

7. Roels S. Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone. D/2000/7515/33. Katholieke Universiteit Leuven – Faculteit Toegepaste Wetenschappen. Leuven (Belgium), 2000, p. 213.
8. Roels S., Vandersteen K., Carmeliet J. Measuring and simulating moisture uptake in a fractured porous medium. *Advances in Water Resources* 2003, 26, 237-246.
9. Weselowska M. Wpływ krętności kapilar na process wnikania wody w materiał ceramiczny. Materiały Konferencyjne IX Polskiej Konferencji Naukowo-Technicznej "Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce. Łódź, 2003, s. 705-711.
10. Афонин А.В., Никитин В.И., Шабанов Д.Н. Оценка параметров влагопроводности строительных материалов для теплотехнических расчетов // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2003. № 2(20). – С. 98-100.
11. Józwiak J., Podgórski J. Statystyka od podstaw. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 2001, 550 s.
12. Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. – М.: Стройиздат, 1977
13. Piltz G., Schmidt H., Hilker E., Hesse E. Untersuchung des sintervorganges im grobkeramischen Scherbon durch Verfolgung der Porengrößen – und Festigkeitsentwicklung "Sprechsaal – für Keramik, Glas, Baustoffe", 1976, N1, 4-12, 109, N3, 128-139.
14. Римкевич И.М., Мартинович Н.И., Хартанович Л.В. Исследование влияния температуры обжига на пористую структуру керамики. Стекло, ситаллы и силикаты. Вып. 6. Минск: Вышэйшая школа, 1977, с. 136-140.

УДК 624.012.45

Радзишевски П.

СОПРОТИВЛЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО АСФАЛЬТА СТАРЕНИЮ И УСТАЛОСТНОМУ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ

1. Введение

Диапазон температур при которых могут быть определены свойства асфальта представляет собой характеристику дорожного покрытия, включая температуру в процессе приготовления и укладки. В Польше диапазон эксплуатационных температур предполагается от – 40 °С (минимальная температура поверхности дорожного покрытия в зимний период) до 70 °С.

Асфальт подвергается воздействию высоких температур в процессе приготовления минерально-асфальтовой смеси и при ее укладке. Диапазон технологических температур варьируется от 90 °С (минимальная температура уплотнения смеси) до 220 °С (максимальная температура некоторых видов минерально-асфальтовых смесей). Следовательно, расчетный интервал температур, при которых могут быть определены свойства, составляет 220 °С [1, 5].

В процессе приготовления асфальтовой смеси и при эксплуатации дорожного покрытия, асфальт подвергается старению вследствие ряда причин:

- окисление,
- испарение летучих веществ – незначительный показатель при долговременном старении,
- полимеризация – нет научного объяснения влияния этого фактора на процесс старения,
- тиксотропность,
- сепарация – раздельная абсорбция наиболее легких компонентов частицами композита большей пористости.

В результате старения, вызванного пенетрацией, верхний порог размягчения и коэффициент пенетрации асфальта подвергаются процессу отвердевания. Кратковременное старение имеет место при хранении асфальта и его приготовлении, равно как и при хранении, транспортировке и укладке смеси. Длительная эксплуатация дорожного покрытия приводит к процессу длительного старения асфальта.

Интенсификация автомобильных перевозок в Польше в течении последнего десятилетия и суровый климат являются определяющими факторами применения модифицированного асфальта (эластомер SBS, пластомер EVA, отходы автомобильных покрышек) в дорожном строительстве.

Улучшение вязко-упругих свойств модифицированного асфальта в сравнении с немодифицированным обосновывалось неоднократно, но все еще ощущим недостаток исследований свойств модифицированного асфальта.

Статья содержит результаты исследований, главной целью

которых являлась оценка влияния старения на свойства модифицированного асфальта и сопротивление усталостному трещинообразованию смесей с модифицированным асфальтом.

2. Материалы и методология исследований асфальта, модифицированного эластомером SBS

70 % асфальта, произведенного на Гданьском заводе используется в качестве основы для модифицирования. В качестве модификаторов используются следующие добавки:

- Kraton D 1101 – термопластовый эластомер, полимерный тип: чистый SBS, содержание группы стирола – 31 %,
- Kraton D 1116 – термопластовый эластомер, полимерный тип: радиальный SBS, содержание группы стирола – 23 %,
- Kraton D 1184 – термопластовый эластомер, полимерный тип: радиальный SBS, содержание группы стирола – 30 %,
- Kraton D 1192 – термопластовый эластомер, полимерный тип: линейный SBS, содержание группы стирола – 30 %,
- EVA – термопластовый эластомер, винил-этил ацетат,
- мелкие включения использованных автомобильных покрышек.

