



МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ АСФАЛЬТОВОГО БЕТОНУ НА ОСНОВІ ВИРОБНИЧОГО ЗЕРНОВОГО СКЛАДУ МІНЕРАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ

Л. І. Базжин

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.*

Отримана 3 червня 2006; прийнята 27 червня 2006.

Анотація. У виробничих умовах не здійснюється розсів піску на окремі фракції. А тому відсутня можливість управління властивостями асфальтового бетону за допомогою кожної фракції піску. Однак за допомогою комп'ютерної оптимізації процесу математичного моделювання є можливість вибору таких взаємодій між фракціями крупного заповнювача, вмісту мінерального порошку, бітуму і його пенетрацією, які забезпечать одержання адекватних регресійних моделей з високими показниками якості і достатньою прогнозувальною здатністю.

Ключові слова: фракції заповнювача, модель, оптимізація, прогнозування.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ АСФАЛЬТОВОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗЕРНОВОГО СОСТАВА МИНЕРАЛЬНОЙ ЧАСТИ

Л. И. Базжин

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.*

Получена 3 июня 2006; принята 27 июня 2006.

Аннотация. В производственных условиях не осуществляется рассев песка на отдельные фракции. Поэтому нет возможности управления свойствами асфальтового бетона с помощью каждой фракции песка. Однако за счет компьютерной оптимизации процесса математического моделирования можно выбрать такие взаимодействия между фракциями крупного заполнителя, содержанием минерального порошка, битума и его пенетрацией, которые обеспечат получение адекватных регрессионных моделей с высокими показателями качества и достаточной прогностической способностью.

Ключевые слова: фракции заполнителя, модель, оптимизация, прогнозирование.

MATHEMATICAL MODELS OF ELASTICITY MODULUS OF BITUMINOUS CONCRETE ON THE BASIS OF PRODUCTION GRAIN COMPOSITION OF MINERAL PART

L. I. Bazhin

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture,
Derzhavin Street, 2, Makiyivka, Donetsk region, Ukraine, 86123

Received June 3, 2006; accepted June 27, 2006.

Abstract. There is no possibility to control bituminous concrete properties by sand fractions as sand is not screened under working conditions. Due to computerized process of mathematical modelling one can choose such interaction between aggregate fraction, mineral powder, bitumen and its penetration which can provide adequate regression models of high quality and sufficient prognostic ability.

Key words: aggregate fractions, model, optimization, prediction.

Стандартный зерновой состав минеральных частиц (20-40; 15-20; 10-15; 5-10; 2,5-5; 1,25-2,5; 0,63-1,25; 0,315-0,63; 0,14-0,315; 0,071-0,14; мельче 0,071 мм) положен в основу получения регрессионных моделей модуля упругости асфальтобетона при различных температурах (20, 0 и минус 10 °C) [1]. По данным [2] для активного сбора экспериментальных данных разработан случайный многоуровневый несимметричный план эксперимента $2^3 \cdot 3^7 \cdot 5^5 \cdot 6^{11} / 30$ (3, 7, 5, 1 – число факторов, 2, 3, 5, 6 – число уровней варьирования факторов).

Регрессионная модель модуля упругости асфальтового бетона при температуре 0 °C с использованием переменных в натуральных единицах приведена ниже:

$$E_{y(0)} = 15128 - 181,784 a_{15} - 158,745 a_{10} - 157,266 a_5 - 179,758 a_{2,5} - 160,003 a_{1,25} - 151,070 a_{0,63} - 158,798 a_{0,315} - 182,149 a_{0,14} - 187,983 a_{0,071} - 29,2372 \text{ ИМП} + 1154,154 \text{ Б} - 77,84 \text{ П} - 71,8702 \text{ ЧБ}^2 - 2,2970 \text{ ЧИМП}^2 - 8,7626 \text{ ЧБЧИМП} + 0,5136 \text{ П}^2, \quad (1)$$

где

a_i (%) – частные остатки на ситах; ИМП (%);

Б (%) – содержание минерального порошка из плотного известняка (фракция мельче 0,071 мм) и битума;

П (мм) – пенетрация битума.

