

5. Asphalt cold mix manual // Manual series No. 14// Asphalt Institute. Lexington, KY, 1997

УДК 625.855.3.033

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

**Кравченко С.Е., канд. техн. наук,
Вермениук В.В., канд. физ.-мат. наук**
*Белорусский национальный технический университет
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Введение

Опыт эксплуатации асфальтобетонных покрытий показывает, что даже при наличии исходных дорожно-строительных материалов с заданными свойствами, не всегда удается добиться стабильных физико-механических показателей и требуемой долговечности асфальтобетона, из-за целого ряда факторов, в том числе и из-за отсутствия соответствующих критериев его свойств отражающих реальные условия работы асфальтобетона в покрытии.

В настоящее время качества асфальтобетона оценивается по показателям в соответствии с СТБ 1033, определяемым по методикам в соответствии с СТБ 1115. К основным из этих показателей следует отнести предел прочности при сжатии ($R_{50} - T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$); прочность на раскол ($R_0 - T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$); водонасыщение (W); плотность (ρ_a); пористость (V_o); остаточная пористость (V_a); индекс трещиностойкости (I_T). Анализ режимов испытания указанных показателей указывает на то, что они в различной степени и не в полной мере отражают реальную работу материала в покрытии, что тем самым не позволяют в достаточной степени судить о его прогнозируемой долговечности. Подтверждением этому может служить тот факт, что процесс начало трещинообразования в покрытии приходится уже на первые годы эксплуатации, но при этом материал покрытия еще удовлетворяет по $R_i \gg R_{\text{норм}}$. В связи с этим при подборе состава асфальтобетона, в дополнение к стандартным показателям свойств асфальтобетона, следует учитывать также и нестандартные

показатели, что позволит наиболее реально учитывать механизм поведения и разрушения асфальтобетона в процессе эксплуатации. К таковым, на наш взгляд, следует отнести, например, усталостную повреждаемость и прочность на растяжение при изгибе. Оценки эффективности тех или иных показателей, характеризующих усталостную долговечность асфальтобетона, проводилась по результатам математического планирования эксперимента, базирующегося на активном эксперименте [2, 3] при оптимизации состава асфальтобетона – установление допустимых отклонений содержания всех компонентов смеси и определение наиболее достоверного критерия оценки свойств асфальтобетона в наибольшей степени отражающего реальные условия работы асфальтобетона.

Экспериментально-статистическая модель усталостной повреждаемости и ее анализ

Для реализации лабораторного эксперимента с целью получения связи «состав-свойство», для асфальтобетона типа ЦМС_ц-10 выбран план с общим числом точек векторного пространства, равным N=26. В планировании эксперимента, значения соответствующие определенным уровням варьирования факторов, выражаются в кодированных величинах. В таблице 1 показаны значения и уровни отобранных факторов в кодированных величинах.

Таблица 1

Значения и уровни отобранных факторов в кодированных величинах

| Обозначение факторов | Единица измерения | Нижний уровень (-1) | Основной уровень (0) | Верхний уровень (+1) | Интервал варьирования |
|---|-------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| X ₁ – гранитный щебень фракции 5–10 мм | % | 65 | 70 | 75 | 5 |
| X ₂ – минеральный порошок неактивированный | % | 8 | 10 | 12 | 2 |
| X ₃ – битум БНД 60/90 | % | 6,1 | 6,3 | 6,5 | 0,2 |

Влияние составляющих асфальтобетона, таких как щебень фракции 5 – 10 мм (X1), минеральный порошок неактивированный (X2), битум БНД 60/90(X3) и их количества на стандартные и нестандартные показатели его свойств, оценивалось по экспериментально-статистическим моделям, полученным на основании анализа физико-механических характеристик асфальтобетона (таблица 2) в системе «Statist». При этом каждая модель проходила регрессионный анализ, проверку адекватности.

Таблица 2

Физико-механические характеристики асфальтобетона
типа ЦМСЦ-10

| экспери | Рср | W | Vпор | Vост | R0 | R10 | R20 | Ит | Ru | D20 |
|---------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 2,43 | 3,10 | 17,16 | 4,73 | 2,47 | 6,92 | 6,05 | 0,56 | 1,54 | 57,75 |
| 2 | 2,44 | 1,76 | 16,85 | 3,47 | 2,31 | 6,34 | 4,37 | 0,62 | 1,48 | 55,27 |
| 3 | 2,46 | 0,55 | 16,43 | 1,80 | 2,40 | 4,40 | 3,42 | 0,63 | 1,95 | 58,90 |
| 4 | 2,43 | 1,26 | 17,16 | 5,50 | 2,25 | 7,41 | 5,40 | 0,72 | 1,95 | 53,37 |
| 5 | 2,44 | 1,95 | 16,85 | 4,22 | 2,24 | 7,37 | 5,27 | 0,61 | 1,65 | 49,12 |
| 6 | 2,46 | 1,06 | 16,43 | 2,87 | 2,17 | 5,56 | 4,95 | 0,62 | 2,19 | 51,51 |
| 7 | 2,43 | 0,36 | 17,16 | 2,31 | 2,13 | 4,78 | 3,28 | 0,68 | 2,15 | 47,79 |
| 8 | 2,44 | 0,95 | 16,85 | 1,79 | 2,48 | 6,02 | 3,96 | 0,49 | 1,57 | 43,07 |
| 9 | 2,46 | 0,27 | 16,43 | 1,52 | 2,43 | 5,09 | 3,51 | 0,59 | 2,16 | 45,50 |
| 10 | 2,43 | 1,78 | 17,01 | 1,31 | 2,60 | 7,35 | 8,80 | 0,12 | 1,66 | 48,70 |
| 11 | 2,44 | 1,45 | 16,84 | 2,49 | 2,65 | 8,01 | 5,53 | 0,58 | 1,88 | 46,49 |
| 12 | 2,46 | 1,07 | 16,64 | 3,66 | 2,78 | 8,70 | 2,61 | 1,05 | 2,24 | 45,54 |
| 13 | 2,43 | 1,77 | 17,01 | 1,28 | 2,55 | 7,58 | 8,72 | 0,13 | 1,74 | 46,09 |
| 14 | 2,44 | 1,61 | 16,84 | 2,50 | 2,63 | 8,36 | 5,72 | 0,57 | 1,93 | 43,43 |
| 15 | 2,46 | 1,31 | 16,64 | 3,76 | 2,75 | 9,11 | 2,94 | 1,03 | 2,30 | 42,09 |
| 16 | 2,43 | 1,56 | 17,01 | 1,63 | 2,50 | 7,00 | 8,14 | 0,10 | 1,79 | 44,23 |
| 17 | 2,44 | 1,56 | 16,84 | 1,98 | 2,63 | 7,98 | 5,30 | 0,53 | 1,94 | 41,28 |
| 18 | 2,46 | 1,33 | 16,64 | 3,42 | 2,77 | 8,88 | 2,58 | 1,00 | 2,32 | 39,70 |
| 19 | 2,44 | 1,61 | 17,15 | 3,46 | 2,73 | 6,40 | 6,08 | 0,64 | 1,86 | 54,11 |

Продолжение таблицы 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 20 | 2,44 | 0,80 | 16,83 | 2,56 | 2,54 | 5,70 | 4,13 | 0,62 | 1,91 | 53,40 |
| 21 | 2,46 | 0,13 | 16,39 | 1,69 | 3,05 | 6,93 | 5,16 | 0,52 | 2,24 | 56,03 |
| 22 | 2,43 | 1,37 | 17,00 | 1,24 | 2,58 | 6,32 | 8,28 | 0,15 | 1,74 | 50,00 |
| 23 | 2,44 | 1,14 | 16,83 | 2,51 | 2,61 | 6,99 | 4,99 | 0,61 | 1,98 | 47,64 |
| 24 | 2,46 | 0,85 | 16,63 | 3,83 | 2,78 | 8,10 | 2,32 | 1,07 | 2,32 | 46,17 |
| 25 | 2,44 | 1,40 | 17,15 | 3,57 | 2,66 | 7,87 | 5,73 | 0,74 | 2,14 | 47,99 |
| 26 | 2,43 | 1,45 | 17,00 | 1,18 | 2,54 | 6,59 | 8,19 | 0,15 | 1,81 | 47,43 |
| 27 | 2,44 | 1,35 | 16,83 | 2,46 | 2,60 | 7,33 | 5,13 | 0,59 | 2,02 | 44,48 |
| 28 | 2,46 | 1,12 | 16,63 | 3,84 | 2,75 | 8,44 | 2,58 | 1,05 | 2,38 | 42,49 |
| 29 | 2,46 | 0,74 | 16,39 | 1,72 | 2,91 | 8,32 | 6,58 | 0,50 | 2,51 | 44,83 |
| 30 | 2,43 | 1,42 | 17,00 | 1,74 | 2,43 | 5,92 | 7,55 | 0,12 | 1,85 | 46,50 |
| 31 | 2,44 | 1,45 | 16,83 | 2,14 | 2,54 | 6,81 | 4,62 | 0,56 | 2,03 | 43,12 |
| 32 | 2,46 | 1,24 | 16,63 | 3,67 | 2,70 | 8,03 | 2,09 | 1,02 | 2,41 | 40,77 |
| 33 | 2,44 | 0,84 | 17,15 | 1,82 | 2,22 | 5,17 | 3,55 | 0,68 | 2,30 | 47,75 |
| 34 | 2,44 | 1,42 | 16,83 | 1,27 | 2,48 | 5,54 | 3,54 | 0,49 | 2,00 | 42,72 |
| 35 | 2,46 | 0,73 | 16,39 | 1,42 | 2,81 | 7,04 | 4,68 | 0,52 | 2,61 | 42,06 |
| 36 | 2,43 | 1,19 | 16,99 | 1,43 | 2,54 | 5,33 | 7,75 | 0,16 | 1,62 | 53,30 |
| 37 | 2,45 | 1,05 | 16,82 | 2,77 | 2,49 | 5,76 | 4,26 | 0,64 | 1,84 | 50,17 |
| 38 | 2,46 | 0,85 | 16,61 | 4,22 | 2,62 | 7,03 | 1,68 | 1,11 | 2,14 | 47,58 |
| 39 | 2,43 | 1,21 | 16,99 | 1,35 | 2,50 | 5,46 | 7,54 | 0,16 | 1,66 | 51,09 |
| 40 | 2,45 | 1,17 | 16,82 | 2,69 | 2,47 | 5,91 | 4,25 | 0,62 | 1,87 | 47,24 |
| 41 | 2,46 | 0,99 | 16,61 | 4,18 | 2,59 | 7,14 | 1,77 | 1,09 | 2,20 | 44,00 |
| 42 | 2,43 | 1,21 | 16,99 | 1,18 | 2,34 | 4,52 | 6,73 | 0,13 | 1,68 | 51,39 |
| 43 | 2,45 | 1,26 | 16,82 | 2,60 | 2,36 | 5,07 | 3,56 | 0,60 | 1,87 | 46,98 |
| 44 | 2,46 | 1,08 | 16,61 | 4,22 | 2,48 | 6,37 | 2,07 | 1,08 | 2,23 | 43,25 |
| 45 | 2,44 | 1,68 | 17,13 | 3,10 | 3,20 | 7,78 | 7,03 | 0,48 | 1,45 | 59,61 |
| 46 | 2,45 | 1,36 | 16,80 | 2,47 | 2,42 | 4,97 | 3,52 | 0,61 | 1,44 | 55,81 |
| 47 | 2,46 | 1,18 | 16,36 | 2,32 | 2,78 | 7,39 | 5,26 | 0,57 | 1,45 | 52,59 |
| 48 | 2,44 | 0,89 | 17,13 | 2,82 | 3,27 | 8,75 | 6,22 | 0,57 | 1,52 | 54,30 |
| 49 | 2,45 | 1,06 | 16,80 | 1,79 | 2,59 | 5,73 | 3,85 | 0,58 | 1,43 | 46,67 |
| 50 | 2,46 | 0,66 | 16,36 | 1,58 | 2,73 | 7,53 | 5,81 | 0,60 | 1,68 | 40,11 |
| 51 | 2,44 | 0,46 | 17,13 | 2,78 | 2,51 | 4,51 | 3,19 | 0,53 | 1,58 | 61,93 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 52 | 2,45 | 0,98 | 16,80 | 2,12 | 2,13 | 4,23 | 2,22 | 0,54 | 1,39 | 51,73 |
| 53 | 2,46 | 0,53 | 16,36 | 2,61 | 2,25 | 3,97 | 2,66 | 0,70 | 1,86 | 43,13 |

Была проанализирована экспериментально-статистическая модель усталостной повреждаемости D_{20} от исследуемых факторов:

$$\begin{aligned}
 D = & 1651,1318 + 10,2963 \cdot x_1^2 - 13,4656 \cdot x_2^2 + 1352,87 \cdot x_3^2 + \\
 & + 11,1688 \cdot x_1 \cdot x_2 - 250,759 \cdot x_1 \cdot x_3 - 75,6635 \cdot x_2 \cdot x_3 - \\
 & - 0,0536884 \cdot x_1^3 - 0,0485808 \cdot x_1^2 \cdot x_2 + 0,2540641 \cdot x_1^2 \cdot x_3 - \quad (1) \\
 & - 0,0694135 \cdot x_2^2 \cdot x_1 + 0,5597691 \cdot x_2^3 + 0,3195958 \cdot x_2^2 \cdot x_3 + \\
 & + 17,6537 \cdot x_3^2 \cdot x_1 + 8,020015 \cdot x_3^2 \cdot x_2 - 136,4767 \cdot x_3^3 - \\
 & - 0,521868 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3
 \end{aligned}$$

Анализ коэффициентов модели (1) показывает, что оптимальное содержание компонентов по D находятся в области эксперимента. Анализ влияния факторов целесообразно вести в зоне оптимума функции отклика, т.е. рассматривать влияние каждого из факторов при условии стабилизации остальных на оптимальных уровнях, определенных из условий поиска оптимума функции диссоциативно – шаговым методом оптимизации. При этом целесообразно рассматривать два варианта анализа в условиях диаметрально противоположных, т.е. в области максимума и в области минимума функции.

На рис. 1 представлена зависимость отражающая влияние щебня на D_{20} при оптимальном содержании минерального порошка и битума в зоне максимальной долговечности.

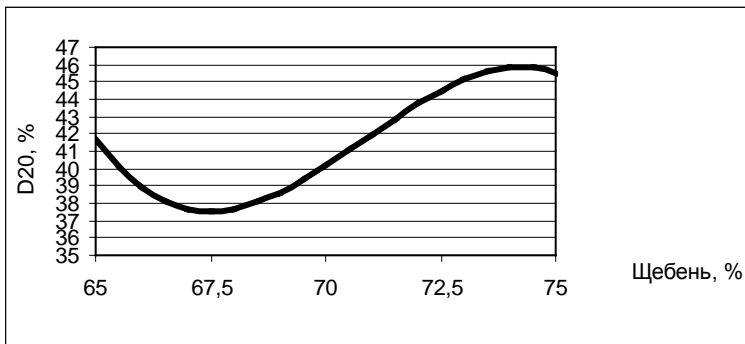


Рис. 1. Зависимость влияния щебня на D_{20} при оптимальном содержании минерального порошка и битума, в зоне максимальной долговечности

Установлено, что для обеспечения максимальной долговечности (точка 3), количество щебня должно составлять 67,5. Таким образом может быть установлен интервал количества щебня, составляющий 66–69 %, в смеси асфальтобетона типа ЩМС_и-10, обеспечивающий максимальную долговечность. Аналогичное исследование модели D₂₀ (1) было проведено и на влияние количества минерального порошка и битума на обеспечение максимальной долговечности. При этом диапазон дозирования составил для минерального порошка 10,0–12,0 % и битума – 6,40–6,50 %.

Вышеприведенный анализ исследований позволил по уровню влияния по возрастанию на D₂₀ факторы выстроить в следующей последовательности – $x_1 < x_2 < x_3$. Аналогичное ранжирование по уровню влияния исследуемых факторов характерно и для их влияния в зоне минимума. Следует также отметить, наличие оптимума факторов для зон максимальной и минимальной долговечностей.

Анализ других экспериментально-статистических моделей позволил оценить показатели физико-механических свойств асфальтобетона на предмет достоверности их прогноза при подборе оптимального состава асфальтобетона по усталостной повреждаемости. При этом прослеживается некоторая обособленность оптимальных составов по R₅₀, R₁₀, R₀ и R_c и составов по R_и и D₂₀. Результаты анализа показывает лучшую вероятность прогноза усталостной повреждаемости не по прочности на сжатие, а по прочности на растяжение при изгибе. Из вышесказанного можно сделать вывод, что наиболее благоприятным для принятия решений практически по всем свойствам асфальтобетона оптимального состава, являются условия по R_и и D₂₀ а наиболее неблагоприятными условия по R₅₀, и R₁₀.

Корреляционная зависимость усталостной повреждаемости и показателей прочности асфальтобетона

Ввиду того, что в настоящее время далеко не каждый научно – исследовательский институт обладает специальным оборудованием, стендом или какой-либо установкой, с помощью которой можно было бы реализовать экспериментальные испытания асфальтобетона на усталостную прочность, целесообразно получение ее зависимости через другие стандартные или не стандартные показатели прочности, полученные более доступными методами. Так при анализе первичной информации экспериментально-статических

моделей было установлено, что коэффициенты корреляции между показателями механических свойств $r\{R_i; R_j\}$ достаточно велики, статистически значимы с риском предсказания $\alpha = 0,05$. Подтверждение гипотезы о корреляционной связи дает возможность искать пути построения таких моделей, по которым можно было бы прогнозировать усталостную долговечность асфальтобетона, характеризуемую показателем усталостной повреждаемости D_{20} , по данным кратковременных испытаний на сжатие (R_i) или изгиб (R_u). Для модели типа

$$\ln N = b_0 + b_1 * \ln R_i \quad (2)$$

лучший результат по точности, характеризуемой среднеквадратической ошибкой $s_{\text{на}}\{\ln N\}$ (равной относительной ошибке $\delta\{N\}$), получен при использовании в качестве экспрессно определяемого показателя прочности на изгиб R_u . Так модель

$$D_{20} = 60,3904 * R_u^{-0,3614} \quad (3)$$

дает ошибку прогноза $\delta_{4,6} = 19,5\%$. Однако модель (3) трудно признать удовлетворительной с инженерной точки зрения, поэтому расчеты были продолжены за счет построения моделей, учитывающих второй аргумент – один из показателей прочности на сжатие:

$$\ln N = b_0 + b_1 * \ln R_u + b_2 * R_i. \quad (4)$$

В данном случае наиболее точной оказалась модель, в которой учтен показатель индекса трещиностойкости:

$$D_{20} = 61,5483 * R_u^{-0,3793} * I_{TR}^{0,0111}. \quad (5)$$

Ошибка прогноза $\delta_{4,8} = 19,3\%$ несколько меньше, чем $\delta_{4,6}$. Незначительное улучшение точности объясняется тем, что все показатели тесно взаимосвязаны между собой. Заметим, что замена I_{TR} на любой другой показатель R_i дает $\delta = 19,4 - 21,6\%$. В таких условиях дальнейшее усложнение моделей типа (4) за счет учета третьего аргумента не дает повышения точности. Поэтому был использован иной метод выделения из всего множества экспериментальных данных (53 единицы) некоторого ограниченного рецептурно-технологическими условиями подмножества, в котором можно построить более точные модели. Так анализ веера моделей показал, что если не распространять прогноз на асфальтобетоны с крайне низким содержанием битума ($x_3 = -1,0$ или $x_3 = 6,1\%$), то по остальному

массиву из 43 составов асфальтобетона ($6,2 \leq x_3 \leq 6,5$ %) будут получены более точные модели.

Так альтернативной моделью (5) будет модель (6) с ошибкой прогноза $\delta_{4,9} = 14,0$ %, которую можно признать удовлетворительной.

$$D_{20} = 52,8196 * R_u^{-0,2170} * I_{TR}^{-0,0147} . \quad (6)$$

Следует отметить, что модель (6) является более приемлемой по сравнению с ранее приведенными моделями (5), так как она учитывает прочность асфальтобетона на изгиб при температуре 20 °С и одновременно комплексный показатель индекса трещиностойкости, в котором учтена прочность асфальтобетона на раскол при низких температурах 0 °С и -15 °С.

Надо отметить, что при использовании кубической зависимости значений D_{20} от 5-ти факторов R_u , I_{TR} , R_o , R_{10} и R_{20} можно получить модель, для которой максимальная относительная погрешность равна $0,18$ %, а среднеквадратическая ошибка равна $0,025$. Но здесь следует иметь ввиду тот факт, что полученная формула учитывает 55 слагаемых, а уменьшение числа учитываемых слагаемых в формуле даже до 45-и приводит к увеличению значений относительной погрешности в 500 раз.

Выводы

Наиболее благоприятным для принятия решений практически по всем свойствам асфальтобетона оптимального состава, являются условия по R_u и D_{20} а наиболее неблагоприятными условия по $R_{50,}$ и R_{10} .

Усталостная долговечность асфальтобетона, характеризующую показателем усталостной повреждаемости, может прогнозироваться с достаточной степенью точности по значениям предела прочности на изгиб и индекса трещиностойкости.

Литература

1. Кравченко, С.Е. Достоверность критериев физико-механических свойств асфальтобетона при прогнозировании его усталостной долговечности / С.Е. Кравченко, В.В. Гришанов // Автомобильные дороги и мосты. – 2009. – № 2. – С. 44–49.

2. Выровой, В.Н. Применение математической теории эксперимента в задачах реологии новых композиционных материалов /

В.Н. Выровой, Ю.М. Гризан, Л.Е. Трофимова. – Киев: Общество «Знание», 1980. – 18 с.

3. Зедгенидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных смесей / И.Г. Зедгенидзе – М.: Наука, 1976. – 390 с.

УДК 625.78

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ДЛЯ ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

Куприянчик А.А., канд. техн. наук, Раковец Л.Д.
*Белорусский национальный технический университет
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Для целей практического управления хозяйственной деятельностью предприятия особое значение имеет упорядочение разнообразной информации в рамках системы установленных показателей. Эти показатели отражают все стороны работы дорожной организации. На основе тех или иных показателей осуществляется принятие ответственных управленческих решений.

Информационное обеспечение систем управления направлено на организацию информационных потоков, обеспечивающих своевременное и регулярное предоставление органам управления полной и достоверной информации.

Информационное обеспечение базируется на плановой учетной и отчетной документации, установленной директивными и отраслевыми органами управления, предусматривающей использование унифицированных типовых форм.

Так информационное обеспечение качества проектно-сметной документации предназначено для:

- получения сопоставимых и объективных данных о качестве ее исполнения;
- выявления и изучения причин снижающих качество проектирования автомобильных дорог и дорожных сооружений;