

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2018, №3, Том 5 / 2018, No 3, Vol 5 <https://t-s.today/issue-3-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/14SATS318.pdf>

DOI: 10.15862/14SATS318 (<http://dx.doi.org/10.15862/14SATS318>)

Статья поступила в редакцию 10.08.2018; опубликована 28.09.2018

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Углова Е.В., Шило О.А. Анализ критериев расчета нежестких дорожных одежд в условиях воздействия интенсивного транспортного потока // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №3, <https://t-s.today/PDF/14SATS318.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/14SATS318

**For citation:**

Uglova E.V., Shilo O.A. (2018). Analysis of the criteria for calculating non-rigid pavements in conditions of intense traffic flow. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/14SATS318.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/14SATS318

**УДК 625.7/.8**

**ГРНТИ 73.31.11**

**Углова Евгения Владимировна**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия

Заведующая кафедрой «Автомобильных дорог»

Доктор технических наук, профессор

E-mail: [uglova.ev@yandex.ru](mailto:uglova.ev@yandex.ru)

РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=456806](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=456806)

**Шило Ольга Александровна**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия

Инженер кафедры «Автомобильных дорог»

E-mail: [Olga\\_shilo@bk.ru](mailto:Olga_shilo@bk.ru)

РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=936633](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=936633)

## **Анализ критериев расчета нежестких дорожных одежд в условиях воздействия интенсивного транспортного потока**

**Аннотация.** Отечественные методы проектирования и расчета нежестких дорожных одежд видоизменялись параллельно с изменением грузоподъемности транспортных средств и увеличением средней интенсивности движения автомобилей. С увеличением уровня затрат на строительство и ремонт дорожных одежд рос и уровень ответственности проектирования.

Однако, все чаще на стадии эксплуатации выявляются ранние дефекты асфальтобетонных слоев и преждевременное снижение несущей способности конструкции в целом. Это свидетельствует лишь о том, что прогнозирование срока службы при проектировании традиционными методиками недостоверно. Причин этому может быть несколько: ошибочное определение количества циклов ежегодного нагружения конструкции, искаженный или неэффективный учет климатических условий эксплуатации дорожно-строительных материалов слоев, неточная методика определения максимально-допустимых и возникающих деформаций, а также накопления их в процессе эксплуатации.

Как следствие, пересматриваются вопросы конструирования дорожных одежд, требований к ним и проектированию автомобильных дорог в целом. Очевидно, что традиционную методику расчета, как минимум, нельзя считать универсальной.

Авторами представлен новый подход к расчету на прочность нежестких дорожных одежд по критерию накопления усталостных повреждений асфальтобетонных слоев, который способен обеспечить достоверное прогнозирование жизненного цикла дорожной одежды, так как основан на многофакторном влиянии внешнего воздействия окружающей среды. Моделирование такого многофакторного процесса как жизненный цикл конструкции является сложной вычислительной задачей. Активная интеграция компьютерных технологий в современную жизнь и строительные процессы позволяет решить данную задачу при помощи ЭВМ, путем разработки прикладных программ.

На кафедре «Автомобильных дорог» ДГТУ разработан программный комплекс Pavement Life Cycle, способный производить расчеты по новому критерию расчета нежестких дорожных одежд. Статья является частью диссертационного исследования второго автора.

**Ключевые слова:** дорожная одежда; прочность; накопление усталостных повреждений; асфальтобетон; критерий расчета; НДС; растягивающие деформации

Современные проектируемые конструкции дорожных одежд, работающие в условиях воздействия интенсивного транспортного потока, на стадии эксплуатации все чаще демонстрируют ранние дефекты асфальтобетонных слоев и преждевременное снижение несущей способности конструкции в целом. Это свидетельствует о том, что прогнозирование срока службы на стадии проектирования традиционной методикой недостаточно, особенно для дорог с высокой интенсивностью движения.

В связи с этим, многие российские ученые пересматривают вопросы конструирования дорожных одежд, требования к ним и проектированию автомобильных дорог в целом. Для выбора нового оптимального подхода к расчету на прочность логично начать с анализа уже существующих критериев и их трансформации.

