УДК 625.855.3

РАСЧЕТ ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ С РЕГЕНЕРИРОВАННЫМ СЛОЕМ

Канд. техн. наук **Г.С. Бахрах**
(ФАУ «РОСДОРНИИ»)
Конт. информация: bakhrakh35@mail.ru

Рассмотрены нормативные значения модуля упругости покрытия, регенерированного холодным способом. Приведены результаты изменения модуля упругости на экспериментальных участках дорог, регенерированных в штате Виргиния (США), за восемь лет. Показано, что модуль упругости слоя, регенерированного с использованием битумной эмульсии и вспененного битума, возрастает во времени.
Ключевые слова: *битумная эмульсия, вспененный битум, модуль упругости, структурный коэффициент, холодная регенерация.*

Основополагающим документом по капитальному ремонту дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием методом холодной регенерации в России является ОДМ, опубликованный в 2002 г. [**1**]. Основные положения этого документа остаются в силе до сих пор, хотя время показало, что он уже требует переработки. В статье [**2**] обобщен опыт применения метода холодной регенерации, и изложены основные изменения, которые вошли в новую редакцию ОДМ. Переработанный документ был представлен в Росавтодор в 2015 г., но до сих пор не утвержден.

Метод холодной регенерации включен в обновленную классификацию ремонтных работ [**3**] (раздел II, часть 4, пункт 2 и раздел III, часть 5, пункт 2).

Наиболее дискуссионным вопросом являются нормативные значения модуля упругости регенерированного слоя. Это расчетный показатель, от которого существенно зависит толщина слоя асфальтобетонного покрытия, укладываемого поверх регенерированного слоя. В переработанном ОДМ приводится таблица нормативных значений кратковременного модуля упругости асфальтогранулобетона (АГБ) разных типов (для расчета по допускаемому упругому прогибу при 10 °С и на растяжение при изгибе кратковременными нагрузками при 0 °С).

Чтобы проиллюстрировать влияние модуля упругости на конструкцию дорожной одежды, выполним ее расчет с разными значениями модуля упругости АГБ.

Рассмотрим конструкцию из примера № 3 Приложения 8 ОДН 218.046-01 [**4**], в которой асфальтобетонное покрытие состоит из

верхнего слоя плотного асфальтобетона толщиной 4 см, промежуточного слоя пористого асфальтобетона толщиной 6 см и нижнего слоя высокопористого асфальтобетона толщиной 12,5 см (а не 14 см, как в [**4**]). Расчетный общий модуль упругости этой дорожной конструкции $E_{об}$ = 336 МПа. Общий модуль упругости на поверхности щебеночного слоя основания – E_o = 122 МПа.

Таблица 1

Расчетный модуль упругости АГБ E_p

Тип смеси	***Значение, МПа, при расчете***	
	по упругому прогибу	***на растяжение при изгибе***
А (без добавления вяжущего)	800	900
В и Э (с добавлением вспененного битума или битумной эмульсии)	1200	2200
К (с добавлением комплексного вяжущего)	1400	2400
М (с добавлением цемента или извести)	1400	2400

После холодной регенерации пакета асфальтобетонных слоев толщиной 22,5 см получили слой АГБ толщиной 26 см (по формуле (**21**) в [**1**]). В **табл. 2** приведены результаты расчета конструкций дорожной одежды по допустимому упругому прогибу с одинаковым значением показателя $E_{об}$ при разных значениях модуля упругости АГБ $E_{агб}$.

Как следует из **табл. 2**, при модуле упругости АГБ величиной 1200 МПа слоя асфальтобетона вообще не требуется; достаточно поверхностной обработки. А с уменьшением модуля упругости АГБ до 600 МПа необходим асфальтобетонный слой усиления толщиной 5,5 см. Заметим, что при расчете по критерию усталости, как показано в работе [**5**], при толщинах пакета битумосвязных слоев ниже 14 см толщина асфальтобетонного слоя усиления снижается, а выше 14 см – увеличивается.

