и 0,024 см^{-1} .

Однако исследованиями [9] данные недостатки устранены путем установления корреляционной зависимости между показателями суммы структурных чисел и общего модуля упругости конструкции дорожной одежды (рис. 1).

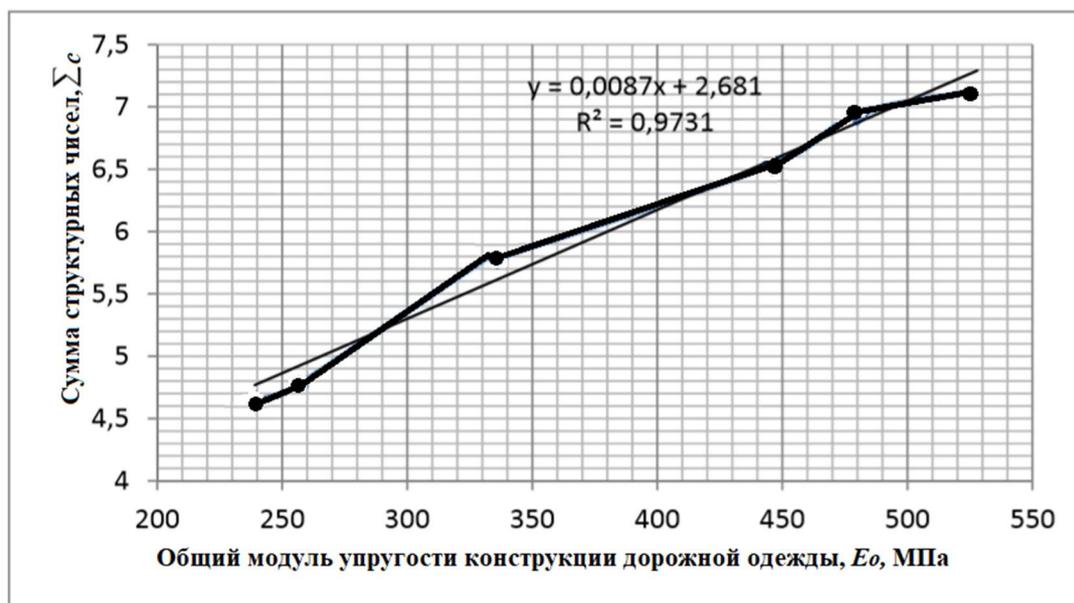


Рис. 1. Корреляционная зависимость между показателями суммы структурных чисел и общего модуля упругости конструкции дорожной одежды

Выводы. Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что расчет дорожной одежды по методу структурных чисел достаточно прост, не использует большого количества расчетных формул, хорошо сочетается с применяемым в нашей стране методом расчета без использования компьютерных программ. С учетом назревшей на современном этапе необходимости

изменения отечественного метода расчета дорожной одежды этот метод вполне жизнеспособен, удобен и может быть рекомендован для практического использования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бойков В.Н., Петренко Д.А., Люст С.Р., Скворцов А.В. Система автоматизированного проектирования автомобильных дорог

IndorCAD/Road // Вестник ТГУ. 2003. № 280. С. 350–353.

2. Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальто-бетонных покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5(57). С. 45–57.

3. Wirtgen GmbH. Холодный ресайклинг Wirtgen. Технология холодного ресайклинга, 2012. 365 с.

4. Ушаков В.В. Дороги из цементобетона – наш выбор? // Дороги. Инновации в строительстве. 2018. №68. С. 90–95.

5. Gorshkova N.G., Zhuravlev A.S. Influence of traffic flow structure and its characteristics on calculation of pavement design // Advances in Engineering Research, volume 158. International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). Pp. 474–477.

6. AASHTO / Guide for the Design of Pavement Structures. Washington, 1993. 624 с.

7. ОДН 218.046-01. Проектирование жестких дорожных одежд. Введ. в дейст. 01.01.2001. М.: Информавтодор, 2001. 143 с.

8. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Введ. в дейст. 01.07.2013. М.: Госстрой России, 2013. 137 с.

9. Бахрах Г.С. К конструированию дорожной одежды с регенерированным слоем по методу структурных чисел // Дороги и мосты. 2015. №2. С. 223–234.

10. Горшкова Н.Г., Журавлев А.С. Определенные нагрузки от многоосного транспортного средства на дорожную одежду // Наука и техника в дорожной отрасли. 2019. №1. С. 22–24.

11. Heukelom W., Foster C.R. Dynamic Testing of Pavements // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 86, No. SM1. 1960. Pp. 1–28.

12. Heukelom W., Klomp A.J.G. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction. Proc., of 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. 1962.

13. Семенова Т.В., Долгих Г.В., Полугородник Б.Н. Применение Калифорнийского числа несущей способности и динамического конусного пенетromетра для оценки качества уплотнения грунтов // Вестник СибАДИ. 2014. №1. С. 59–66.

Информация об авторах

Горшкова Нина Георгиевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог. E-mail: nggor@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Александров Дмитрий Александрович, студент. E-mail: dm.alexandrov@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 18.03.2020

© Горшкова Н.Г., Александров Д.А., 2020

***Gorshkova N.G., Aleksandrov D.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: nggor@yandex.ru*

DESIGN AND CALCULATION OF ROAD SURFACE BY METHOD OF STRUCTURAL NUMBERS

Abstract. Road surface is one of the main components of highways, its condition ensures the safety and speed of traffic. Modern road surface is a complex engineering structure: it consists of layers of road construction materials laid in stages, which have various physical and mechanical properties. These properties are taken into account to ensure the safe movement of vehicles at any time of the year at the estimated speed, while preventing accidents and reducing traffic convenience. The method of structural numbers is one of the methods for calculating roadways. The possibility of its application for the design and calculation of road surface is analyzed. The article shows the possibility of using this rather simple method used in many countries, using a specific example. Since Russia is actively switching to the design of asphalt-concrete mixtures using the Superpave method, which improves the performance of road surfaces, this method has advantages in the design and calculation of road coverings, consisting in ease of use.

Keywords: method of structural numbers, construction of road clothing, methods for calculating structures of road clothing, structural layers.

REFERENCES

1. Bojkov V.N., Petrenko D.A., Lyust S.R., Skvorcov A.V. Automated road design system IndorCAD/Road. [Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya avtomobil'nyh dorog IndorCAD/Road]. Vestnik TGU. 2003. No. 280. Pp. 350–353. (rus)
2. Gercog V.N., Dolgih G.V., Kuzin N.V. Calculation of road surfaces based on evenness criteria. Part 1. Justification of asphalt concrete pavement evenness standards. [Raschet dorozhnyh odezhd po kriteriyam rovnosti. CHast' 1. Obosnovanie norm rovnosti asfal'tobetonnyh pokrytij]. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2015. No. 5(57). Pp. 45–57. (rus)
3. Wirtgen GmbH. Cold Recycling Wirtgen Cold Recycling Technology, 2012. 365 p.
4. Ushakov V.V. Cement concrete roads-our choice? [Dorogi iz cementobetona – nash vybor?]. Dorogi. Innovacii v stroitel'stve. 2018. No.68. Pp. 90-95. (rus)
5. Gorshkova N. G., Zhuravlev A. S. Influence of traffic flow structure and its characteristics on calculation of pavement design. Advances in Engineering Research, volume 158. International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). Pp. 474–477.
6. AASHTO. Guide for the Design of Pavement Structures. Washington, 1993. 624 p.
7. ODN 218.046-01. Design of non-rigid road clothing. [Proektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd]. Informavtodor, 2001. 143 p. (rus)
8. SP 34.13330.2012. Motor road. [Avtomobil'nye dorogi]. Gosstroj Rossii, 2013. 137 p. (rus)
9. Bahrah G.S. To the construction of road surface with regenerated layer using the method of structural numbers. [K konstruirovaniyu dorozhnoj odezhd s regenerirovannym sloem po metodu strukturnykh chisel]. Dorogi i mosty. 2015. No. 2. Pp. 223–234. (rus)
10. Gorshkova N.G., Zhuravlev A.S. Determining the load of a multi -axle vehicle on road clothing. [Opredelenie nagruzki ot mnogoosnogo transportnogo sredstva na dorozhnyu odezhd]. Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli. 2019. No. 1. Pp. 22–24. (rus)
11. Heukelom W., Foster C.R. Dynamic Testing of Pavements. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 86, No. SM1. 1960. Pp. 1-28.
12. Heukelom W., Klomp A.J.G. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction. Proc., of 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. 1962.
13. Semenova T.V., Dolgih G.V., Polugorodnik B.N. Application of the California load capacity number and dynamic cone penetrometer to assess the quality of soil compaction. [Primenenie Kalifornijskogo chisla nesushchej sposobnosti i dinamicheskogo konusnogo penetrometra dlya ocenki kachestva uplotneniya gruntov]. Vestnik SibADI. 2014. No. 1. Pp. 59–66. (rus)

Information about the authors

Gorshkova, Nina G. PhD, Assistant professor. E-mail: nggor@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Aleksandrov, Dmitry A. Bachelor student. E-mail: dm.alexandrov@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 18.03.2020

Для цитирования:

Горшкова Н.Г., Александров Д.А. Проектирование и расчет дорожной одежды методом структурных чисел // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 5. С. 25–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-5-25-30

For citation:

Gorshkova N.G., Aleksandrov D.A. Design and calculation of road surface by method of structural numbers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 5. Pp. 25–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-5-25-30