Работа сотрудников Ленинградского филиала Союздорнии А.М. Кривисского, М.Б. Корсунского, П.И. Теляева, П.Д. Россовского и сотрудников МАДИ Н.Н. Иванова, Н.А. Пузакова, А.Я. Тулаева, Ю.М. Яковлева легла в основу ВСН 46-72 «Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа». В ней была использована экспериментальная зависимость М.И. Якунина, определяющая напряжение под дорожной одеждой.

$$\sigma = \frac{P}{1 + \alpha \left(\frac{z_0}{D}\right)^2} \quad (1)$$

где  $P$  – удельное давление на поверхности дорожной одежды при данном диаметре площадки  $D$ , передающей давление, МПа;

$\alpha$  – коэффициент для упругоизотропных тел, равный 2,5; для многослойных конструкций – 1;

$z_0$  – эквивалентная глубина, см.

Примечательно, что уже в те года инструкция предписывала, что при **проектировании одежд на дорогах с очень тяжелым движением (нагрузка на ось более 12 т) расчет необходимо вести по сдвигу в грунте и слабосвязных материалах, а также по сопротивлению растяжению при изгибе в монолитных слоях**. По величине упругого прогиба нежесткая дорожная одежда для дорог с высокой интенсивностью движения не рассчитывалась, т. е. данный критерий не являлся основным при описании НДС таких конструкций. Первостепенный критерий прочности выражался неравенством:

$$\sigma_r \leq R_n \quad (2)$$

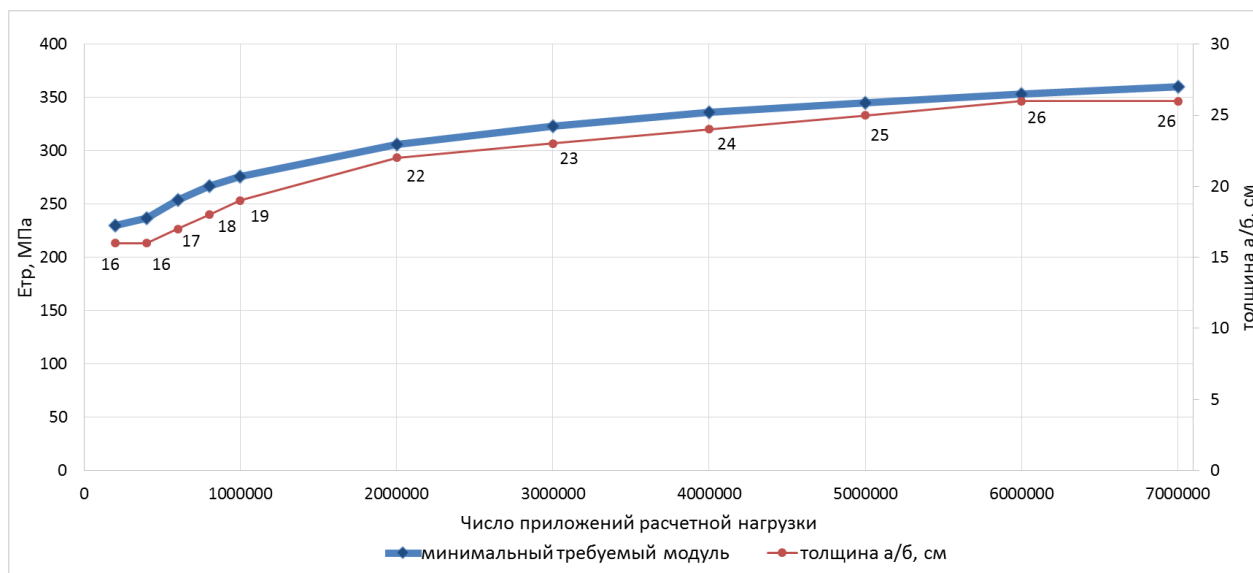
где  $\sigma_r$  – наибольшее растягивающее напряжение в рассматриваемом слое (из асфальтобетона, из материалов, укрепленных органическим и неорганическими вяжущими и т. д.), устанавливаемое путем расчета;

$R_n$  – предельное допустимое растягивающее напряжение материала слоя.

