

УДК 628.8

СОСТАВ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ  
КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ НА ОСНОВЕ СЕРЫ И РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ

А.С. КАМЕКО

(Представлено: канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА)

В статье выполнен подбор состава асфальтобетонной смеси с комплексным модификатором на основе серы и резиновой крошки. С применением метода математического планирования эксперимента определено количество серы и резиновой крошки в составе комплексного модификатора. Показано, что подобранный состав асфальтобетонной смеси обеспечивает получение предела прочности при сжатии при температуре 50 °С,  $R_{сж50}$ , 5,55 МПа.

Современные тенденции развития общества направлены на сохранение природных ресурсов и поддержание экологии. В связи с этим актуальны вопросы повторного применения отходов промышленных производств и отходов жизнедеятельности человека в производстве строительных материалов. В данной статье рассмотрено применение в асфальтобетонных смесях отходов серы, получаемой от глубокой переработки нефти нефтеперерабатывающими заводами, и резиновой крошки автомобильных покрышек.

**Материалы и методы проведения эксперимента.** Для проведения экспериментов использовались следующие материалы: сера техническая по ГОСТ 127.1–93; резиновая крошка, полученная путем измельчения автомобильных покрышек, фракция не более 0,315 мм; щебень гранитный, фракции 5–10 по ГОСТ 8267-93, марка щебня по прочности 1400, по истираемости И-1; отсев дробления, фракции 0–5 мм по ТУ ВУ 200161167.003-2010, модуль крупности 2,7, насыпная плотность 1510 кг/м<sup>3</sup>; битум дорожный марка БНД 70/100 по СТБ EN 12591-2010; минеральный порошок для асфальтобетонов из доломита марка МП-1 по ГОСТ 16557-2005.

Испытания проводились согласно СТБ 1115-2013 на стандартных цилиндрических образцах диаметром 71,4 ± 0,1 мм. Определялись следующие физико-механические характеристики: предел прочности при сжатии при 50 °С, водонасыщение, набухание, средняя плотность.

Разработка состава асфальтобетона с комплексным модификатором на основе серы и резиновой крошки выполнялась с применением метода математического планирования эксперимента и обработки данных факторного эксперимента с применением компьютерной программы «PlanExp B-D13», разработанной в среде программирования Microsoft Visual Basic 6.0. Программа ориентирована на работу с трехфакторным планом эксперимента B-D13, который позволяет получать нелинейные квадратичные модели, и обладает хорошими статистическими характеристиками.

В качестве варьируемых факторов рассматривались массовая доля серы в составе асфальтобетонной смеси ( $x_1$ ), массовая доля битума ( $x_2$ ) и массовая доля резиновой крошки ( $x_3$ ), в качестве результирующего фактора принят предел прочности при сжатии при 50 °С. При варьировании факторов сохранялось постоянное следующее соотношение компонентов асфальтобетонной смеси (по массе) щебень: отсев дробления: минеральный порошок = 1: 0,48: 0,08. Согласно плану эксперимента выполнялось 10 опытов по 3 параллельных испытания в каждом. Факторы и интервалы варьирования представлены в таблице 1. План и результаты эксперимента представлены в таблице 2.

В таблице 3 представлены численные значения коэффициентов регрессии математической модели. Уравнение математической модели в кодированных переменных имеет следующий вид:

$$R_{сж50} = 3,693 + 0,869 \cdot x_1 - 0,328 \cdot x_2 + 0,372 \cdot x_3 - 0,056x_1^2 - 0,964x_2^2 - 0,721x_3^2 - 0,626 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,853 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,292 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Значимость каждого коэффициента уравнения оценивали по t-критерию Стьюдента. В таблице 4 представлены значения t-критерия Стьюдента для каждого коэффициента. Дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах – 0,035; число степеней свободы – 20; табличное значение t-критерия Стьюдента – 2,09. Коэффициент является незначимым, если расчетное значение t-критерия Стьюдента меньше табличного значения.

Таблица 1. – Факторы и интервалы их варьирования

Наименование фактора	Обозначение фактора	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования
Сера, % по массе	$x_1$	0	3	6	3
Битум, % по массе	$x_2$	3	5	7	2
Резиновая крошка, % по массе	$x_3$	0	1,5	3	1,5

Таблица 2. – План и результаты эксперимента

Номер опыта	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Предел прочности при сжатии при температуре 50°С, R <sub>сж50</sub> , МПа, для образцов		
	x1	x2	x2	сера	битум	резиновая крошка	№1	№2	№3
1	-1	-1	-1	0	3	0	1,626	1,478	1,572
2	+1	-1	-1	6	3	0	2,876	3,159	2,498
3	-1	+1	-1	0	7	0	1,632	1,565	1,498
4	-1	-1	+1	0	3	3	0,01	0,01	0,01
5	-1	0,19	0,19	0	5,38	1,785	2,954	2,658	2,432
6	0,19	-1	0,19	3,57	3	1,785	3,44	3,601	3,058
7	0,19	0,19	-1	3,57	5,38	0	2,421	2,641	2,2
8	-0,29	+1	+1	2,13	7	3	1,991	2,016	2,103
9	+1	-0,29	+1	6	4,42	3	5,099	5,278	5,05
10	+1	+1	-0,29	6	7	1,065	2,213	2,088	1,99

Таблица 3. – Значения коэффициентов регрессии уравнения математической модели

b0	b1	b2	b3	b11	b12	b13	b22	b23	b33
3,693	0,869	-0,328	0,372	-0,056	-0,626	0,853	-0,964	0,292	-0,721

Таблица 4. – Критерии Стьюдента и значимость коэффициентов модели (1/0 - значимый/незначимый)

Наименование показателей	b0	b1	b2	b3	b11	b12	b13	b22	b23	b33
t-критерий Стьюдента	21,329	11,727	4,426	5,02	0,391	7,086	9,655	6,73	3,305	5,034
Значимость	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1

Окончательное уравнение выглядит следующим образом:

$$R_{сж50} = 3,693 + 0,869 \cdot x_1 - 0,328 \cdot x_2 + 0,372 \cdot x_3 - 0,964 \cdot x_2^2 - 0,721 \cdot x_3^2 - 0,626 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,853 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,292 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Для уравнения регрессии дисперсия адекватности математической модели – 0,06; число степеней свободы при значимых коэффициентах – 1. Адекватность полученной математической модели оценивалась по критерию Фишера. Табличное значение критерия Фишера составляет 4,35, расчетное значение критерия Фишера – 1,71, поскольку расчетное значение меньше табличного модель является адекватной и может применяться для решения производственных задач.

Для визуализации модели построена диаграмма линий равного уровня (изолиний), представляющая собой проекцию трехмерной поверхности на плоскость (x<sub>2</sub>; x<sub>3</sub>) при постоянном факторе x<sub>1</sub>=const=1 (рисунок). Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора X<sub>1</sub>=1 имеет вид:

$$R_{сж50} = 4,506 - 0,328 \cdot x_2 + 0,372 \cdot x_3 - 0,964 \cdot x_2^2 - 0,721 \cdot x_3^2 - 0,626 \cdot x_2 + 0,853 \cdot x_3 + 0,292 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Экстремум функции отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Значение экстремума составляет R<sub>сж50 opt</sub>=5,16 МПа. Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов: x<sub>2</sub>=-0,378 (содержание битума 4,244 % по массе) и x<sub>3</sub>=0,773 (содержание резиновой крошки 2,66 % по массе) при x<sub>1</sub>=1 (содержание серы 6 % по массе). Таким образом, по результатам эксперимента получен следующий состав асфальтобетонной смеси: щебень гранитный фракции 5-10 – 56,4%; отсев дробления – 26,3%; минеральный порошок – 4,5%; битум – 4,2%; сера техническая – 6%; резиновая крошка – 2,6%.

Согласно СТБ 1115-2013 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний» экспериментально определены значения средней плотности, водонасыщения, набухания и предел прочности при сжатии расчетного состава асфальтобетонной смеси. Результаты представлены в таблице 5.

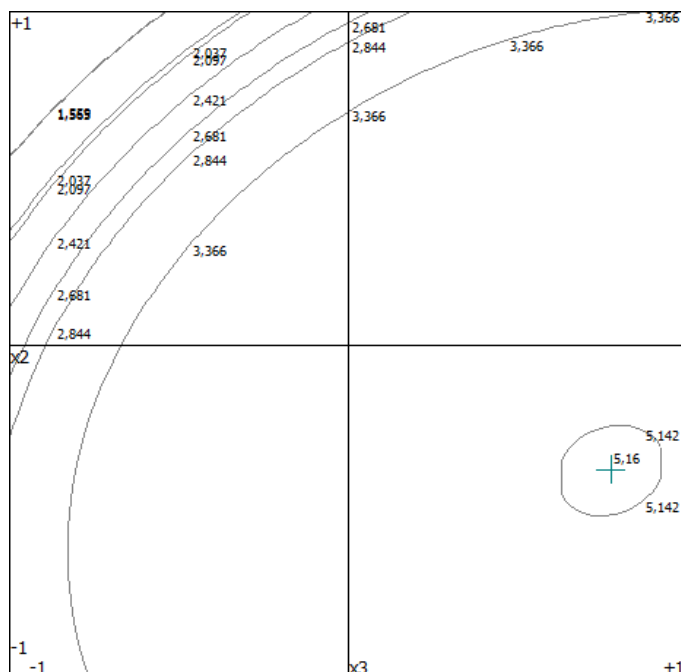


Рисунок 1. – Диаграмма изолиний математической модели прочности на сжатие асфальтобетона при  $x_1=1$

Таблица 5. – Физико-механические характеристики асфальтобетонной смеси

Наименование показателей, единицы измерения	Значения показателя асфальтобетона для образцов			
	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_{cp}$
Средняя плотность, $\rho_m^a$ , г/см <sup>3</sup>	2,41	2,41	2,41	2,41
Водонасыщение, W, %	2,46	2,70	2,21	2,45
Набухание, Н, %	0,26	0,35	0,16	0,26
Предел прочности при сжатии 50°C, $R_{сж50}$ МПа	5,86	5,34	5,46	5,55

**Выводы.** С применением метода математического планирования эксперимента разработан состав асфальтобетонной смеси с комплексным модификатором на основе серы и резиновой крошки, со следующим содержанием компонентов, в процентах по массе: щебень гранитный фракции 5-10 – 56,4%; отсев дробления – 26,3%; минеральный порошок – 4,5%; битум – 4,2%; сера – 6%; резиновая крошка – 2,6%. Экспериментально установлено, что асфальтобетонная смесь с комплексным модификатором имеет следующие физико-механические характеристики: средняя плотность – 2,41 г/см<sup>3</sup>, водонасыщение – 2,45%, набухание (приращение объема) асфальтобетона – 0,26%, предел прочности при сжатии при 50°C – 5,55 МПа.