В процессе модификации согласно [2], базовый асфальт 70 реп был разогрет до 185 °С. После этого в течении 1 минуты внесли проградуированные добавки и 60 минут подвергли скоростному перемешиванию. Асфальт, модифицированный резиной покрышек подвергался медленному перемешиванию. Были внесены добавки в количестве 3% 5% и 7% полимерных модификаторов; 15% и 17% резины покрышек. В результате были получены следующие типы асфальта: 1101 3%, 1101 5%, 1101 7% (асфальт, модифицированный эластомером Kraton D 1101), 1116 3%, 1116 5%, 1116 7% (асфальт, модифицированный эластомером Kraton D 1116), 1184 3%, 1184 5%, 1184 7% (асфальт, модифицированный термопластовым эластомером Kraton D 1184), 1192 3%, 1192 5%, 1192 7% (асфальт, модифицированный термопластовым эластомером Kraton D 1192), EVA 3%, EVA 5%, EVA 7% (асфальт, модифицированный термопластовым эластомером винил-этил ацетат), Gu 15% (асфальт, модифицированный мелкой крошкой резины покрышек) и Gu 17% (асфальт, модифицированный слоем резины покрышек).

Все типы модифицированного асфальта вначале были подвергнуты кратковременному технологическому старению, а затем – длительному старению. Моделирование условий кратковременного старения в лабораторных условиях было реали-

Радзишевски Петр, профессор Политехники Белостоцкой, Республика Польша.

зовано на основании TFOT-метода (нагрев тонкой пленки). Часть образцов в процессе исследования была в дальнейшем исследована в условиях старения, реализованного RTFOT-методом (прокатка нагреваемой тонкой пленки). После процесса старения все образцы были охлаждены до 5°C.

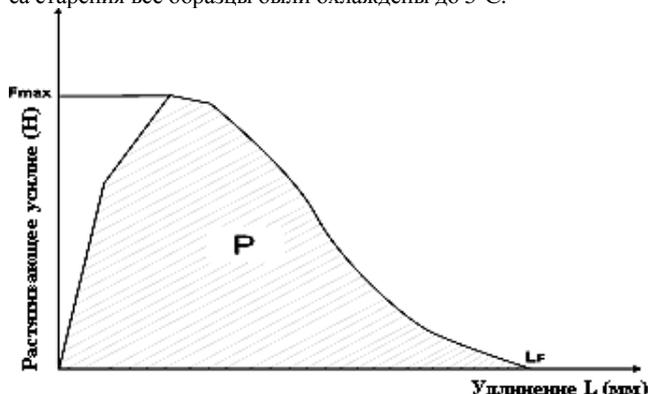


Рис. 1. Диаграмма испытаний на ударную вязкость.

Длительное старение осуществлялось в PAV (камера старения под давлением). Образцы асфальта были нагреты под давлением 2,1 кПа до 100 °С (температура, задаваемая для умеренного климата). Время нагрева составляло 20 часов. После нагрева давление постепенно уменьшили, чтобы избежать вспучивания. После этого образцы вновь нагрели до 163 °С для очищения асфальта.

Все образцы из модифицированного асфальта были испытаны после старения – кратковременного и длительного. Были определены следующие параметры:

- точка размягчения R&B,
- пенетрация в зависимости от температуры (при 25, 15 и 5°C),
- ударная вязкость в зависимости от температуры (при 25, 15 и 5°C) и скорости растяжения (10, 30 и 50 мм/мин),
- Fraass предел прочности,
- динамическая вязкость в приборе Брокфилда.

В процессе испытания на ударную вязкость оценивались работа деформаций (P) и максимальная растягивающая сила F_{max} (рис. 1).

Асфальтобетон с грануляцией минералов 0/12,8 был выбран для испытаний на сопротивление усталостному трещинообразованию. Были приготовлены модифицированные асфальтовые смеси (эластомер SBS - 5%, пластиномер EVA -6 %, тонкогранулированная крошка использованных автомобильных покрышек - 15% и модифицированная слоем резины от использованных покрышек – 17% + 3% пластификатора), которые были приготовлены в специальной емкости. Смеси уплотнялись с помощью статических и вибрационных катков. Уплотнение с помощью катков включало использование весовой и объемной калькуляции для определения количества материала для уплотнения, обеспечивающего получение форм заданного объема. После приготовления все смеси нагревались в печи в течении 4 часов при 135 °С, в соответствии с процессом кратковременного старения [3]. Для асфальтовых смесей были определены: связность по Маршаллу, модуль жесткости по испытаниям неосевого растяжений (бразильский метод) и усталостная долговечность.

Испытания на усталостную долговечность были проведены с помощью испытательной установки Шенка. Балочные образцы асфальта (450x25x25 мм) были помещены в термокамеру при 10 °С и подвергнуты четырехточечному изгибу с постоянным по величине приростом деформаций.

Модуль жесткости (S_0) определяется по испытаниям на неосевоe растяжение, который и был использован в данном исследовании. Температура измерялась в диапазоне от -10 °С

до 25 °С. Модуль жесткости был определен в течении пяти повторяющихся перемещений после пятого последовательно-го импульса нагрузки. Максимальное напряжение задавалось таким образом, чтобы вертикальное перемещение составляло по крайней мере 5 мкм. Время прироста напряжений от 0 до максимального значения задавалось $124 \pm 3 \text{ мкс}$ [4].

3. Изменение вязкоупругих свойств модифицированного асфальта в процессе старения

Полученные результаты исследования изменения рассматриваемых свойств (пенетрация, точка размягчения, максимальное растягивающее усилие, работа деформаций, вязкость и эластичность) в процессе кратковременного и длительного старения приведены в таблицах 1+3.

Результаты, приведенные в таблицах, показывают, что старение значительно влияет на свойства испытываемых типов асфальта для всех рассматриваемых параметров, за исключением точки размягчения и эластичности для асфальта с 5% и 7% содержанием полимерных добавок и для асфальто-резины.

Для изучения влияния старения на предел прочности был проведен дисперсионный анализ [6]. В результате статистического анализа было зафиксировано значительное и весьма значительное влияние старения на следующие параметры: пенетрацию, работа деформаций, вязкость, точка размягчения и эластичность. Влияние старения на максимальное растягивающее усилие – незначительно. Значительное влияние старения, типа и количества добавок на изменение предела прочности отражено в результатах, представленных на рис. 2. и рис. 3.

На основании корреляционного анализа, наибольшая взаимосвязь была установлена между пределом прочности и работой деформаций по результатам испытаний на ударную вязкость при 5°C и скорости растяжения 10 мм/мин (P_{SC10}) и между пределом прочности и работой деформаций при 25°C и скорости растяжения 50 мм/мин (P_{SC50}). На основании проведенных исследований и статистического анализа можно сделать вывод, что расчет работы деформаций может быть использован при определении для асфальта минимального сопротивления растрескиванию от температуры (для первого этапа исследований в качестве критерия использовался предел прочности).

4. Исследование сопротивления усталостному трещинообразованию модифицированных асфальтовых смесей

Усталость – явление разрушения при повторяющихся или пульсационных нагрузках с максимальным значением ниже предела прочности материала на растяжение [3, 5]. На практике, эластичное дорожное покрытие, воспринимающие нагрузки от автотранспорта, подвергается длительному изгибу с деформациями порядка $30-200 \cdot 10^{-6}$ циклов нагружения (при стандартной нагрузке от колеса). Усталостный отказ напрямую связан с изменениями, происходящими в материале, которые ведут к образованию микротрещин и последующим нарушением стабильности структуры. Развитие усталостного разрушения происходит в результате двух процессов: возникновение повреждения и развития повреждения.

Большинство исследований усталости наводят на предположение, что реакция асфальтобетона на повторяющиеся нагрузки может быть определена следующим выражением:

$$N_f = a \cdot \left(\frac{1}{\xi_0} \right)^b, \quad (1)$$

где ξ_0 – величина деформаций от повторяющегося растяжения,

a, b – константы материала,

N_f – число нагружений до разрушения.

Таблица 1. Изменение свойств асфальта, модифицированного Kraton D 1192, после кратковременного и длительного старения

Свойства	70 pen + 1192 3%			70 pen + 1192 5%			70pen + 1192 7%			
	без старения	после старения	старение под давлением	без старения	после старения	старение под давлением	без старения	после старения	старение под давлением	
Пенетрация 0,1 мм	25°C	57,0	46,7	25,7	54,3	47,5	26,1	51,2	50,9	26,7
	15°C	21,0	16,9	11,6	22,1	18	11,4	28,8	25,5	11
	5°C	7,5	6,3	4,7	8,9	7,5	4,9	10,8	12,5	5,3
Точка размягчения [°C]	52,4	57,2	65,3	65,3	68,5	70,9	76,6	78,1	80,2	
Предел прочности	-25	-19	-17	-23	-17	-15	-21	-14	-12	
Вязкость [мм]	25°C	811	1000	413	1000	906	438	712	631	405
	15°C	878	460	155	1000	439	252	749	701	295
	5°C	145	156	40,8	240	160	30,5	453	296	-
Максимальное растягивающее усилие [Н]	25°C	2,1	4,3	20	4,4	4,6	16	5,3	8,8	21
	15°C	24	30	98	30	38	93	41	38	103
	5°C	155	171	286	176	187	326	167	198	-

Таблица 2. Изменение свойств асфальта, модифицированного Kraton D 1116, после кратковременного и длительного старения

Свойства	70pen + 1116 3%			70 pen + 1116 5%			70pen + 1116 7%			
	без старения	после старения	старение под давлением	без старения	после старения	старение под давлением	без старения	после старения	старение под давлением	
Пенетрация 0,1 мм	25°C	52,5	42,3	28,9	51,4	47	30,9	49	45	27,2
	15°C	21	18	9,1	22,8	19,8	11,5	23	19,5	10,1
	5°C	8,7	5,85	4,1	8,25	7,7	5,7	8,8	8,1	4,7
Точка размягчения [°C]	55,3	58,8	63,9	65,4	71,5	74,9	70,8	77,6	83,4	
Предел прочности	-15	-13	-11	-17	-15	-13	-19	-17	-15	
Вязкость [мм]	25°C	1000	1000	525	1000	1000	588	885	872	328
	15°C	720	650	251	902	680	400	854	505	226
	5°C	354	120	-	378	138	88	522	314	58
Максимальное растягивающее усилие [Н]	25°C	3,2	4	16	5,3	5,2	11	7,7	7,3	29
	15°C	22	31	61	29	36	57	46	57	87
	5°C	155	178	-	125	186	217	190	185	245

В данном исследовании представлены результаты испытаний на усталость при изгибе (четырёхточечный изгиб) с использованием машины, контролирующей деформации (испытательная установка Шенка). Более подробная информация об испытаниях представлена в статье [5].

Условия испытаний:

- температура $T = 10^{\circ}\text{C}$,
- частота $f = 9,8$ Гц,
- закон приложения нагрузки – синусоидальный.

Для каждой смеси и соотношения $N_f - \xi_0$ была выполнена линейная регрессия в следующем виде:

$$\log N_f = a_1 + b_1 \cdot \log \xi_0 \quad (2)$$

Полученные результаты:

традиционный асфальтобетон

$$N_f = 8,128 \cdot 10^{16} \cdot \xi_0^{-5,00} \quad R^2 = 0,98 \quad (3)$$

SBS-модифицированный асфальтобетон

$$N_f = 1,698 \cdot 10^{17} \cdot \xi_0^{-4,84} \quad R^2 = 0,87 \quad (4)$$

EVA- модифицированный асфальтобетон

$$N_f = 1,698 \cdot 10^{24} \cdot \xi_0^{-7,67} \quad R^2 = 0,89 \quad (5)$$

асфальтобетон, модифицированный тонкогранулированной резиновой крошкой

$$N_f = 5,370 \cdot 10^{19} \cdot \xi_0^{-5,66} \quad R^2 = 0,84 \quad (6)$$

асфальтобетон, модифицированный слоем резины

$$N_f = 1,445 \cdot 10^{18} \cdot \xi_0^{-5,00} \quad R^2 = 0,99 \quad (7)$$

В итоге, можно отметить, что модифицированные смеси обладают большим сопротивлением усталости, чем традиционные; особенно при модифицировании резиной. Сравнение экспериментальных данных для каждого типа модификации ($\xi_0 = 300$ мкм/м) дает возможность классифицировать их согласно значений сопротивления усталости:

- традиционный асфальтобетон – 1,0;
- SBS – модифицированный асфальтобетон – 5,2,
- EVA – модифицированный асфальтобетон – 5,1,
- асфальтобетон, модифицированный резиновой крошкой – 15,3;
- асфальтобетон, модифицированный слоем резины – 17,8.

Таблица 3. Изменение свойств исходного асфальта и асфальта, модифицированного крошкой покрышек после кратковременно-го и длительного старения

Свойства	70 pen			70 pen + 15%Gu			
	без старения	после старения	старение под давлением	без старения	после старения	старение под давлением	
Пенетрация 0,1 мм	25°C	67,7	51,3	31,6	50,1	44,2	35,5
	15°C	28,7	23,6	12,2	21,7	18,5	16,5
	5°C	6,6	5,9	5,6	9,86	8,3	8,0
Точка размягчения [°C]	48,2	53,3	57,9	60,2	61,8	64,7	
Предел прочности	-11	-8	-4	-19	-17	-14	
Вязкость [мм]	25°C	> 1000	> 1000	> 1000	153	148	138
	15°C	> 1000	765	62	105	103	98
	5°C	197	5,9	-	74,8	67	55
Максимальное растягивающее усилие [Н]	25°C	1,4	2,7	11,5	2,8	3,5	13
	15°C	15	29	87	23	35	54
	5°C	141	181	-	90	149	193

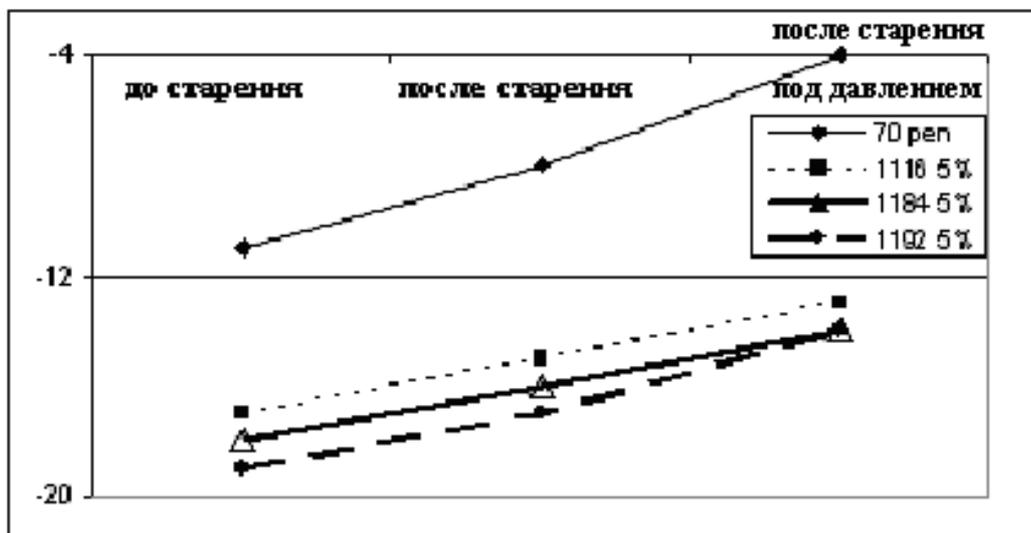


Рис. 2. Влияние старения на изменение предела прочности асфальта, модифицированного SBS (5%).

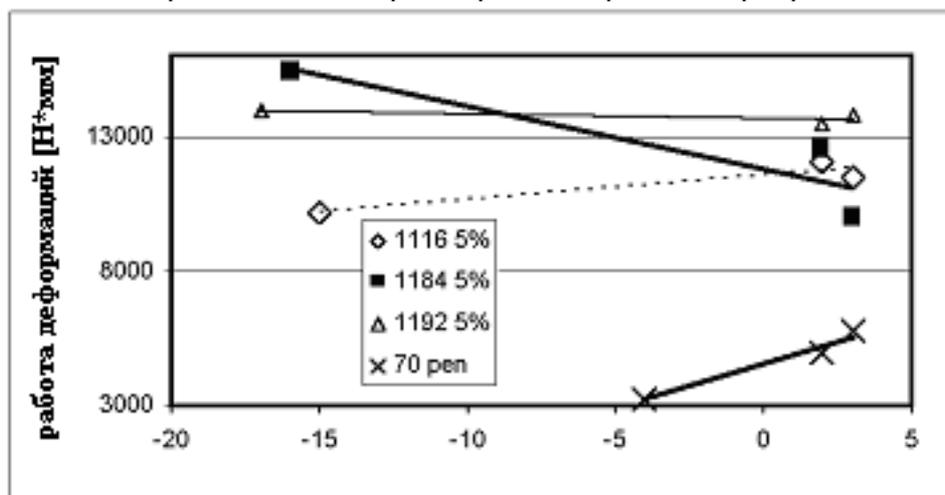


Рис. 3. Зависимость работы деформаций от предела прочности для асфальта, модифицированного SBS (5%).

Выполнено значительное число исследований усталости модифицированных асфальтовых смесей; построены регрессионные модели, базирующиеся на теоретических параметрах, описывающих свойства и поведение битумов и битумных

мастик. Одна из моделей, описывающих усталость асфальтовых смесей, основана на величине пластической работы, определенной при испытании на ударную вязкость. Проведенные

исследования и полученные результаты подтверждают адекватность выбранной модели [5].

Доказана устойчивая корреляционная зависимость между начальным модулем жесткости (одним из параметров, описывающих усталость) и модуль упругости (определенный при испытаниях на неосевое растяжение). Аналогичная зависимость была получена для пластичной работы и работы деформаций (определенных при испытании на ударную вязкость).

После подстановки работы деформаций и модуля жесткости в формулу, описывающую регрессионную модель [5], получаем следующее выражение для описания усталости асфальтовой смеси:

$$N = 1,840 \cdot 10^{34} \cdot \xi_0^{-6,450} \cdot S_0^{-4,611} \cdot P_{RTFOT}^{1,354} \quad (8)$$

где ξ_0 – амплитуда начальных деформаций дорожного покрытия,

S_0 – модуль жесткости по результатам испытаний на неосевое растяжение,

P_{RTFOT} – работа деформаций после старения (прокатки нагреваемой тонкой пленки) при 5 °С.

Для формулы (8) коэффициент регрессии R-квадрат равен 0,95. Эта формула отражает процесс усталости для минерально-асфальтовых смесей с модифицированным вяжущим в зависимости от работы деформаций, определяемой после кратковременного старения. Для асфальтовых смесей с модифицированным вяжущим, характеризующимся высокими значениями работы деформаций, наблюдается более высокий порог усталости.

5. Выводы

На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- Процесс старения значительно влияет на свойства модифицированных асфальтовых смесей (особенно длительное старение под давлением). Степень влияния зависит от типа модификатора.

- Модифицированные асфальтовые смеси обладают меньшей чувствительностью к влиянию старения в сравнении с немодифицированными, относительно их склонности к растрескиванию при низких температурах и под влиянием усталости.
- Работа деформаций, определенная при 5°С (P_{5C10}) и при 25°С (P_{25C50}) может быть использована при оценке сопротивления асфальтовых смесей растрескиванию при низких температурах в аспекте предела прочности.
- Модифицирование традиционного асфальта улучшает усталостную стойкость асфальтобетонного дорожного покрытия. Результаты исследований показывают увеличение сопротивления усталости для асфальтобетона, модифицированного резиновой крошкой.
- Сопротивление усталостному трещинообразованию можно адекватно оценить на базе работы деформаций после модификации асфальта прокаткой нагреваемой тонкой пленки. Величина работы деформаций значительно влияет на сопротивление усталостному трещинообразованию (особенно для асфальтов с высоким значением работы деформаций).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gawel I., Kalabińska M., Piłat J.: „Asfalty drogowe”, WKŁ, Warszawa 2001.
2. Shell Chemicals, „The preparation of blends of KRATON D and bitumen”, Bulletin, TPE 6.2.3, 1994
3. Strategic Highway Research Program, Contract A-003A (SHRP A-003A) ‘Performance Related Testing and Measuring of Asphalt Aggregate Interactions and Mixtures’, Quarterly Report, University of California, Berkely, 1990-93.
4. Kalabinska M., Pilat J., Radziszewski P.: ‘Technologia materialow i nawierzchni drogowych’, Warszawa 2003.
5. Radziszewski P. ‘Modelowanie trwalosci zmeczeniowej modyfikowanych kompozytow mineralno-asfaltowych’, Politechnika Bialostocka, Bialystok 1997.
6. Ahrens H.: “Analiza wariancji”. PWN, Warszawa 1970.