Снижение роли критерия расчета по сдвигу в грунте земляного полотна обусловлено резким увеличением капитальности дорожных одежд, а именно, толщины конструктивных слоев, что обуславливает снижение напряжений в земляном полотне. При этом повышается роль критерия прочности на сопротивление растяжению при изгибе в монолитных слоях.

Несмотря на это, в начале двухтысячных годов принят нормативный документ ОДН 218.046-01, по которому методика расчета фактически назначает основным критерием прочности – упругий прогиб. Расчетный срок службы конструкции дорожной одежды характеризовался расчетным числом приложения расчетной нагрузки. Конструкция дорожной одежды назначалась с учетом минимального требуемого общего модуля упругости на поверхности, зависящего от числа приложений расчетной нагрузки.

Проанализировав зависимость минимального требуемого модуля упругости на поверхности конструкции дорожной одежды от расчетного числа приложений расчетной нагрузки (рисунок 1), очевидно, что она логарифмическая, причем наиболее интенсивное нарастание функции характерно для начального участка, где число приложений расчетной нагрузки до 1 млн.



**Рисунок 1.** Зависимость минимального требуемого модуля упругости от расчетного числа приложений расчетной нагрузки (разработано автором)

Это означает, что данная зависимость и подход к расчету конструкций по критерию упругого прогиба в целом справедливы лишь для узкого спектра автомобильных дорог, что вполне объяснимо. Метод расчета нежестких дорожных одежд, описанный в этом нормативном документе, основан на синтезе аналитического и эмпирического подходов. Применяемые эмпирические коэффициенты хорошо описывают протекающие процессы в конструкции, но лишь при относительно небольшом числе приложений расчетной нагрузки (до 1 млн приложений). На сегодняшний день, суммарное минимальное расчетное число приложений расчетной нагрузки на наиболее нагруженную полосу значительно отличается от предложенных значений в ОДН 218.046-01 (табл. 1). Автомобильные дороги, принадлежащие

Государственной компании «Автодор» I и II категории, за один год могут испытывать большее число приложений расчетных осей (табл. 2).

**Таблица 1**

**Минимальный требуемый модуль упругости из ОДН 218.046-01**

Категория дороги	$\Sigma N_p$	Требуемый модуль упругости одежды, МПа		
		капитальной	облегченной	переходной
I	750 000	230	-	-
II	500 000	220	210	-
III	375 000	200	200	-
IV	110 000	-	150	100
V	40 000	-	100	50

**Таблица 2**

**Фактические значения транспортной нагрузки  
на участке автомобильной дороги М-4 «Дон» ГК «АВТОДОР»**

Участок а/д М-4 «Дон»	$\Sigma N_p$ за 24 года эксплуатации, авт./сут.	Минимальный требуемый модуль упругости, МПа
км 740+900	7 684 886	420
км 801+500	12 540 700	444
км 861+350	13 603 692	448
км 931+150	14 642 718	452
км 993+800	22 806 396	474
км 1036+200	21 619 180	471
км 1055+900	39 323 214	501
км 1058+250	36 298 771	497
км 1089+500	19 472 909	466
км 1102+600	21 137 461	470
км 1142+900	18 774 273	464

*Разработано автором*

В целом, критерий расчета усталостного разрушения монолитных слоев на растяжение при изгибе по ОДН 218.046-01 имеет следующие недостатки [1]:

- расчет растягивающих напряжений выполняются только для периода низких весенних температур, который длится не более 20-30 дней, однако конструкция подвержена накоплению растягивающих деформаций ежедневно в течении всего срока службы;
- расчетные значения модуля упругости асфальтобетона при расчете на растяжение при изгибе принимаются одинаковыми для всех дорожно-климатических зон, в то время как температурные режимы даже в пределах одной зоны отличаются;
- модули упругости асфальтобетона неизменны для одного материала слоя вне зависимости от глубины расположения в конструкции и не подвержены деградации с течением времени эксплуатации;
- данный критерий расчета позволяет запроектировать конструкцию дорожной одежды, обеспечивающую требуемое нормативное состояние асфальтобетонного покрытия при заданном количестве приложений транспортной расчетной нагрузки, но не позволяет достоверно оценить срок службы как временной интервал.

