

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/16SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/16SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/16SATS220>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Черных Д.С., Пакин М.Н. Моделирование составов и прогнозирование свойств модифицированных смесей для шероховатых тонкослойных покрытий // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/16SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/16SATS220

For citation:

Chernykh D.S., Pakin M.N. (2020). Modeling of compositions and predicting properties of modified mixtures for rough thin-layer coatings. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/16SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/16SATS220

УДК 625.7/.8

ГРНТИ 73.31.11

Черных Дмитрий Сергеевич

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Доцент кафедры «Автомобильные дороги»
Кандидат технических наук
E-mail: chdmitriy@nm.ru

Пакин Михаил Николаевич

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Магистрант кафедры «Автомобильные дороги»
E-mail: nobodyone23rus@yandex.ru

Моделирование составов и прогнозирование свойств модифицированных смесей для шероховатых тонкослойных покрытий

Аннотация. За последние годы коренным образом изменился подход к экспериментально-статистическому исследованию и оптимизации сложных многокомпонентных систем. В различных областях научно-технических исследований успешно применяют методы математического планирования эксперимента. Широкое их применение существенно повышает эффективность исследований, а также доказывает универсальность и их пригодность в большинстве исследований строительных материалов.

Как следствие, авторами представлен метод математического планирования эксперимента, с помощью которого осуществлена оптимизация состава и свойств модифицированных смесей для шероховатых тонкослойных покрытий. Этот метод позволяет достаточно полно и всесторонне оценить влияние компонентов на свойства модифицированных смесей и получить математическую модель процесса в графическом виде, а также получить теоретическую модель оценки и прогнозирования физико-механических и эксплуатационных свойств исследуемых материалов.

В данной статье на первом этапе исследований осуществлялся выбор процентного содержания вяжущего, гидратной извести и добавки, а также изучалось влияние фактора

варьирования данных компонентов на физико-механические свойства смеси. На втором этапе исследовались изменения функций отклика.

Результаты проведенного полного трехфакторного эксперимента позволили установить рациональные области значений исследованных компонентов с целью получения смесей для шероховатых тонкослойных покрытий с оптимальными значениями физико-механических и эксплуатационных показателей.

Ключевые слова: модифицированные смеси для шероховатых тонкослойных покрытий (ШТП); математическое планирование эксперимента; водонасыщение (W ; %); предел прочности на сжатие при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (R_0 ; МПа); коэффициента водостойкости ($K_{\text{вод}}$); предел прочности на сжатие при $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (R_{50} ; МПа); сцепления вяжущего по Маршаллу (C ; МПа); прочность при расколе ($R_{\text{рас}}$ МПа)

За последние годы коренным образом изменился подход к экспериментально-статистическому исследованию и оптимизации сложных многокомпонентных систем. В различных областях научно-технических исследований успешно применяют методы математического планирования эксперимента. Широкое их применение существенно повышает эффективность исследований, а также доказывает универсальность и их пригодность в большинстве исследований строительных материалов.

Оптимизация состава и свойств модифицированных смесей для шероховатых тонкослойных покрытий (ШТП) с введением комплексной резиносодержащей добавки, РТЭП в совокупности с порошкообразной гидратной известью, вводимой в состав минерального порошка была осуществлена при помощи математического планирования эксперимента [1; 2]. Математическое планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий постановки опытов, необходимых и достаточных для решения данной задачи с требуемой точностью, методов математической обработки их результатов и принятия решений. В планировании эксперимента сам эксперимент рассматривается как объект исследования и оптимизации. Здесь осуществляется оптимальное управление ведением эксперимента. В зависимости от информации об изучаемой системе осуществляется изменение стратегии исследования с выбором оптимальной стратегии для каждого данного этапа. Этот метод позволяет достаточно полно и всесторонне оценить влияние компонентов на свойства модифицированных смесей и получить математическую модель процесса в графическом виде, а так же получить теоретическую модель оценки и прогнозирования физико-механических и эксплуатационных свойств исследуемых материалов.

Проведенные предварительные исследования, позволили выявить несколько основных факторов, определяющих прочностные и эксплуатационные характеристики смесей для шероховатых тонкослойных покрытий, приготовляемых с использованием комплексной резиносодержащей добавки, РТЭП в совокупности с порошкообразной гидратной известью, вводимой в состав минерального порошка [3].

