

## Учет вероятностной составляющей при назначении проектных модулей упругости слоев асфальтобетона

*Е.В. Углова, А.Н. Тиратурян, В.В. Акулов, Д.А. Валенцев, В.Ю. Шаталов*

*Донской Государственный Технический Университет  
Академия Строительства и Архитектуры*

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы учета вероятностной составляющей при назначении проектных значений модулей упругости слоев асфальтобетона. При этом в качестве расчетной модели, используется американская модель Витчака для назначения комплексного динамического модуля упругости асфальтобетона. Для учета неопределенности, связанной с материаловедческими факторами подбора асфальтобетонной смеси, применены методы статистического моделирования, в частности метод Монте-Карло.

**Ключевые слова:** дорожная одежда, надежность, модуль упругости, статистическое моделирование

Проблема преждевременного разрушения дорожных конструкций является актуальной как в отечественной, так и зарубежной практике. Так, по данным Росавтодора за период 2013-2015 год на ремонт и капитальный ремонт автомобильных дорог общего пользования было направлено 597.4 млрд руб. [1]. Уменьшить эти затраты возможно путем обеспечения продления межремонтных сроков службы дорожных одежд.

Фундамент надежности и долговременной прочности нежестких дорожных одежд закладывается на стадии их проектирования [2]. Подробно вопросы надежности нежестких дорожных одежд рассматривались в работах И.А. Золотаря, В.В. Семенова, В.К. Некрасова, В.С. Столярова, Н.Е. Кокодеевой [2-6]. В общем виде в соответствии с действующим нормативным документом на проектирование нежестких дорожных одежд ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» уровень надежности дорожной одежды  $P$  определяется как:

$$P = 1 - F_p/F_0$$

Где  $P$  – уровень надежности дорожной конструкции (вероятность отказа) по одному или ряду критериев прочности;

$F_p$  – площадь покрытия дорожной одежды, имеющая недопустимые деформации или разрушения на конец срока службы;

$F_0$  – общая площадь дорожной одежды

Так если уровень надежности дорожной одежд на стадии проектирования принимается равным 0.95, то подразумевается, что на конец расчетного срока службы дорожной одежды 5 % покрытия будут находиться в неудовлетворительном состоянии. Однако важно отметить, что в отечественной нормативной базе практически отсутствует описание того, что именно считать отказом дорожной конструкции, или недопустимыми дефектами. При этом выполнение критериев прочности дорожной одежды на стадии проектирования не гарантирует отсутствия деформаций и разрушений покрытий в реальных условиях эксплуатации.

В работах Е.В. Угловой и В. П. Матуа [7,8] были разработаны теоретические основы методов прогнозирования накопления усталостных и пластических деформаций на поверхности покрытий нежестких дорожных одежд. Следует отметить, что оба метода используют преимущественно детерминированные модели прогнозирования. В то же время в работе дорожной конструкции чрезвычайно сильна стохастическая (вероятностная) составляющая во многом определяющая темпы разрушения нежестких дорожных одежд. Таким образом, разработка эффективного аппарата для оценки надежности результатов прогнозирования является актуальной задачей.

В качестве основных параметров фактическая неоднородность которых влияет на надежность прогнозирования разрушений и деформаций на поверхности нежестких дорожных одежд можно выделить **две группы параметров**. К **I группе** следует отнести материаловедческие факторы, такие как:

---

- неоднородность гранулометрического состава асфальтобетонной смеси;

- неоднородность содержания битума в асфальтобетонной смеси;

- неоднородность остаточной пористости асфальтобетонной смеси.

**Ко II группе** относятся структурные показатели дорожной одежды:

- неоднородность модулей упругости слоев покрытия дорожных одежд;

- неоднородность модулей упругости слоев основания;

- неоднородность модуля упругости грунта земляного полотна;

- неоднородность толщин слоев дорожной одежды

Учет неоднородности показателей первой группы требует применения зависимостей, связывающих материаловедческие факторы подбора асфальтобетонных смесей со значениями модуля упругости асфальтобетонов. В качестве такой зависимости может быть выделена модель комплексного динамического модуля упругости асфальтобетона, полученная американским ученым M.W. Witzak [10] на основе лабораторных испытаний 205 составов асфальтобетонных смесей на 23 типах битумных вяжущих.

$$\log E = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767\rho_{200}^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017\rho_{38}^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351\log(f) - 0.393532\log(\eta))}}$$

E - комплексный динамический модуль упругости асфальтобетона, psi (фунтов на квадратный дюйм)

$\rho_{200}$  - полный проход через сито 0.075 мм, %

$\rho_4$  - суммарный остаток на сите размером 4.75 мм, %

$\rho_{38}$  - суммарный остаток на сите размером 9.5 мм, %

$\rho_{34}$  - суммарный остаток на сите размером 19 мм, %

$\eta$  - вязкость битума,  $10^6$  Пз

$V_a$  - содержание воздушных пор, %

$V_{beff}$  - эффективное содержание битума, %

f - частота нагружения, Гц

Вязкость битума  $\eta$  определяется как:

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R$$

$\eta$  – вязкость битума, сПз

A - коэффициент регрессии;

VTS - регрессионный наклон температурной чувствительности вязкости;

$T_R$  – температура в градусах Ранкина,  $Ra$  ( $^{\circ}C = (^{\circ}R) - 491.67$ ) \*  $5/9$ )

С использованием модели Витчака был проведен численный эксперимент по исследованию влияния неоднородности гранулометрического состава, содержания вяжущего и остаточной пористости асфальтобетона в проектных пределах, регламентируемых действующими нормативными документами. В рамках проведенного эксперимента анализировались такие типы асфальтобетона как: щебеночно-мастичный асфальтобетон, асфальтобетон плотный мелкозернистый тип А, асфальтобетон плотный крупнозернистый тип А, асфальтобетон пористый крупнозернистый, полимерно-дисперсно-армированный асфальтобетон Р40 (по СТО АВТОДОР 2.11-2015). В таблицах 1-3 приведены нижние и верхние границы зерновых составов для рассматриваемых асфальтобетонов, остаточной пористости и содержания органического вяжущего.

Таблица 1

Зерновые составы минеральной части исследуемых асфальтобетонов

Тип асфальтобетона	Размер зерен, мм, мельче										
	40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,31 5	0,16	0,0 71
ЩМА-20 (ГОСТ 31015-2002)		100- 90	70- 50	42- 25	30- 20	25- 15	24- 13	21- 11	19-9	15-8	<b>13- 8</b>
А/б плотный м/з тип А (ГОСТ 9128-2009)		90- 100	75- 100 (90- 100)	62- 100 (90- 100)	40- 50	28- 38	20- 28	14- 20	10- 16	6-12	4- 10

А/б плотный к/з тип А (ГОСТ 9128-2009)	90- 100	66-- 90	56- 70	48- 62	40- 50	28- 38	20- 28	14- 20	10- 16	6-12	4- 10
А/б пористый к/з (ГОСТ 9128-2009)	90- 100	75- 100 (90- 100)	64- 100	52- 88	40- 60	28- 60	16- 60	10- 60	8-37	5-20	2-8
ПДА асфальтобетон Р40 (СТО 2.11-2015)	90- 100	75- 88	64- 80	52- 67	34- 45	24- 38	16- 30	10- 23	7-15	4-11	1-7

Таблица 2

Диапазон допустимых значений остаточной пористости исследуемых  
асфальтобетонов

Тип асфальтобетона	Остаточная пористость, %
ЩМА-20	1.5 – 4.5
А/б плотный м/з тип А (ГОСТ 9128-2009)	2.5 - 5
А/б плотный к/з тип А (ГОСТ 9128-2009)	2.5 - 5
А/б пористый к/з (ГОСТ 9128-2009)	5 - 10
ПДА асфальтобетон Р40	4 - 7

Таблица 3

Диапазон допустимых значений содержания вяжущего в смеси

Тип асфальтобетона	Содержание вяжущего, %
ЩМА-20	5.5 – 6.0
А/б плотный м/з тип А (ГОСТ 9128-2009)	4.5 – 6.0
А/б плотный к/з тип А (ГОСТ 9128-2009)	4.5 – 6.0
А/б пористый к/з (ГОСТ 9128-2009)	3.5-5.5
ПДА асфальтобетон Р40	3.5-4.5

Для моделирования влияния представленных диапазонов значений параметров I группы на значения комплексного динамического модуля упругости асфальтобетона применялся метод Монте-Карло [11, 12]. Этот метод основан на получении большого числа реализаций стохастического (случайного) процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи. При проведении моделирования предполагалось, что изменение составов минеральной части исследуемых асфальтобетонов, остаточной пористости и содержания вяжущего, в пределах регламентируемых нормативными документами, подчиняется закону нормального распределения.

По итогам проведенного численного моделирования были получены значения модулей упругости для среднесуточных температур покрытия разных периодов года (на примере Ростовской области), приведенные в таблице 4: Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что рассматриваемые факторы оказывают серьезное влияние на значения комплексного динамического модуля упругости слоя асфальтобетона.

Таблица 4  
Значения динамического модуля упругости различных типов асфальтобетона

Слой		Модуль упругости слоя, рассчитанный для различных времен года (среднесуточная температура)				
		Зима ( $t=3.5^{\circ}\text{C}$ )	Ранняя весна ( $t=10^{\circ}\text{C}$ )	Поздняя весна ( $t=25^{\circ}\text{C}$ )	Лето ( $t=35.6^{\circ}\text{C}$ )	Осень ( $t=19.8^{\circ}\text{C}$ )
ЩМА-20	5 %	7030	4330	1468	736	2122
	Среднее	5900	3620	1230	614	1772
	95 %	4900	3000	1023	513	1480
Асфальтобетон плотный мелкозернисты	5 %	6713	4235	1468	719	2030
	Среднее	5604	3536	1230	600	1772
	95 %	4678	2952	1023	500	1450



й тип А						
Асфальтобетон плотный крупнозернист ый	5 %	8860	5461	1767	865	2554
	Среднее	7736	4770	1543	756	2231
	95 %	6760	4166	1348	660	1948
Асфальтобетон пористый крупнозернист ый	5 %	6122	4227	1399	701	2070
	Среднее	5111	3224	1067	535	1579
	95 %	4266	2459	814	408	1204
ПДА асфальтобетон	5 %	6416	4048	1435	656	1982
	Среднее	5604	3536	1198	573	1731
	95 %	4794	2888	1000	500	1412

Так для различных температур покрытия дорожной одежды разница между значениями динамического модуля упругости асфальтобетона 5 % обеспеченности и 95 % обеспеченности может составлять от 23 до 30 %. Учесть данный фактор на стадии проектирования возможно изначально закладывая в процессе расчета нежесткой дорожной одежды динамические модули упругости асфальтобетона 95 % обеспеченности. Безусловно, применение подобного подхода требует дополнительных исследований (в частности внедрения в практику РФ основных положений методологии Supergrave) и верификации рассматриваемой модели комплексного динамического модуля упругости для условий РФ. Важно также отметить, что внедрение данного подхода в производственную практику повлечет за собой необходимость проведения при приемке построенных участков автомобильных дорог обязательного контроля фактических значений модулей упругости слоев асфальтобетона.

### Литература

1. Углова Е.В., Васильев Д.С. Разработка эффективных решений ремонта дорожной одежды на городских магистралях // Инженерный вестник Дона, 2015, №2, ч.2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3072](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3072)



2. Бессчетнов Б.В. Повышение длительной трещиностойкости асфальтобетона дорожных покрытий // Инженерный вестник Дона, 2012, №2  
URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856)
  3. Золотарь И. А. Повышение надежности автомобильных дорог / И.А. Золотарь, М.: Транспорт, 1977. – 183 с.
  4. Семенов В. А. Качество и однородность автомобильных дорог / В.А. Семенов, М.: Транспорт, 1989. – 125 с.
  5. Столяров В. В. Оценка надежности нежестких дорожных одежд на основе законов распределения общих модулей упругости / В. В. Столяров, Е. Е. Зверкова, А. С. Фомина // Дороги и мосты. - 2014. - № 30. - С. 153-174.
  6. Кокодеева Н. Е. Методологические основы комплексной оценки надежности автомобильных дорог в системе технического регулирования дорожного хозяйства: автореф. дис. д-р. техн наук: 05.23.11. / Н. Е. Кокодеева. - Саратов, 2011. – 339 с.
  7. Кокодеева Н. Е. Определение срока службы дорожной одежды и темпов ее разрушения с учетом изменения влажности грунта в расчетный период года (с позиции теории риска) / Н. Е. Кокодеева // Строительство и реконструкция. Известия ОрелГТУ. - 2009 (ноябрь-декабрь). - № 6/26 (574). - С. 86–93.
  8. Углова Е. В. Теоретические и методологические основы оценки остаточного усталостного ресурса асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: дис. д-ра. техн. наук: 05.23.11 / Е. В. Углова – Волгоград., 2009. – 371 с.
  9. Матуа В. П. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций с учетом их неупругих свойств и пространственного нагружения: автореф. дис. д-ра техн. наук / В. П. Матуа. М., - 2002. 32 с.
-

10. Witchzhak M. N.C.H.R.P. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Transport research boarding. 2004. – 1240 p.

11. Alex F Bielajew. Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport. Washington 2001 – 300 p.

12. Fishman, George S. Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications. — Springer, 1996. — ISBN 0-387-94527-X. 17 p.

### References

1. Uglova E.V., Vasil'ev D.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №2, part 2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3072](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3072)

2. Besschetnov B.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856)

3. Zolotar' I. A. Povyshenie nadezhnosti avtomobil'nyh dorog [Improving roads reliability]. I.A. Zolotar', M.: Transport, 1977. 183 p.

4. Semenov V. A. Kachestvo i odnorodnost' avtomobil'nyh dorog [The quality and uniformity of highways]. V.A. Semenov, M.: Transport, 1989. 125 p.

5. V. V. Stoljarov, E. E. Zverkova, A. S. Fomina. Dorogi i mosty. 2014. № 30. pp. 153-174.

6. Kokodeeva N. E. Metodologicheskie osnovy kompleksnoj ocenki nadezhnosti avtomobil'nyh dorog v sisteme tehničeskogo regulirovanija dorozhnogo hozjajstva [Methodological basis of a comprehensive assessment of the reliability of road maintenance in road sector regulatory system]: avtoref. dis.d-r. tehn nauk: 05.23.11.N. E. Kokodeeva. Saratov, 2011. 339 p.

7. N. E. Kokodeeva. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. Izvestija OrelGTU. 2009 (nojabr'-dekabr'). № 6/26 (574). pp. 86–93.

8. Uglova E. V. Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy ocenki ostatochnogo ustalostnogo resursa asfal'tobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog [Theoretical and methodological framework for the assessment of residual fatigue



life of asphalt concrete pavement of roads]: dis. d-ra. tehn. nauk: 05.23.11. E. V. Uglova .Volgograd, 2009. 371 p.

9. Matua V. P. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija dorozhnyh konstrukcij s uchetom ih neuprugih svojstv i prostranstvennogo nagruzhenija [Investigation of stress-strain state of the road constructions in view of their non-elastic properties and spatial loading]: avtoref. dis. d-ra tehn. Nauk. V. P. Matua. M., 2002. 32 p.

10. Witchzhak M. N.C.H.R.P. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Transport research boarding. 2004. 1240 p.

11. Alex F Bielajew. Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport. Washington 2001. 300 p.

12. Fishman, George S. Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications. Springer, 1996. ISBN 0-387-94527-X. 17 p.