Модель (1) имеет высокую прогностическую способность, так как коэффициент множественной

корреляции $R=0,928$, а коэффициент множественной детерминации $R^2=0,861$ (только 13,9% колебаний функции отклика не объясняется принятыми факторами). Коэффициент R значим, так как расчетное F -отношение для дисперсионного анализа больше табличного: $F_{\text{от(расч)}}=4,75 > F_{\text{от(таб)}}=2,50$ (при $q_0=0,05$; $f_R=K=17$; $f_{\text{ост}}=N-K=30-17=13$). По расчетному F_p и табличному F_T критериям Фишера регрессионная модель адекватна $F_p=4,95 < F_T=5,9$ и содержательна ($F_{\text{сод}}=3,5 > 2$).

В табл. 1 даны показатели качества моделей модуля упругости $E_{y(20, 0, -10)}$ при различных температурах. Все модели адекватны (расчетные значения критерия Фишера $F_p=4,17 \div 5,27 < F_T=5,9$), имеют высокие значения коэффициента множественной корреляции $R=0,927 \div 0,948$ и коэффициента множественной детерминации $R^2=0,860 \div 0,899$.

Таблица 1. Показатели качества регрессионных моделей свойств асфальтового бетона при полном наборе стандартных фракций крупного и мелкого заполнителей

Модель модуля упругости асфальтобетона	R	R ²	F _{сод}	F _p	F-от расчетное	F-от табличное
$E_{y(20)}$	0,948	0,899	4,8	5,27	6,82	2,50
$E_{y(0)}$	0,928	0,861	3,5	4,95	4,75	
$E_{y(-10)}$	0,927	0,860	3,4	4,17	3,20	

У всех моделей коэффициенты множественной корреляции R значимы.

Однако уравнения вида (1) для прогнозирования значений модуля упругости асфальтового бетона в условиях производства использовать нельзя, так как существующие комплексы технологического оборудования не предусматривают пофракционный рассев и дозирование песка с фракциями мельче 5 мм. Чаще всего встречаются бункеры с отсеками для получения фракций 0-5; 5-10; 10-20; 20-40 (первый состав) и 0-5; 5-15; 15-40 (второй состав) мм. Фракции крупного заполнителя более 40 мм удаляются по специальному лотку [3]. В условиях производства исключается возможность управления структурой и свойствами асфальтового бетона с помощью отдельных фракций песка. Стоит задача разработки способа управления свойствами асфальтового бетона в условиях производства с учетом в моделях реальных минеральных частиц с зерновым составом щебня, а не идеализированных частиц в виде шаров, кубов, тетраэдров и т.д. [4, 5]. При этом в асфальтовом бетоне присутствуют все фракции песка, но они не используются в моделях. Такой подход в моделировании отсутствует в публикациях в Украине и зарубежье. Материал исследования приведен ниже.

Рассчитаны регрессионные модели $E_{y(20;0;-10)}$ без выделения отдельных фракций песка (2,5-5; 1,25-2,5; 0,63-1,25; 0,315-0,63; 0,14-0,315; 0,071-0,14 мм). Рассмотрены два производственных состава асфальтового бетона. За факторы в моделях 1-го состава взяты частные остатки a_i (%) на сетах 20, 10, и 5 (факторы a_{20} , a_{10} , a_5), а также содержание минерального порошка (ИМП), битума B и его пенетрация P . Во 2-м производственном составе за щебень приняты частные остатки a_{15} , a_5 . Во всех моделях фракции песка (мельче 5 мм) не использованы, но они дополняли сумму всех фракций минеральной части в асфальтобетоне до 100%.