Термоэластопласт резиновый РТЭП представляет собой гранулы темного цвета, сферической формы, диаметром около 3 мм. Представлен РТЭП резинопolyмерным материалом, битумным вяжущим и антиоксидантами. Модификатор обладает повышенной износо- и морозостойкостью, растворяется в углеводородах, битуме, хлороформе, четыреххлористом углероде и т. п. Вредных веществ не содержит. Введение гидратной извести приводит к понижению водонасыщения асфальтобетона, независимо от природы минерального материала. Интенсивность этого явления зависит от концентрации извести-пушонки в минеральном порошке. Авторы [4] отмечают, что содержание ее до 20 % вызывает плавное падение водонасыщения смесей, а при дальнейшем увеличении концентрации гидратной

известно наблюдается резкое понижение этого показателя. Кроме того, следует отметить и тот факт, что применение гидратной извести в составе асфальтобетонов обеспечивает адгезию к минеральным материалам и одновременно снижает набухание.

Особенно эффективно применение гидратной извести в составе минерального порошка при использовании в асфальтобетонных смесях битумов модифицированных полимерными добавками [4]. Гидратная известь выполняет при этом роль как бы дополнительного модификатора. Такая комплексная модификация битума вызывает значительное изменение структурно-реологических характеристик вяжущего: интенсивно повышает температуру размягчения, вязкость, понижает глубину проникания иглы, растяжимость асфальтового вяжущего [5]. Содержание гидратной извести в минеральном порошке в количестве более 30 % вызывает интенсивное повышение температуры хрупкости композиции, что приводит к понижению устойчивости асфальтобетона к воздействию отрицательных температур и повышению вязкости асфальтобетонного вяжущего. Последнее обстоятельство требует повышения энергетических затрат, связанных с уплотнением асфальтобетонного слоя, а в некоторых случаях, даже исключает возможность уплотнения.

В исследованиях, проведенных М. Иваньски и Н.Б. Урьевым [4] отмечается, что добавление гидратной извести в минеральный порошок асфальтобетонных смесей замедляет процесс кратковременного и долговременного старения асфальтобетонов, обеспечивая их требуемые характеристики, отвечающие за работоспособность в широком диапазоне температур – от высоких летних до низких зимних. Применение дополнительно второго модификатора смесей – полимера способствует проявлению этой тенденции. Особый интерес также представляют работы [6; 7] по формированию упрочненной композиции и созданию стабильной структуры асфальтобетонов за счет использования совместно с волокнистыми наполнителями добавок полимеров. К таким добавкам относится и предлагаемый модификатор РТЭП способный выполнять двойную функцию: полимерного модификатора и волокнистого стабилизатора.

Поэтому, при разработке смесей для шероховатых тонкослойных покрытий (ШТП) с использованием в качестве полимерно-армирующего компонента резинового термоэластопласта (РТЭП), целесообразно введение гидратной извести и проведение исследований по моделированию составов и прогнозированию свойств модифицированных смесей для шероховатых тонкослойных покрытий.

Исследуемые в данной статье, ШТП смеси относятся к классу сложных систем, характеризующихся значительным числом взаимосвязанных параметров. Подавляющее большинство изучаемых явлений следует рассматривать как сложные системы, зависящие от большого числа независимых переменных [8]. Часть из них может оказать существенное влияние на исследуемый выходной параметр, другая – лишь незначительно. Так как априори обычно неизвестна степень влияния отдельных переменных, на первых этапах изучения сложных систем в программу исследования необходимо включать все переменные, подозреваемые в способности воздействовать на выходной параметр. Поэтому исследование и оптимизация сложных систем методами математического планирования эксперимента проводилась в несколько этапов. На каждом из них выбиралось оптимальное для данного этапа расположение экспериментальных точек.

На первом этапе исследований осуществлялся выбор процентного содержания вяжущего, гидратной извести и добавки РТЭП, а также изучалось влияние фактора варьирования данных компонентов на физико-механические свойства смеси [9]. С этой целью проведен трехфакторный эксперимент по плану Бокса В3. В качестве варьируемых величин выбраны следующие факторы: X1 – количество битумного вяжущего, %; X2 – количество гидратной извести, %; X3 – количество добавки РТЭП, %. План эксперимента и уровни

варьирования факторов определяли на основании результатов проведенных испытаний. Исследуемые факторы и интервалы их варьирования представлены в таблице 1. Приготовление смесей (ШТП) в лабораторных условиях осуществлялось путем механического перемешивания при температуре 165–175 °С минерального материала подобранного гранулометрического состава в соответствии с требованиями ГОСТ 9128-2009 с добавками РТЭП и вяжущего.

Качество ШТП оценивалось всеми основными показателями свойств в соответствии с требованиями ГОСТ 12801-98 по: водонасыщению, пределу прочности на сжатие при температуре 0 °С, 50 °С; коэффициенту водостойкости; предел прочности на растяжение при расколе при скорости нагружения 3 и 50 мм/мин.; сцепление вяжущего по Маршаллу.

Таблица 1

Исследуемые факторы и интервалы их варьирования в плане эксперимента

Характеристика	X1 битум, %	X2 гидратная известь, %	X3 РТЭП, %
Основной уровень, (X_{0i})	5,3	15	0,2
Интервал варьирования, (Δ_i)	0,5	15	0,2
Верхний уровень ($X_i = +1$)	5,8	30	0,4
Нижний уровень ($X_i = -1$)	4,8	0	0,0

Разработано автором

На втором этапе исследовались изменения: Y_1 – водонасыщения (W, %), Y_2 – предела прочности на сжатие при 0 °С (R0, МПа), Y_3 – коэффициента водостойкости ($K_{вод}$), Y_4 – предела прочности на сжатие при 50 °С (R50, МПа), Y_5 – сцепления вяжущего по Маршаллу (C, МПа), Y_6 – прочность при расколе ($R_{рас}$, МПа). Эти величины в теории планирования эксперимента называют функциями отклика и обозначают « Y_i ».

Функция отклика содержит в своем составе неслучайную и случайную составляющую. Многие показатели качества автоматизированных систем обработки информации носят случайный характер. Это требует многократного повторения опытов в одних и тех же условиях в целях получения статистически устойчивых результатов, а получаемые оценки показателей должны обладать свойствами состоятельности, эффективности, несмещенности и достаточности [10]. Оценки типовых показателей формируются путем усреднения результатов наблюдений. Поэтому при достаточно большом количестве наблюдений можно считать, что случайная составляющая распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием, что позволяет получить несмещенную оценку математического ожидания функции отклика в конкретной точке плана.

Число степеней свободы вычисляется по формуле:

$$f_1 = m - n - 1 \quad (1)$$

где m – количество испытаний (равно 17);

n – число коэффициентов регрессии (равно 10);

$$f_1 = m - n - 1 = 17 - 10 - 1 = 6.$$

Коэффициент Стьюдента выбирается по таблицам, например, учебника В.А. Вознесенского [1], который в зависимости от вероятности превышения (0,05) и числа степеней свободы ($f_1 = 6$), составляет – 2,447.

План эксперимента и натуральные значения исследуемых факторов в каждой точке плана приведены в таблице 2.

Таблица 2

План эксперимента и натуральные значения переменных

Номер плана	План эксперимента			Натуральные значения переменных		
	X ₁	X ₂	X ₃	Битум, %	Гидратная известь, %	РТЭП, %
1	+1	-1	-1	5,8	0	0
2	+1	-1	+1	5,8	0	0,4
3	-1	-1	+1	4,8	0	0,4
4	-1	-1	-1	4,8	0	0
5	0	-1	0	5,3	0	0,2
6	0	0	-1	5,3	15	0
7	-1	0	0	4,8	15	0,2
8	0	0	+1	5,3	15	0,4
9	+1	0	0	5,8	15	0,2
10*	0	0	0	5,3	15	0,2
11	+1	+1	-1	5,8	30	0
12	+1	+1	+1	5,8	30	0,4
13	-1	+1	+1	4,8	30	0,4
14	-1	+1	-1	4,8	30	0
15	0	+1	0	5,3	30	0,2
16*	0	0	0	5,3	15	0,2
17*	0	0	0	5,3	15	0,2

* – центр куба (разработано автором)

Средние значения опытных данных для каждой точки плана, а также рассчитанные теоретические значения исследуемых физико-механических показателей смеси для ШТП приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытаний опытных образцов и расчетные значения свойств

№ опыта	Физико-механические свойства					
	W	R ₀	K _{вод}	R ₅₀	C	R _{раск}
1	4.21/4.40	7.11/7.17	0.90/0.88	1.04/0.95	0.19/0.21	4.37/4.11
2	3.01/2.95	9.09/9.29	0.94/0.93	1.65/1.73	0.35/0.36	4.97/4.88
3	3.57/3.64	10.00/10.06	0.89/0.88	2.17/2.078	0.46/0.47	4.74/5.01
4	5.69/5.64	8.83/8.47	0.88/0.87	1.70/1.67	0.32/0.30	4.31/4.15
5	4.17/4.02	8.51/8.54	0.86/0.91	1.43/1.56	0.29/0.28	3.75/3.99
6	4.28/4.23	7.75/8.20	0.92/0.93	1.51/1.63	0.30/0.31	3.71/ 4.19
7	3.90/4.09	8.84/9.28	0.90/0.91	2.30/2.43	0.50/0.53	4.93/4.35
8	2.91/3.11	10.17/ 9.51	0.95/0.96	2.18/2.09	0.49/0.48	4.96/4.23
9	3.14/3.10	8.53/7.86	0.92/0.94	2.21/2.11	0.48/0.43	4.41/4.74
10	3.67/3.57	8.46/8.61	0.97/0.95	2.06/2.04	0.39/0.41	3.94/4.11
11	3.10/2.99	7.63/7.63	0.91/0.91	1.39/1.48	0.26/0.26	5.30/5.09
12	2.75/2.77	8.22/8.63	0.97/0.97	1.95/1.97	0.38/0.41	4.09/4.31
13	3.75/3.52	10.17/10.17	0.92/0.93	1.80/1.89	0.53/0.52	3.16/3.48
14	4.27/4.29	9.82/ 9.68	0.91/0.91	1.85/1.76	0.36/0.35	4.03/4.18
15	2.96/3.26	9.08/8.82	0.96/0.95	1.83/1.73	0.36/0.33	4.21/3.72
16	3.67/3.57	8.46/8.61	0.97/0.95	2.06/2.04	0.39/0.41	3.94/4.11
17	3.67/3.57	8.46/8.61	0.97/0.95	2.06/2.04	0.39/0.41	3.94/4.11