В связи с введением ГОСТ 32960-2014, в котором установлено расчетное давление от колеса автомобиля на покрытие, равное 800 кПа, возникла необходимость актуализировать методику расчета конструкций и согласовать действующую нормативную литературу [2].

В 2018 году был утвержден и введен в действие ПНСТ 265-2018 «Проектирование нежестких дорожных одежд». Расчет нежестких дорожных одежд на прочность по нему выполняется по тем же трем критериям, что и в ОДН 218.046-01, но введена новая классификация строительных материалов.

Мировой опыт расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций показывает, что **интенсивные циклические нагрузки, воздействующие на конструкции в течение всего года, вынуждают пересмотреть расчет дорожных одежд по предельным состояниям в наиболее неблагоприятные периоды года в пользу механистического подхода, включающего вычисление магистральных (основных) реакций в системе и расчет накапливаемых повреждений в течение всего срока службы.**

Разрушение происходит под воздействием накопления за весь срок службы усталостных деформаций, численно меньших предельных значений [3]. Критерий расчета накопления усталостных повреждений за весь срок службы успешно применяется за рубежом, в том числе в Германии (RDO Asphalt 09) и США (The AASHTO Road Test. Report 5). Она основана на использовании соотношений механики деформируемого твердого тела (в частности, теории упругости) и экспериментальных данных о характеристиках материалов.

В нашей стране разработкой данного критерия расчета в различные периоды занимались ученые: Салль А.О., Радовский Б.С., Руденский А.В., Бахрах Г.С., Горельшева Л.А., Углова Е.В., Калашников Т.Н. [4-9]. Так как актуальность исследования работы дорогостоящих асфальтобетонных слоев под воздействием циклической нагрузки весьма велика.

Под воздействием движущихся транспортных средств в асфальтобетонных слоях дорожной одежды вследствие прогиба конструкции возникают растягивающие и сжимающие напряжения. Однако, даже максимальные их значения существенно меньше критических, но при многократном повторении образуются повреждения, которые накапливаются за весь срок службы и приводят к дефектам на покрытии. Под повреждением асфальтобетонного слоя следует понимать ущерб, наносимый единичным воздействием расчетной нагрузки на поверхность конструкции [10].

Первая гипотеза накопления повреждений была предложена Пальмгреном в 1924 г. и позднее развита Майнером в 1945 г. Эта гипотеза широко используется до сих пор и носит название гипотезы Пальмгрена-Майнера или правило линейного суммирования повреждений. Данная теория базируется на предположении, что каждое приложение нагрузки наносит ущерб, поэтому вместо сопоставления отдельных стрессовых состояний, необходимо суммировать все возникающие частичные повреждения, характеризующиеся числом  $D$  – долей поврежденности. Отказ конструкции произойдет, когда их сумма превысит единицу.