С применением оптимизации при компьютерном моделировании рассчитан веер моделей модуля упругости асфальтового бетона при различных температурах следующим образом. После обязательного (принудительного) ввода факторов в первой степени от a_{20} (a_{15}) до P (линейная часть моделей) программой автоматически путем пошагового расчета определены взаимодействия (к ним отнесены и квадратичные члены) с учетом наи-

большого вклада в минимизацию остаточной вариации $W_{\text{ост}} = \sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u) y_u$ и \hat{y}_u — соответ-

ственно, экспериментальное и расчетное значения зависимой переменной по строкам матрицы плана). Общий вид линейных частей моделей (без взаимодействий) для 1-го и 2-го производственных составов асфальтового бетона приведен ниже:

$$E_{y(20,0,-10)} = B_0 + B_1 \cdot a_{20} + B_2 \cdot a_{10} + B_3 \cdot a_5 + B_4 \cdot B + B_5 \cdot \text{ИМП} + B_6 \cdot P. \quad (2)$$

$$E_{y(20,0,-10)} = B_0 + B_1 \cdot a_{15} + B_2 \cdot a_5 + B_3 \cdot B + B_4 \cdot \text{ИМП} + B_5 \cdot P. \quad (3)$$

В табл. 2 даны значения R и R^2 моделей 1-го и 2-го производственных составов асфальтобетона при числе парных взаимодействий факторов $n=0 \div 9$. С повышением числа взаимодействий растет значение R^2 и улучшаются другие показатели качества моделей. При 9 парных взаимодействиях модели 2-го производственного состава имеют наименьшие значения $R^2=0,867$ для $E_{y(0)}$ и $0,823$ для $E_{y(-10)}$.

В табл. 3 дана прогностическая способность моделей в некоторых точках факторного пространства при полном наборе стандартных фракций (включая фракции мелкого заполнителя), 1-м (фракции мельче 0,071; 5-10; 10-20 и 20-40 мм) и 2-м (фракции мельче 0,071; 5-15; 15-40 мм) производственных составах при 9 парных взаимодействиях между факторами.

Вариация, объясненная регрессией W_R , имеет наибольшее значение для моделей 1-го производственного состава, наименьшее — при полном наборе стандартных фракций минеральной части. Показатели качества моделей (R , R^2 , $F_{\text{од}}$) также наименьшие для моделей при полном стандартном наборе фракций. Вид модели $E_{y(0)}$ для асфальтового бетона 1-го производственного состава при 6 парных взаимодействиях дан ниже:

$$E_{y(20)} = -3062,1 + 591,95 \cdot a_{20} + 33,75 \cdot a_{10} - 25,613 a_5 + 171,65 \cdot \text{ИМП} + 1616,8 \cdot B - 49,034 \cdot P - 122,4 \cdot B^2 - 116,62 \cdot a_{20}^2 - 24,737 \cdot \text{ИМП} \cdot B + 9,7844 \cdot a_{20} \cdot \text{ИМП} + 7,9202 \cdot a_5 \cdot B - 2,3047 \cdot a_{10} \cdot P. \quad (4)$$

При компьютерной оптимизации (даже при отсутствии фракций мелкого заполнителя) получают регрессионные модели с более высокой прогностической способностью, чем модели при использовании полного набора стандартных фракций и принудительном вводе взаимодействий факторов.

Таблица 2. Оценка качества моделей при компьютерном вводе парных взаимодействий факторов