Примечание: над чертой – экспериментальный результат, под чертой – теоретический результат (разработано автором)

Выделив все существующие факторы и взаимодействия и оценив соответствующие им коэффициенты регрессии, проверялась адекватность описания экспериментальных результатов. Зависимость между исследуемыми переменными и физико-механическими свойствами вяжущих была установлена с помощью уравнения регрессии:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_3 + b_6X_3^2 + b_7X_1X_2 + b_8X_1X_3 + b_9X_2X_3 \quad (2)$$

Численные значения коэффициентов регрессии полиномиальных моделей второго порядка приведены в таблице 4.

Таблица 4

Коэффициенты регрессии полиномиальных моделей смеси для ШТП

Коэффициенты регрессии	Функция отклика					
	Y_{1W}	Y_{2R0}	$Y_{3K_{вод}}$	Y_{4R50}	Y_{5C}	$Y_{6R_{рас}}$
b0	3.567	8.607	0.947	2.041	0.407	4.105
b1	-0.497	-0.708	0.013	-0.158	0.050	0.197
b2	-0.382	0.140	0.020	0.084	0.027	-0.135
b3	-0.556	0.651	0.016	0.227	0.078	0.020
b4	0.029	-0.037	-0.019	0.229	0.070	0.441
b5	0.075	0.074	-0.019	-0.398	-0.097	-0.249
b6	0.103	0.243	0.005	-0.182	-0.022	0.106
b7	-0.016	-0.189	-0.002	0.108	-0.001	0.239
b8	0.136	0.130	0.010	0.093	-0.005	-0.021
b9	0.306	-0.277	0.002	-0.072	-0.002	-0.389

Разработано автором

Полученные модели адекватно описывают поведение системы, т. к. выполняется необходимое условие:

$$F_p < F_{табл} \quad (3)$$

Расчётные значения критерия Фишера представлены в таблице 5. Критерий Фишера применяется для проверки равенства дисперсий двух выборок. Его относят к критериям рассеяния.

Найденное расчетное значение сравнивается с табличным значением, которое приводятся в справочной литературе. Таблица построена следующим образом. Столбцы связаны с определенным числом степеней свободы для числителя f_1 , а строки – для знаменателя f_2 . На пересечении соответствующих строки и столбца стоят критические значения F – критерия. Как правило, в технических задачах используется уровень значимости 0,05. Если рассчитанное значение F – критерия не превышает табличного, то с соответствующей доверительной вероятностью (не менее 95 %) модель можно считать адекватной. При превышении табличного значения эту модель приходится отвергать.

Таблица 5

Значения критерия Фишера математических моделей

№	Вид модели	Значения $F_{табл}$	Значения F_p
1	Водонасыщение (Y_1)	0.056619	0.003537
2	Прочность на сжатие при 0 °С (Y_2)	0.299589	0.082273
3	Коэффициент водостойкости (Y_3)	0.000985	0.000082
4	Прочность при сжатии при 50 °С (Y_4)	0.040892	0.029096
5	Сцепление при сдвиге (Y_5)	0.001229	0.000153
6	Прочность при расколе (Y_6)	0.330792	0.019112

На рисунке 1–2 представлены изолинии и изоповерхности изменения свойств ШТП в зависимости от содержания РТЭП и гидратной извести при одинаковом содержании битума по массе.

Где: 1 – сцепление при сдвиге;

2 – прочность при 50 °С;

- 3 – $K_{\text{вод}}$ при длительном водонасыщении;
- 4 – прочность при расколе;
- 5 – водонасыщение;
- 6 – прочность при 0 °С.

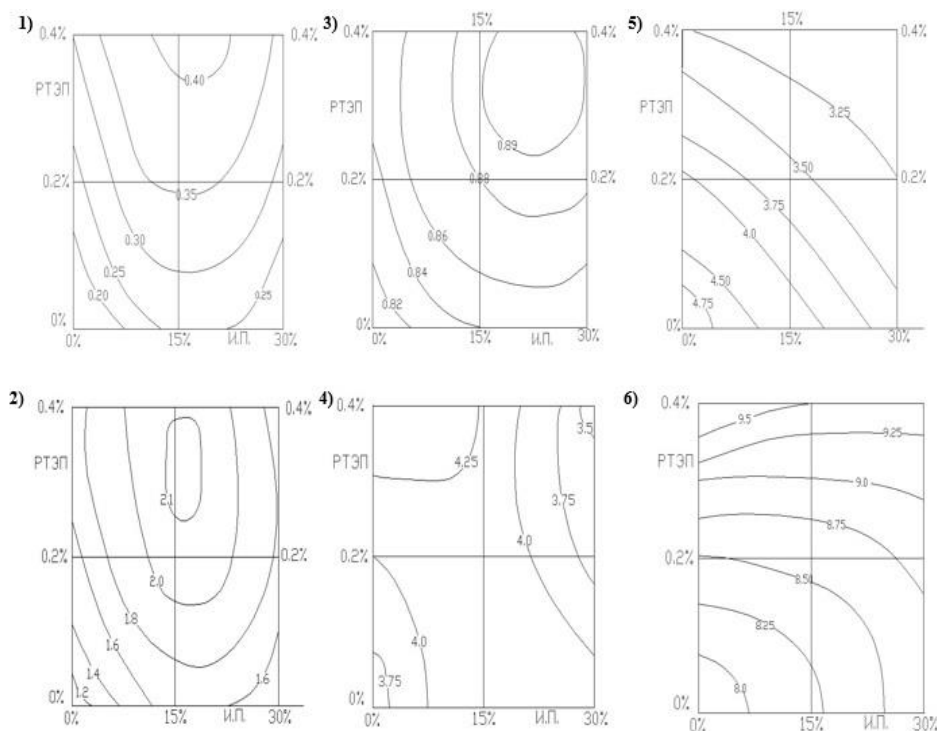


Рисунок 1. Изолинии экспериментально-статистических моделей свойств смесей для ШТП в зависимости от содержания РТЭП и гидратной извести (разработано автором)

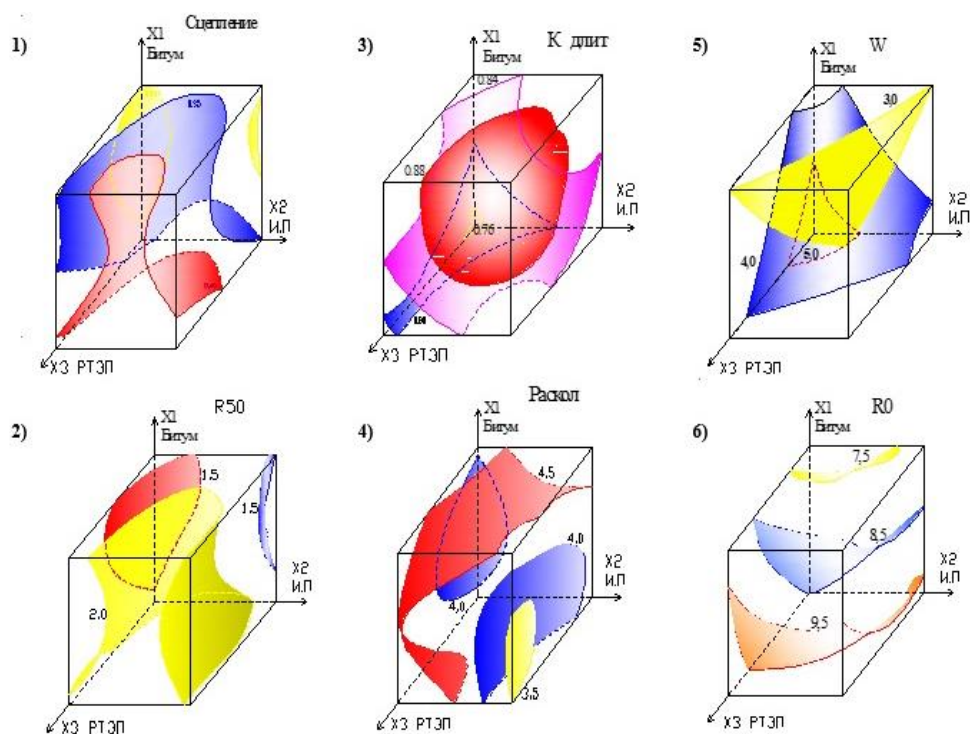


Рисунок 2. Изоповерхности экспериментально-статистических моделей свойств смесей для ШТП в зависимости от содержания РТЭП и гидратной извести (разработано автором)

Анализ экспериментально-статистических моделей смесей для ШТП, модифицированных полимерно-армирующей добавкой РТЭП указывает на значительные отличия свойств исходной и модифицированных смесей. Долговечность смесей для ШТП во многом зависит от водостойкости самого слоя. На рисунке 1 (3, 5) и рисунке 2 (3, 5) показаны изолинии и изоповерхности экспериментально-статистической модели коэффициента водостойкости и водонасыщения ШТП.

Снижению водонасыщения сформованных образцов способствуют все три фактора ($b_1 = 0,013$, $b_2 = 0,020$ и $b_3 = 0,016$), то есть битум, РТЭП и содержание гидратной извести в составе минерального порошка. Из рисунка 2 (5) видно, что степень воздействия всех факторов приблизительно одинакова. При переходе варьируемых параметров X_1 , X_2 , X_3 от значения +1 к значению -1 наблюдается значительное увеличение показателя водонасыщения асфальтобетона (больше 5 %).

Из рисунка 2 (5), можно выделить область, в которой водонасыщение асфальтобетона ниже 3 % (область выше желтой изоповерхности с индексом 3,0). Сочетание факторов $X_3 = +1$, $X_2 = +1$ и $X_1 = +1$ обеспечивает наименьшее водонасыщение при выдерживании во воде и понижается в данном случае до 2,77 %.

Коэффициент водостойкости соответствует степени водонасыщения смесей для ШТП и воздействию всех трех факторов: содержанию битума, РТЭП и ГИ, которые почти равноценны. Большое содержание битума, РТЭП и ГИ обеспечивают устойчивость смесей для ШТП к коррозионным воздействиям воды. С другой стороны, повышенные количества указанных добавок, выше допустимых пределов, значительно понижающих глубину проникания иглы и повышающих температуру размягчения вяжущего, затрудняют процессы приготовления, укладки и уплотнения смеси в связи с увеличением технологической температуры [11]. Повышенное содержание битума улучшает водостойкость, но снижает прочность смесей ШТП при всех температурах. Поэтому, необходимо выбирать количество вяжущего при оптимальных значениях всех показателей свойств смеси.

На рисунке 1 (1) и рисунке 2 (1) показаны изолинии и изоповерхности экспериментально-статистической модели сцепления вяжущего при сдвиге при температуре 50 °С. Содержание битума и РТЭП являются решающими факторами, оказывающими влияние на показатель сцепления смеси для ШТП при сдвиге, коэффициенты регрессии которых отвечают значениям соответственно $b_1 = 0,050$ и $b_3 = 0,078$. Наличие РТЭП в смеси, обеспечивает создание полимерной структуры асфальтовому вяжущему, придает смесям ШТП устойчивость на сдвиг при высоких температурах, что позволяет считать РТЭП основным фактором, влияющим на сдвиг.

На рисунке 1 (1) показана зависимость показателя сцепления при сдвиге в зависимости от трех рассматриваемых факторов. При одинаковых количествах битума и РТЭП, сцепление при сдвиге достигает максимального значения при введении в смесь 15–20 % (от массы минерального порошка) гидратной извести). Увеличение содержания ГИ более чем на 20 % ухудшает этот показатель, хотя прочность на сжатие при этом повышается. Последнее объясняется тем, что известь обладает очень большой удельной поверхностью и при ее повышении, вяжущего недостаточно для полного обволакивания минерального материала. При сочетании 5,3 % битума, 0,3 % РТЭП и 20 % ГИ (от массы минерального порошка) сцепление при сдвиге достигает высоких значений – 0,40 МПа.

Влияние всех трех факторов на прочность при 50 °С отражается значениями коэффициентов регрессии для функции отклика Y_4 – прочность на сжатие при 50 °С ($b_1 = -0,158$, $b_2 = 0,084$ и $b_3 = 0,227$). Отрицательное значение коэффициента b_1 (-0,158) свидетельствует о том, что увеличение содержания битума, как всегда, приводит к снижению

прочности при 50 °С. Значения же $b_2 = 0,084$ и $b_3 = 0,227$ показывают повышение показателя прочности R50. Особенное влияние, больше всех других факторов, на этот показатель оказывает введение добавки РТЭП. что подчеркивает его особое воздействие на температурную устойчивость смесей для ШТП, обеспечивая повышенную сдвигоустойчивость ШТП при высоких летних температурах.

На рисунке 1 (1) показана изолиния экспериментально-статистических модели R50 в зависимости от содержаний РТЭП и ГИ при содержании битума 5,3 %. Из рисунка видно, что прочность смесей для ШТП при 50 °С достигает максимального значения при содержании РТЭП и ГИ в количествах соответственно 0,3 % и 15 % по массе.

На рисунке 1 (6) и рисунке 2 (6) показаны изолинии и изоповерхность экспериментально-статистической модели предела прочности на сжатие при 0 °С. Анализ этих моделей показывает картину, аналогичную модели прочности при 50 °С. При этом с увеличением РТЭП и ГИ повышается R0, а с ростом содержания битума – понижается этот показатель, хотя степень влияния этих добавок неодинакова. Им соответствуют значения: $b_1 = -0,708$; $b_2 = 0,140$; $b_3 = 0,651$. Прочность при сжатии при 0 °С уменьшается при переходе X1 от -1 до +1 или X3 от +1 до -1. Оптимальные значения в сравнении с другими показателями достигаются при сочетании X1 = X3 = 0, при содержании битума и РТЭП соответственно в пределах 5,3 % и 0,2 %.

На рисунке 1 (4) и рисунке 2 (4) показана зависимость трещиностойкости асфальтобетон по пределу прочности на растяжение при расколе от содержания битума, РТЭП и ГИ. Битумное вяжущее оказывает самое большое влияние на этот показатель. Коэффициент регрессии для этого фактора $b_1 = 0,197$. Термоэластопласт РТЭП не сильно влияет на показатель прочности при расколе при температуре 0 °С, коэффициенту регрессии его $b_3 = 0,020$. Гидратная известь в этой ситуации снижает прочность при расколе из-за большой ее удельной поверхность, что способствует адсорбции большого количества битума на ее частицах. В результате этого асфальтобетон для ШТП становится более прочным, но приобретает хрупкость. Отрицательный эффект ГИ можно компенсировать увеличением битума. Использование большего количества битума, с одной стороны, повышает прочность при расколе, а также улучшает водостойкость ШТП, особенно в условиях длительного водонасыщения.

Результаты проведенного полного трехфакторного эксперимента позволили установить рациональные области значений исследованных компонентов с целью получения ШТП смесей с оптимальными значениями физико-механических и эксплуатационных показателей: содержание битумного вяжущего 5,0–5,3 % (соответствует X1 = -0.5 до 0), резинового термоэластопласта 0,2–0,3 % (соответствует X2 = 0 до 0,5) и гидратной извести от 15–22,5 % по массе минерального порошка (соответствует X3 = 0 до 0,5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский В.А. Современные методы оптимизации композиционных материалов. Киев: Будівельник, 1983. 144 с.
2. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительного-технологических задач на ЭВМ. Киев: Высш. шк., 1989. 328 с.
3. Балабанов О.А., Чан Н.Х., Булатов Д.Д. Исследование влияния комплексной добавки из нанодисперсной извести-пушонки и термоэластопласта РТЭП на упрочняющие свойства асфальтового вяжущего для шероховатых тонкослойных покрытий ШТП // Строительство-2009: Юбилейная Междунар. научн. практич. конф. – Ростов-на-Дону, РГСУ, 2009. с. 27–29.
4. Иваньски М., Н.Б. Урьев. Асфальтобетон как композиционный материал (с нанодисперсным и полимерным компонентами). Под общей редакцией проф., д.х.н. – М.; «Техполиграфцентр», 2007, 668 с.
5. Д.С. Черных, С.В. Горелов, А.А. Пасечников Экспериментальные исследования по определению устойчивости к накоплению остаточных деформаций щебеночно-мастичных асфальтобетонов ЦМА-11 приготовленных на гармонизированных составах // Инженерный вестник Дона, №4 (2016), ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3899.
6. Бонченко Г.А. Асфальтобетон. Сдвигоустойчивость и технология модифицирования полимером / М. Машиностроение, 1994. 176 с.
7. Д.С. Черных, Д.А. Строев, С.А. Батиров Гармонизация требований европейских норм к гранулометрическому составу SMA-11(ЦМА-11) с учетом требований российских стандартов // Инженерный вестник Дона, №3 (2016), ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3712.
8. Богуславский А.М. Зависимость реологических свойств асфальтобетона от его состава и структуры / А.М. Богуславский, И.А. Сархан, Л.Г. Ефремов // Автомобильные дороги. – 1977. № 8. с. 22–24.
9. Черных Д.С. Анализ требований зарубежных и отечественных норм к зерновым составам асфальтобетонов // Научное обозрение. – 2014, №11, часть 2., с. 430–433.
10. Scherocman J.A., Mesch K.A., Proctor J.J.: The Effect of Multiplate Freeze-Thaw Cycle Conditioning in the Moisture Damage in Asphalt Concrete Mixtures. // Proceedings Association Asphalt Paving Technologists. 1986, Vol. 55. p. 352–372.
11. Михайлов В.В., Долгов А.Н., Лаврухин В.П. Влияние добавки каучука на свойства асфальтобетона // Автомобильные дороги. – 1971, № 11. с. 21–22.

Chernykh Dmitriy Sergeevich

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: chdmitriy@nm.ru

Pakin Mihail Nikolaevich

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: nobodyone23rus@yandex.ru

Modeling of compositions and predicting properties of modified mixtures for rough thin-layer coatings

Abstract. In recent years, the approach to experimental and statistical research and optimization of complex multicomponent systems has changed radically. In various fields of scientific and technical research, methods of mathematical planning of experiments are successfully used. Their wide application significantly increases the effectiveness of research, as well as proves their universality and suitability in most studies of building materials.

As a result, the authors present a method of mathematical planning of the experiment, which is used to optimize the composition and properties of modified mixtures for rough thin-layer coatings. This method allows a fairly complete and comprehensive assessment of the effect of components on the properties of modified mixtures and to obtain a mathematical model of the process in graphical form, as well as to obtain a theoretical model for evaluating and predicting the physical, mechanical and operational properties of the materials under study.

In this article, the first stage of research was used to select the percentage of binder, hydrate lime and additives, and also studied the influence of the variation factor of these components on the physical and mechanical properties of the mixture. At the second stage, changes in response functions were investigated.

The results of a complete three-factor experiment allowed us to establish rational ranges of values of the studied components in order to obtain mixtures for rough concolay coatings with optimal values of physical, mechanical and operational parameters.

Keywords: modified mixtures for rough thin-layer coatings (SHTP); mathematical planning of the experiment; water saturation (W; %); compressive strength at 0°C (R0; MPa); water resistance coefficient (Kvod); compressive strength at 50 °C (R50; MPa); binder adhesion by Marshall (C; MPa); split strength (Rras MPa)

REFERENCES

1. Voznesenskiy V.A. (1983). *Sovremennyye metody optimizatsii kompozitsionnykh materialov. [Modern methods for optimizing composite materials.]* Kiev: Builder, p. 144.
2. Voznesenskiy V.A. (1989). *Chislennyye metody resheniya stroitel'no-tekhnologicheskikh zadach na EhVM. [Numerical methods for solving construction and technological problems on a computer.]* Kiev: High school, p. 328.
3. Balabanov O.A., Chan N.Kh., Bulatov D.D. (2009). *Issledovanie vliyaniya kompleksnoy dobavki iz nanodispersnoy izvesti-pushonki i termoeoplasta RTEhP na uprochnyayushchie svoystva asfal'tovogo vyazhushchego dlya sherokhovatykh tonkosloynnykh pokrytiy ShTP. [Investigation of the effect of a complex additive from nanodispersed lime-fluff and RTEL thermoplastic elastomer on the hardening properties of asphalt binder for rough ShTP thin-layer coatings.]* Rostov-on-Don: Rostov State University of Civil Engineering, pp. 27–29.
4. Ivan'ski M., Ur'ev N.B. (2007). *Asfal'tobeton kak kompozitsionnyy material (s nanodispersnym i polimernym komponentami). [Asphalt concrete as a composite material (with nanodispersed and polymer components).]* Moscow: Technical Polygraph Center, p. 668.
5. Chernykh D.S., Gorelov S.V., Pasechnikov A.A. (2016). Experimental studies to determine the resistance to accumulation of residual deformations of crushed stone-mastic asphalt concrete SchMA-11 prepared on harmonized compositions. *Engineering Bulletin of the Don*, [online] 4. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3899 (in Russian).
6. Bonchenko G.A. (1994). *Asfal'tobeton. Sdvigoustoychivost' i tekhnologiya modifitsirovaniya polimerom. [Asphalt Concrete. Shear resistance and polymer modification technology.]* Moscow: Engineering, p. 176.
7. Chernykh D.S., Stroev D.A., Batirov S.A. (2016). Harmonization of requirements of European standards for particle size distribution SMA-11 (IIQMA-11) taking into account the requirements of Russian standards. *Engineering Bulletin of the Don*, [online] 3. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3712 (in Russian).
8. Boguslavskiy A.M., Sarkhan I.A., Efremov L.G. (1977). The dependence of the rheological properties of asphalt concrete on its composition and structure. *Car roads*, 8, pp. 22–24 (in Russian).
9. Chernykh D.S. (2014). Analysis of requirements of foreign and domestic standards for grain compositions of asphalt concrete. *Scientific Review*, 11, pp. 430–433 (in Russian).
10. Scherocman J.A., Mesch K.A., Proctor J.J. (1986). The Effect of Multiplate Freeze-Thaw Cycle Conditioning in the Moisture Damage in Asphalt Concrete Mixtures. *Proceedings Association Asphalt Paving Technologists*, (55), pp. 352–372.
11. Mikhaylov V.V., Dolgov A.N., Lavrukhin V.P. (1971). The effect of rubber additives on the properties of asphalt concrete. *Highways*, 11, pp. 21–22 (in Russian).