Таблица 2

Результаты расчета дорожных конструкций

№ п/п	Материал слоя	h, см	E, МПа	$E_н/E_в$	$h_в/D$	$E_о/E$ (по номо-грам-ме)	$E_{об}$, МПа
1	Асфальтограну-лобетон	26	**1200**	0,10	0,70	0,28	336
2	Асфальтограну-лобетон	26	**1000**	0,12	0,70	0,31	310
	Асфальтобетон	**3,5**	3200	0,096	0,09	0,105	336
3	Асфальтограну-лобетон	26	**800**	0,15	0,70	0,36	288
	Асфальтобетон	**4,5**	3200	0,09	0,12	0,105	336
4	Асфальтограну-лобетон	26	**600**	0,20	0,70	0,425	255
	Асфальтобетон	**5,5**	3200	0,08	0,15	0,105	336

В работе [**2**] целый раздел посвящен обоснованию нормативного значения модуля упругости АГБ. Тем не менее, появляются работы, в которых его занижают. Так, в проекте ПНСТ «*Смеси органоминеральные холодные с использованием переработанного асфальтобетона*» его разработчиками для смесей с битумной эмульсией предлагается нормативное значение модуля упругости уплотненной смеси даже ниже, чем приводится в ОДН [**4**] для холодных смесей на жидком битуме.

Фактическое значение модуля упругости АГБ в конструкции дорожной одежды $E_{Фагб}$ величина переменная, зависящая при прочих равных условиях от температурного режима слоя. Кроме того, даже без добавки минерального вяжущего модуль упругости АГБ с течением времени возрастает. Основная трудность определения фактического модуля упругости АГБ связана с тем, что его приходится рассчитывать по значению общего прогиба дорожной конструкции обратным пересчетом, задаваясь нормативными значениями модуля упругости конструк-

тивных слоев. Кроме того, необходимо знать влажность грунта в момент экспериментального определения прогиба.

В переработанном ОДМ приводится эмпирическая формула из [**6**], связывающая фактическое значение модуля упругости АГБ с пределом прочности на растяжение при расколе.

За рубежом опубликовано большое число работ, рассматривающих $E_{Фагб}$. Но результаты этих работ трудно сравнивать с отечественными данными, так как, согласно зарубежной методике расчета дорожных одежд, используются значения динамического модуля упругости дорожной одежды, а отечественной методике – статического. Хотя в ОДН 218.1.052-2002 в разделе 2.4.6 приводится формула пересчета динамического прогиба в статический, но необходимо знать величины соответствующих прогибов.

В США технологию глубокой холодной регенерации материала покрытия непосредственно на дороге (full-depth reclamation) (FDR) широко применяют во многих штатах. Но и там до сих пор дискутируется вопрос, какие значения модуля упругости регенерированного слоя принимать при расчете на прочность дорожной одежды. Считают, что поскольку $E_{Фагб}$ со временем возрастает, то расчетное значение надо принимать с учетом повышающего коэффициента $K_П$ к его значению в 7-дневном возрасте. Так, в [**7**] для АГБ с вспененным битумом получили значения $K_П$ в интервале от 1,3 до 2,7.

Показательное исследование было проведено Виргинским центром транспортных инноваций и исследований (Virginia Center Transportation Innovation and Research) [**8**]. В 2008 г. выполнили три демонстрационных проекта FDR с использованием в качестве вяжущего: 2,3 % битумной эмульсии; 2,7 % вспененного битума и 1 % цемента; 5 % цемента. Исследование предполагало измерение прогибов в течение первых двух лет после выполнения ремонтных работ. Прогибы определяли передвижной установкой Dinatest модели 8000 с падающим грузом (FWD). Испытания проводили в соответствии с Руководством по проектированию [**9**] при трех нагрузках. Результаты приводили к температуре 20 °С. Толщину конструктивных слоев определяли при помощи георадара. В публикации приводятся радарограммы дорожной конструкции, полученные до и после регенерации. Хорошо видно, насколько выше однородность регенерированного слоя во втором случае. Наиболее интересно, что в итоге оперируют не модулем упругости регенерированного слоя, а эмпирическим *структурным коэффициентом* SN_{eff} дорожной конструкции в соответствии с методологией проектирования AASHTO. Об этом методе автор настоящей статьи подробно писал в [**10**]. SN_{eff} является аналогом параметра $E_{об}$. Если при прочих равных условиях со временем возрастает модуль упругости регенерированного

слоя, то растет и показатель SN_{eff}. Заметим, что участок, стабилизированный вспененным битумом с 1 % цемента, через три недели после регенерации показал примерно на 30 % более высокую несущую способность (3,2), чем участок, стабилизированный битумной эмульсией (2,5). Через 4 месяца показатель SN_{eff} для обоих участков увеличился на 23 %, а через два года – на 37 %. Участки, стабилизированные 5 % цемента, изначально показали в среднем SN_{eff} = 4,3, через 4 месяца данный показатель увеличился всего на 7 %, а через два года – на 12 %. Было замечено, что добавление 1 % цемента снижает чувствительность модуля упругости регенерированного слоя с органическим вяжущим к высоким летним температурам.