Вид модели	1-й производственный состав		2-ой производственный состав		Парные взаимодействия в моделях свойств асфальтового бетона 1-го производственного состава	
	R	R ²	R	R ²	Число	Факторы взаимодействий
E _{y(20)}	0,887	0,787	0,852	0,726	0	-
E _{y(0)}	0,862	0,743	0,827	0,684		-
E _{y(-10)}	0,752	0,566	0,708	0,501		-
E _{y(20)}	0,909	0,826	0,893	0,797	1	a ₅ ·a ₅
E _{y(0)}	0,886	0,785	0,850	0,723		Б·Б
E _{y(-10)}	0,839	0,704	0,802	0,643		Б·Б
E _{y(20)}	0,917	0,841	0,919	0,845	2	a ₅ ·a ₅ , ИМП·ИМП
E _{y(0)}	0,922	0,850	0,868	0,753		Б·Б, a ₂₀ ·a ₂₀
E _{y(-10)}	0,889	0,790	0,828	0,686		Б·Б, a ₂₀ ·a ₅
E _{y(20)}	0,923	0,852	0,928	0,861	3	a ₅ ·a ₅ , ИМП·ИМП, ИМП·П
E _{y(0)}	0,936	0,876	0,881	0,776		Б·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , ИМП·Б
E _{y(-10)}	0,915	0,837	0,841	0,707		Б·Б, a ₂₀ ·a ₅ , ИМП·Б
E _{y(20)}	0,929	0,863	0,937	0,878	4	a ₅ ·a ₅ , ИМП·ИМП, ИМП·П, a ₂₀ ·ИМП
E _{y(0)}	0,942	0,887	0,902	0,814		Б·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , ИМП·Б, a ₂₀ ·ИМП
E _{y(-10)}	0,929	0,863	0,855	0,731		Б·Б, a ₂₀ ·a ₅ , ИМП·Б, a ₂₀ ·a ₂₀
E _{y(20)}	0,933	0,870	0,942	0,887	5	a ₅ ·a ₅ , ИМП·ИМП, ИМП·П, a ₂₀ ·ИМП, a ₂₀ ·a ₁₀
E _{y(0)}	0,947	0,897	0,910	0,828		Б·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , ИМП·Б, a ₂₀ ·ИМП, a ₅ ·Б
E _{y(-10)}	0,940	0,884	0,874	0,764		Б·Б, a ₂₀ ·a ₅ , ИМП·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , a ₅ ·Б
E _{y(20)}	0,939	0,882	0,951	0,904	6	a ₅ ·a ₅ , ИМП·ИМП, ИМП·П, a ₂₀ ·ИМП, a ₂₀ ·a ₁₀ , a ₁₀ ·Б
E _{y(0)}	0,958	0,918	0,913	0,834		Б·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , ИМП·Б, a ₂₀ ·ИМП, a ₅ ·Б, a ₁₀ ·П
E _{y(-10)}	0,956	0,914	0,891	0,794		Б·Б, a ₂₀ ·a ₅ , ИМП·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , a ₅ ·Б, a ₁₀ ·П
E _{y(20)}	0,943	0,889	0,955	0,912	7	a ₅ ·a ₅ , ИМП·ИМП, ИМП·П, a ₂₀ ·ИМП, a ₂₀ ·a ₁₀ , a ₁₀ ·Б, Б·Б
E _{y(0)}	0,962	0,925	0,917	0,841		Б·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , ИМП·Б, a ₂₀ ·ИМП, a ₅ ·Б, a ₁₀ ·П, ИМП·П
E _{y(-10)}	0,962	0,925	0,896	0,803		Б·Б, a ₂₀ ·a ₅ , ИМП·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , a ₅ ·Б, a ₁₀ ·П, a ₅ ·a ₅
E _{y(20)}	0,946	0,895	0,957	0,916	8	a ₅ ·a ₅ , ИМП·ИМП, ИМП·П, a ₂₀ ·ИМП, a ₂₀ ·a ₁₀ , a ₁₀ ·Б, Б·Б, a ₂₀ ·a ₅
E _{y(0)}	0,966	0,933	0,923	0,852		Б·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , ИМП·Б, a ₂₀ ·ИМП, a ₅ ·Б, a ₁₀ ·П, ИМП·П, a ₅ ·a ₅
E _{y(-10)}	0,968	0,937	0,903	0,815		Б·Б, a ₂₀ ·a ₅ , ИМП·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , a ₅ ·Б, a ₁₀ ·П, a ₅ ·a ₅ , a ₁₀ ·ИМП
E _{y(20)}	0,951	0,904	0,959	0,920	9	a ₅ ·a ₅ , ИМП·ИМП, ИМП·П, a ₂₀ ·ИМП, a ₂₀ ·a ₁₀ , a ₁₀ ·Б, Б·Б, a ₂₀ ·a ₅ , ИМП·Б
E _{y(0)}	0,968	0,937	0,931	0,867		Б·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , ИМП·Б, a ₂₀ ·ИМП, a ₅ ·Б, a ₁₀ ·П, ИМП·П, a ₅ ·a ₅ , a ₁₀ ·a ₁₀
E _{y(-10)}	0,971	0,943	0,907	0,823		Б·Б, a ₂₀ ·a ₅ , ИМП·Б, a ₂₀ ·a ₂₀ , a ₅ ·Б, a ₁₀ ·П, a ₅ ·a ₅ , a ₁₀ ·ИМП, Б·П