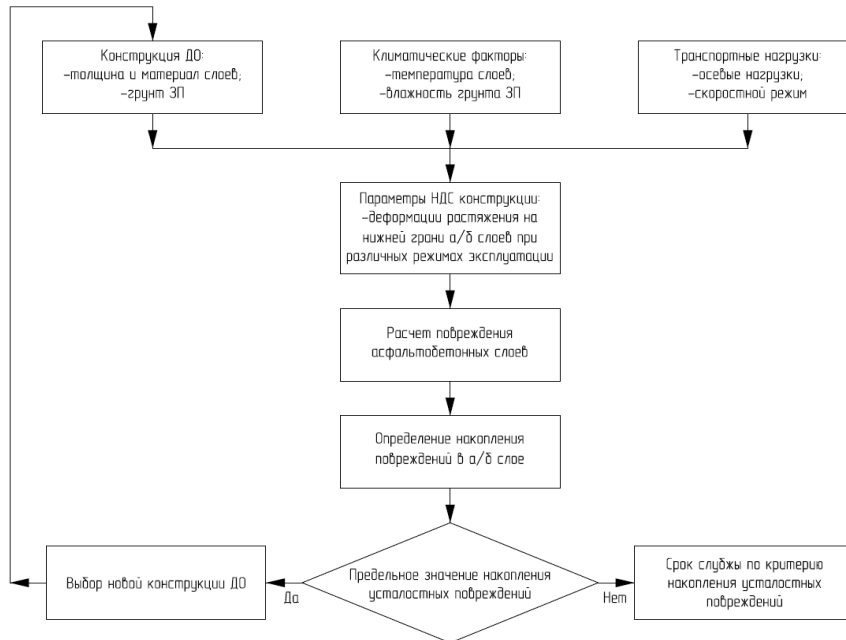
$$D_1 + D_2 + \dots + D_{i-1} + D_i \geq 1 \quad (3)$$

Применение гипотезы Майнера оправдано и вполне допустимо при расчете накопления усталостных повреждений в асфальтобетонных слоях под воздействием интенсивной транспортной нагрузки, особенно при детальной ее оценке.

Таким образом, аналитический метод расчета накопления усталостных повреждений асфальтобетонных слоев нежестких конструкций дорожных одежд должен быть основан на механической модели, которая наиболее достоверно отражает реальные режимы эксплуатации. Это возможно достигнуть путем моделирования, с одной стороны, граничных условий системы, а с другой, внешних факторов.

Граничные условия определяются толщиной и последовательностью конструктивных слоев, лабораторными характеристиками слагающих материалов, межслойным сцеплением и несущими свойствами слоистой системы в целом [11].

Внешние факторы включают воздействие температуры, влажности и интенсивности движения транспортных средств. С учетом этих факторов, возможно определить накопление повреждений конструкции в любой момент времени. Алгоритм расчета достаточно прост и представлен на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Алгоритм расчета накопления усталостных повреждений асфальтобетонных слоев нежестких дорожных одежд (разработано автором)

В 2018 году научными сотрудниками кафедры «Автомобильных дорог» Донского государственного технического университета был создан программный комплекс Pavement Life Cycle, позволяющий полностью автоматизировать процесс расчета конструкций нежестких дорожных одежд по критерию накопления усталостных повреждений за весь срок службы (рис. 4).

№	Название	Толщина (см)	Изображение	Материал	Вязушее	Модуль на упругой пружин МПа
1	Верхний слой покрытия	4		Щебеночно-мастичный асфальтобетон на основе полимерно-модифицированного битума или ПББ с наибольшим размером зерен до 15 мм	на ПББ 40 по ГОСТ Р 52056-2003	5000
2	Нижний слой покрытия	8		Плотный ПДА-асфальтобетон типа А40; АЕ15; АЕ31.5; А20; 940 (Марка 0)	на БНД 60/90	3500
3	Верхний слой основания	10		Пористый ПДА-асфальтобетон типа Р40; РЕ31.5; крупнозернистый (к/з) или Пористый ПДА-асфальтобетон I или II марки по прочности.	на БНД 60/90	2200
4	Средний слой основания	16		Щебеночно-гравийно-песчаные смеси, обработанные цементом, соответствующие марке 60	60 Ех800 МПа	800
5	Нижний слой основания	22		Щебеночно-песчаные смеси с непрерывной гранулометрией С4, С3, С6	80 мм (С4)	275
	Грунт			Суглинок легкий, тяжелый		37

Автомобед с полуприцепом		
	Трехосевые седельные автопоезда (двухосевый седельный тягач с полуприцепом)	940
	Четырехосевые автопоезда (двухосевый грузовой автомобиль с прицепом)	565
	Пятиосевые автопоезда (трехосевый грузовой автомобиль с прицепом)	1113
	Пятиосевые седельные автопоезда (трехосевый седельный тягач с полуприцепом)	542
	Шестюсевые седельные автопоезда	27
	Автомобили с седнем и более осьми и другие	217
Автомобед с прицепом		
	Четырехосевые автопоезда (двухосевый грузовой автомобиль с прицепом)	0

**Рисунок 4.** Альфа-версия программного комплекса Pavement Life Cycle (разработано автором)

Задав исходные данные, характеризующие проектируемую конструкцию и режим последующей эксплуатации, пользователь получает не только расчетные параметры НДС конструкции (рис. 5), но и ежемесячный прирост доли повреждения с расчетным сроком службы (рис. 6).

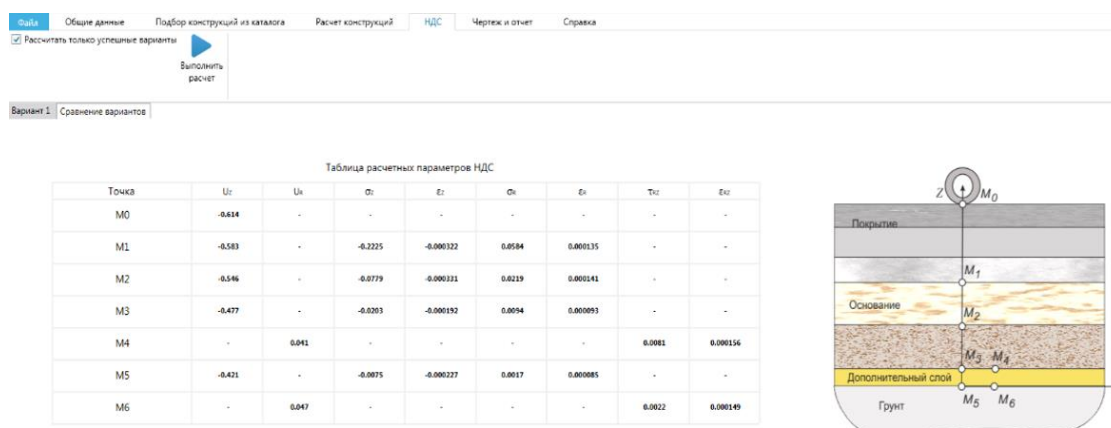


Рисунок 5. Расчетные параметры НДС конструкции (разработано автором)

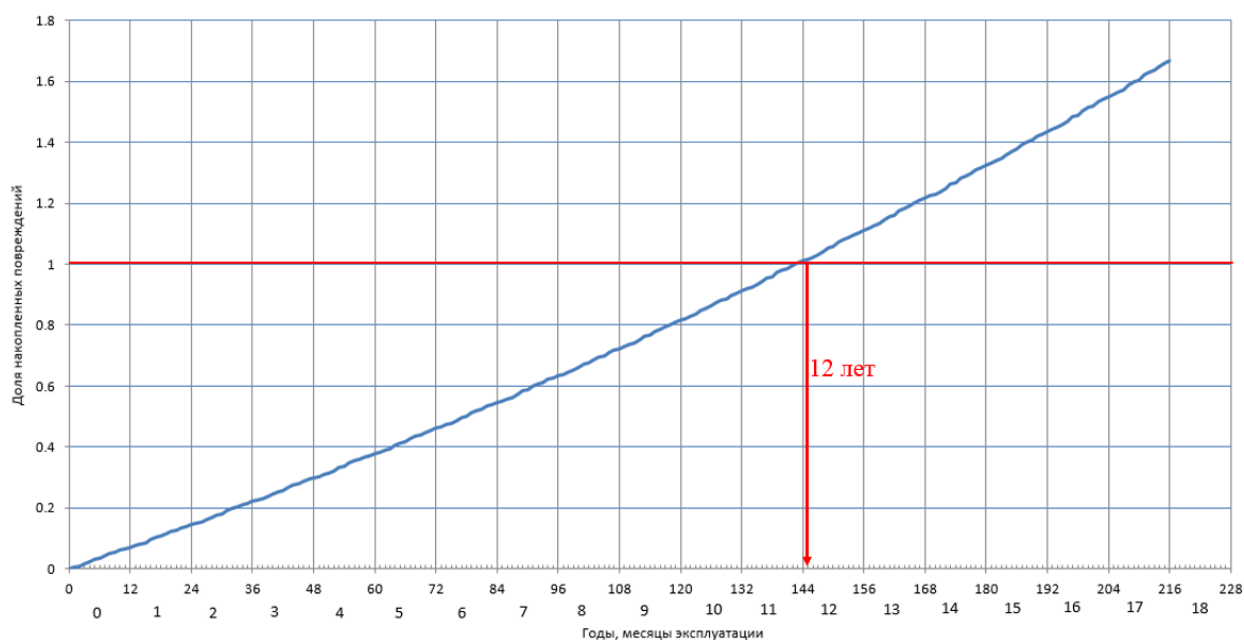


Рисунок 6. Срок службы по критерию накопления усталостных повреждений (разработано автором)

Рост качества работ, выполняемых в рамках диагностики автомобильных дорог, а именно непрерывная регистрация состояния поверхности конструкции, позволил упростить математическое моделирование внешнего воздействия на конструкции.

На сегодняшний день продолжают работы по определению входных параметров методики расчета нежестких дорожных одежд по критерию накопления усталостных повреждений при воздействии повышенных транспортных нагрузок: разработан блок «Климатические факторы», определяющий распределение температуры асфальтобетонных слоев по глубине конструкции и прогнозирующий годовое изменение влажности грунта земляного полотна; разработан блок «Транспортные нагрузки», рассчитывающий ежемесячное изменение количества приложений расчетной нагрузки; разработан блок «Параметры НДС конструкции», рассчитывающий растягивающие деформации в асфальтобетонных слоях;

ведутся лабораторные испытания образцов из различных асфальтобетонных смесей на сопротивление усталостным разрушениям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Углова, Е.В. Теоретические и методологические основы оценки остаточного усталостного ресурса асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук / Е.В. Углова. – Ростов-на-Дону, 2009. – 371 с.
2. Углова Е.В. К вопросу учета расчетного давления колеса автомобиля при проектировании конструкций нежестких дорожных одежд / Е.В. Углова, О.А. Шило, В.В. Акулов // Дороги и мосты – 2017. – №38 – С. 60-70.
3. Углова Е.В., Илиополов С.К., Селезнев М.Г. Усталостная долговечность эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий. Ростов-н/Д: РГСУ, 2009. – 244 с.
4. Салль, А.О. Механические свойства асфальтобетона при изгибе кратковременными нагрузками: тр. Союздорнии / А.О. Саль. – М., 1971. – вып. 47.
5. Радовский, Б.С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок: дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук / Б.С. Радовский. – М., 1982 г.
6. Радовский, Б.С. Поведение дорожной конструкции как слоистой вязкоупругой среды под действием подвижной нагрузки / Б.С. Радовский // Известия вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1975. – С. 78-83.
7. Руденский, А.В. Анализ работы асфальтобетонных покрытий как конструкций с нестационарными эксплуатационными характеристиками: тр. ГипродорНИИ / А.В. Руденский. – 1979. – Вып. 27. – С. 66-78.
8. Руденский, А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия / А.В. Руденский. – М.: Транспорт, 1992. – 253 с.
9. Углова Е.В. Оценка влияния толщин слоев нежестких дорожных одежд на их напряженно-деформированное состояние / Е.В. Углова, А.Н. Тиратуриян // Транспортные сооружения. – 2015. – вып. 4(8). – С. 50-52.
10. Тиратуриян А.Н. Новый подход к оценке остаточного ресурса нежесткой дорожной одежды / Транспортное строительство 2017. №8. С. 16-19.
11. Lev Khazanovich and Qiang (Chuck) Wang. MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board – 2007 – 13 с.



**Uglova Evgenia Vladimirovna**

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia  
E-mail: uglova.ev@yandex.ru

**Shilo Olga Aleksandrovna**

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia  
E-mail: Olga\_shilo@bk.ru

## **Analysis of the criteria for calculating non-rigid pavements in conditions of intense traffic flow**

**Abstract.** Domestic methods of designing and calculating non-rigid pavements were modified in parallel with changes in the load-carrying capacity of vehicles and an increase in the average traffic intensity of cars. With the increase in the level of costs for the construction and repair of road clothes, the level of responsibility for design has increased.

However, more often at the operational stage, early defects of asphalt-concrete layers are detected and premature reduction of the bearing capacity of the structure as a whole. This only indicates that the prediction of the service life in the design of traditional methods is not reliable. The reasons for this may be several: erroneous determination of the number of cycles of the annual loading of the structure, a distorted or ineffective consideration of the climatic conditions of operation of the road-building materials of the layers, an inaccurate technique for determining the maximum permissible and emerging deformations, and also accumulating them during operation.

As a result, the issues of construction of road clothes, requirements for them and the design of highways in general are being revised. Obviously, the traditional method of calculation, as a minimum, can not be considered universal.

The authors presented a new approach to calculating the strength of non-rigid pavements by the criterion of accumulation of fatigue damages of asphalt-concrete layers, which can provide reliable prediction of the pavement life cycle, because it is based on the multifactorial influence of external environmental impact. Modeling such a multifactor process as the life cycle of a design is a complex computational task. Active integration of computer technologies into modern life and construction processes allows solving this task with the help of a computer, by developing application programs.

At the department of "Highways" DSTU developed a software package Pavement Life Cycle, able to make calculations based on a new criterion for calculating non-rigid road clothes. The article is part of the dissertation research of the second author.

**Keywords:** road wear; strength; accumulation of fatigue damage; asphalt concrete; calculation criterion; VAT; tensile deformations

## REFERENCES

1. Uglova E.V. (2009). Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy otsenki ostatochnogo ustalostnogo resursa asfal'tobetonnykh pokrytiy avtomobil'nykh dorog. [*Theoretical and methodological basis for assessing the residual fatigue life of asphalt concrete road surface coatings.*] Rostov-on-Don, p. 371.
2. Uglova E.V., Shilo O.A., Akulov V.V. (2017). To the question of taking into account the calculated pressure of the wheel of a car when designing designs of nonrigid road clothes. *Roads and bridges*, 38, pp. 60-70. (in Russian).
3. Uglova E.V., Iliopolov S.K., Seleznev M.G. (2009). Ustalostnaya dolgovechnost' ehkspluatiruemykh asfal'tobetonnykh pokrytiy. [*Fatigue life of exploited asphalt-concrete coatings.*] Rostov-on-Don: Rostov State University of Civil Engineering, p. 244.
4. Sall' A.O. (1971). Mekhanicheskie svoystva asfal'tobetona pri izgibe kratkovremennymi nagruzkami. [*Mechanical properties of asphalt concrete during bending by short-term loads.*] Moscow.
5. Radovskiy B.S. (1982). Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya i rascheta nezhestkikh dorozhnykh odezhd na vozdeystvie podvizhnykh nagruzok. [*Theoretical bases of designing and calculation of non-rigid road clothes on influence of mobile loadings.*] Moscow.
6. Radovskiy B.S. (1975). Behavior of a road structure as a layered viscoelastic medium under the action of a mobile load. *News of universities*, p. 78-83. (in Russian).
7. Rudenskiy A.V. (1979). Analysis of the performance of asphalt concrete pavements as structures with non-stationary performance characteristics. 27, pp. 66-78. (in Russian).
8. Rudenskiy A.V. (1992). Dorozhnye asfal'tobetonnye pokrytiya. [*Road asphalt pavements.*] Moscow: Transport, p. 253.
9. Uglova E.V., Tiraturyan A.N. (2015). Evaluation of the influence of thicknesses of layers of nonrigid road clothes on their stress-strain state. *Russian journal of transport engineering*, 4(8), pp. 50-52. (in Russian).
10. Tiraturyan A.N. (2017). A new approach to assessing the residual resource of non-rigid pavement. *Russian journal of transport engineering*, 8, pp. 16-19. (in Russian).
11. Lev Khazanovich, Qiang (Chuck) Wang (2007). MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. p. 13.