Обращает на себя внимание тот факт, что смеси, стабилизированные вспененным битумом и битумной эмульсией, со временем прочнеют сильнее, чем смеси, стабилизированные цементом. Возможно, это связано с тем, что по мере высыхания регенерированного слоя с органическим вяжущим его плотность под воздействием движения транспорта возрастает.

В более поздней работе Виргинского центра [**11**] было рассмотрено состояние описанных выше участков дорог за 9 лет. Показано, что через 3 месяца после регенерации для участка со вспененным битумом и 1 % цемента модуль упругости составил 2900 МПа, для участка с битумной эмульсией – 1200 МПа, а для участков с 5 % цемента – 7000 МПа (дорога SR-13) и 4800 МПа (дорога SR-6). В системе управления состоянием дорожных одежд Департамента транспорта штата Виргиния была разработана модель долговременного поведения дорожной одежды в виде *индекса критического состояния* (*CCI*):

$$CCI = 100 - exp[a+bc^{log(1/годы)}] \ ,$$

где

a, b и c – коэффициенты.

На **рис. 1** приведены графики зависимости *CCI* от времени эксплуатации регенерированного слоя, соответствующие приведенному уравнению. При показателе *CCI* ниже 30 состояние покрытия очень плохое, и требуется проведение капитального ремонта (пунктирная линия на графике). Из рисунка следует, что через семь лет эксплуатации участки, стабилизированные битумным вяжущим, находятся в лучшем состоянии, чем участки, стабилизированные цементом. Заметим, что при проектировании, срок службы дорожной одежды в последнем случае был заложен на 4 года большим, чем для стабилизированных битумом участков.

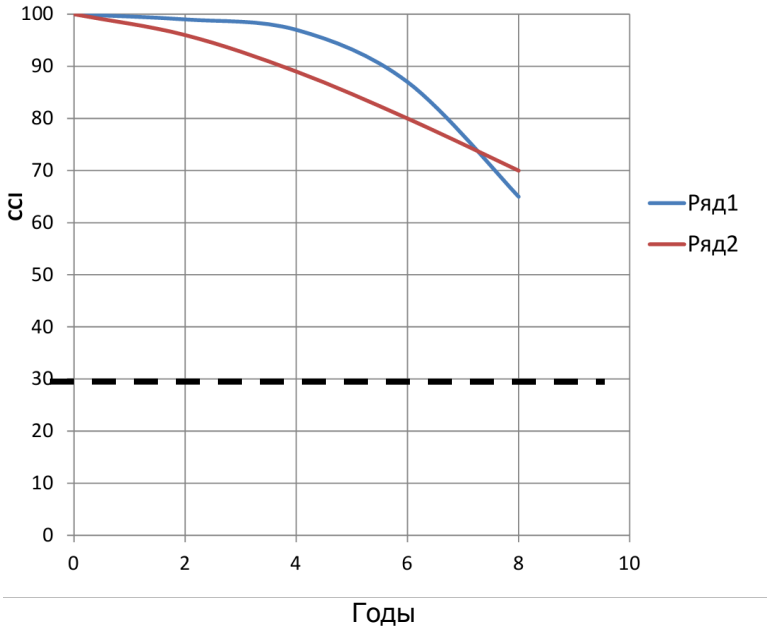

Рис. 1. Зависимость индекса CCI от времени эксплуатации слоя, стабилизированного:
битумной эмульсией и вспененным битумом (ряд 1);
цементом (ряд 2)

Авторами этой работы рекомендуется при проектировании дорожной одежды принимать следующие значения модуля упругости для материала, стабилизированного:

- битумной эмульсией – 1170 МПа;
- вспененным битумом с 1 % цемента – 3100 МПа;
- 5 % цемента – 4970 МПа.

Следует учесть, что эти значения приводятся для температуры 20 °С, а при 10 °С модули упругости для материала, стабилизированного битумом, будут, по крайней мере, на 20 % выше. Вычислить значения статических модулей из-за отсутствия данных по прогибам не представляется возможным, хотя они должны быть ниже динамических. Принимая во внимание высказанные соображения, на данном этапе можно оставить в силе значения модуля упругости, приведенные в **табл. 1**, за исключением модуля слоя, стабилизированного вспененным битумом, приняв его равным 1300 МПа при расчете по упругому прогибу.

В новой редакции ОДМ [**1**] в качестве критерия оптимального содержания добавляемого битума предложен предел прочности АГБ при расколе R_p. Однако в работе [**12**] показано, что этот параметр менее

чувствителен к содержанию добавляемого битума, чем число циклов нагружения, выдерживаемых образцами при испытании на усталость. Так, АГБ с 1 % цемента и 2,5 % вспененного битума выдержал на 3000 циклов больше, чем при содержании 1,25 % и 3,75 % битума. А по критерию R_p оптимум получился другим. Авторы [**12**] вообще не рекомендуют определять оптимальное содержание добавляемого битума по этому критерию для смесей без цемента. Учитывая отсутствие во многих дорожных организациях России оборудования для проведения усталостных испытаний, критерий R_p следует пока сохранить.

ВЫВОДЫ

1. Смеси, стабилизированные вспененным битумом и битумной эмульсией, со временем прочнеют, причем наиболее сильно за первые 4 месяца по сравнению с 3-х недельным возрастом (на 23 %). Через два года прочность дорожной одежды выросла на 40 %.
2. Учитывая результаты исследований США, нормативные значения модуля упругости, приведенные в **табл. 1** для расчета по упругому прогибу, можно оставить пока без изменений за исключением модуля слоя, стабилизированного вспененным битумом, приняв его равным 1300 МПа.
3. Добавление цемента при битумной стабилизации не только способствует повышению прочности, но и уменьшает чувствительность регенерированного слоя к повышенным температурам.
4. Определение оптимального содержания добавляемого битума при подборе состава АГБ желательно осуществлять на основе результатов усталостных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способами холодной регенерации / Росавтодор. – М.: ГП «Информавтодор», 2002. – 56 с.*
2. *Бахрах Г.С. Повторное использование асфальтобетона / Г.С. Бахрах // Автомобильные дороги. – 2015. – № 10. – С. 52-55; № 11. – С. 52-55.*

3. *Классификация работ по капитальному ремонту, ремонту и содержанию автомобильных дорог / Росавтодор. – М.: ФГУП «Информавтодор», 2013. – 16 с.*
4. *Проектирование нежестких дорожных одежд: ОДН 218.046-01 / Росавтодор Минтранса РФ. – М.: ГП «Информавтодор», 2001. – 145 с.*
5. *Бахрах Г.С. Модель оценки срока службы дорожной одежды нежесткого типа / Г.С. Бахрах // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2002. – № 2. – С. 17-20.*
6. *Бахрах Г.С. Ремонт дорожных одежд методом холодной регенерации (Достижения и проблемы) / Г.С. Бахрах // Новости в дор. деле: науч.-техн. информ. сборник / ФГУП «Информавтодор». – М., 2005. – Вып. 1. – С. 1-17.*
7. *Mohammad L.N. Louisiana Experience with Foamed Recycled Asphalt Pavement Base Materials / L.N. Mohammad, M.Y. Abu-Farsakh, Z. Wu, Ch. Abadie // Transportation Research Record. – 2003. – No 1832. – PP. 17-24.*
8. *Diefenderfer B.K. Time-Dependent Structural Response of Full-Depth Reclamation / B.K. Diefenderfer, A.K. Apeagyei // Transportation Research Record. – 2011. – No 2253. – PP. 3-9.*
9. *Guide for Design of Pavement Structures / AASHTO, 1993.*
10. *Бахрах Г.С. К конструированию дорожной одежды с регенерированным слоем по методу структурных чисел / Г.С. Бахрах // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2015. – Вып. 34/2. – С. 223-233.*
11. *Amarh E.A. Nondestructive In Situ Characterization of Elastic Moduli of Full-Depth Reclamation Base Mixtures / E.A. Amarh, W. Fernandez-Gomez, G.W. Flintsch, B.K. Diefenderfer, B.F. Bowers // Transportation Research Record. – 2017. – No 2641. – PP. 1-11.*
12. *Gonzales A. Evaluation of Additional Laboratory Tests for Design of Full-Depth Reclamation Mixtures Using Foamed Bitumen / A. Gonzalez, F. Paniagua, G. Thenoux, C. Lopez // Transportation Research Record. – 2016. – No 2573. – PP. 40-48.*

L I T E R A T U R A

1. *Metodicheskie rekomendacii po vosstanovleniju asfal'tobetonnyh pokrytij i osnovanij avtomobil'nyh dorog sposobami holodnoj regeneracii / Rosavtodor. – M.: GP «Informavtodor», 2002. – 56 s.*
2. *Bahrah G.S. Povtornoe ispol'zovanie asfal'tobetona / G.S. Bahrah // Avtomobil'nye dorogi. – 2015. – # 10. – S. 52-55; # 11. – S. 52-55.*

3. *Klassifikacija rabot po kapital'nomu remontu, remontu i soderzhaniju avtomobil'nyh dorog / Rosavtodor. – M.: FGUP «Informavtodor», 2013. – 16 s.*
4. *Proektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd: ODN 218.046-01 / Rosavtodor Mintransa RF. – M.: GP «Informavtodor», 2001. – 145 s.*
5. *Bahrah G.S. Model' ocenki sroka sluzhby dorozhnoj odezhdy nezhestkogo tipa / G.S. Bahrah // Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli. – 2002. – # 2. – S. 17-20.*
6. *Bahrah G.S. Remont dorozhnyh odezhd metodom holodnoj regeneracii (Dostizhenija i problemy) / G.S. Bahrah // Novosti v dor. dele: nauch.-tehn. inform. sbornik / FGUP «Informavtodor». – M., 2005. – Vyp. 1. – S. 1-17.*
7. *Mohammad L.N. Louisiana Experience with Foamed Recycled Asphalt Pavement Base Materials / L.N. Mohammad, M.Y. Abu-Farsakh, Z. Wu, Ch. Abadie // Transportation Research Record. – 2003. – No 1832. – PP. 17-24.*
8. *Diefenderfer B.K. Time-Dependent Structural Response of Full-Depth Reclamation / B.K. Diefenderfer, A.K. Apeagyei // Transportation Research Record. – 2011. – No 2253. – PP. 3-9.*
9. *Guide for Design of Pavement Structures / AASHTO, 1993.*
10. *Bahrah G.S. K konstruirovaniju dorozhnoj odezhdy s regenerirovannym sloem po metodu strukturnyh chisel / G.S. Bahrah // DOROGI I MOSTY. – 2015. – Vyp. 34/2. – S. 223-233.*
11. *Amarh E.A. Nondestructive In Situ Characterization of Elastic Moduli of Full-Depth Reclamation Base Mixtures / E.A. Amarh, W. Fernandez-Gomez, G.W. Flintsch, B.K. Diefenderfer, B.F. Bowers // Transportation Research Record. – 2017. – No 2641. – PP. 1-11.*
12. *Gonzales A. Evaluation of Additional Laboratory Tests for Design of Full-Depth Reclamation Mixtures Using Foamed Bitumen / A. Gonzalez, F. Paniagua, G. Thenoux, C. Lopez // Transportation Research Record. – 2016. – No 2573. – PP. 40-48.*

ROAD PAVEMENT STRUCTURE WITH REGENERATED LAYER

Ph. D. (Tech.) ***G.S. Bakhrakh***
(FAI «ROSDORNII»)
Contact information: bakhrakh35@mail.ru

The standard values of the modulus of elasticity of pavement regenerated by cold method are considered. The results of modulus of elasticity changes on experimental road sections regenerated in the State of Virginia

(USA) for eight years are presented. It is revealed that the modulus of elasticity of the layer regenerated using bitumen emulsion and foamed bitumen increases over time.
Key words: *bitumen emulsion, foamed bitumen, modulus of elasticity, structural coefficient, cold regeneration.*

Рецензент: д-р техн. наук А.В. Руденский (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 24.05.2018 г.