Таблица 3. Значения модуля упругости асфальтового бетона $E_{y(0)}$, МПа

№№ точек	Экспериментальные значения (МПа)	Прогнозные при производственном составе		Прогнозные при полном стандартном наборе отдельных фракций
		1	2	
		при 9 парных взаимодействиях		
1	1345	1229	1397	1773
2	3116	2832	2669	2780
3	3072	3183	2716	2722
....
28	1314	1525	1356	1502
29	3311	3310	2752	3058
30	3728	3399	3056	3470
Вариации				
W _{ост}	-	1,425668e+006	3,055271e+006	3,175934e+006
W _R	-	2,149080e+007	1,986120e+007	1,974053e+007
W _{общая}	-	2,291647e+007	2,291647e+007	2,291647e+007
Показатели качества моделей				
R	-	0,968	0,931	0,928
R ²	-	0,937	0,867	0,861
F _{сод}	-	7.76	3.88	3.23

По результатам компьютерной оптимизации процесса получения регрессионных моделей с использованием производственных зерновых составов минеральной части асфальтового бетона можно сделать такие выводы:

1. При расчете регрессионных моделей модуля упругости асфальтового бетона при различных температурах полный набор стандартных фракций минеральных материалов в производственных условиях можно заменить набором фракций только щебня (без фракций мелкого заполнителя), что важно при всесторонней компьютеризации процесса производства асфальтового бетона и его проектирования. При этом в моделях лучше использовать фракции крупного заполнителя 5-10; 10-20; 20-40, а не 5-15; 15-40 мм.
2. При компьютерной оптимизации моделирования можно подобрать такие парные взаимодействия факторов, которые компенсируют отсутствие в моделях фракций песка и позволят получать адекватные модели с высокими характеристиками качества и с высокой прогностической способностью.
3. С применением компьютерной оптимизации процесса математического моделирования получены модели, в которых учтено влия-

ние производственных зерновых составов минеральной части на другие механические свойства асфальтобетона, а также физические.

4. Компьютерная оптимизация процесса математического моделирования позволяет исключать незначимые факторы и взаимодействия между ними без перерасчета моделей.

Литература

1. Базжин Л.И. Исследование влияния зернового состава минеральных материалов на свойства асфальтового бетона // Известия вузов. Строительство. - 1999. - № 12. - С. 33-38.
2. Рузинов Л.П., Слободчикова Р.И. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. - М.: Химия, 1980. - 280 с.
3. Дубровин Е.Н., Колкер И.Я., Старостин Ю.В. и др. Проектирование производственных предприятий дорожного строительства. Учеб. пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 1975. - 351 с.
4. Радовский Б.С., Мозговой В.В., Малеванская Е.Г. Математическое моделирование структуры минеральной части асфальтобетона // Тезисы Республ. конф. " Ресурсосберегающие технологии, структура и свойства дорожных бетонов". - Харьков: ХАДИ. - 1989. - С. 19.
5. Воробьев В.А., Кивран В.К., Корякин В.П. Применение физико-математических методов в исследовании свойств бетона. Пособие для вузов. - М.: Высшая. школа, 1977. - 271 с.

Базжин Лев Іванович — к.т.н., доцент кафедри "Технології будівельних матеріалів, виробів та автомобільних доріг" Донбаської національної академії будівництва і архітектури.

Базжин Лев И ванович — к.т.н., доцент кафедры "Технологии строительных материалов, изделий и автомобильных дорог" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Bazzhin Lev I vanovych — Ph.D., Reader of Department of Technology of building materials, products and automobile roads of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture.