

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ СОСТАВОВ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

**М.А. Высоцкая, С.Ю. Шеховцова<sup>1</sup>**

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова),  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46;*

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

**АННОТАЦИЯ.** С системных позиций рассмотрена проблема обеспечения качества полимерно-модифицированных битумных вяжущих. Изучены основные аспекты метода математического планирования эксперимента — многокритериальной оптимизации. Сформулировано определение оптимизации, в соответствии с ним предложены частные и обобщенные критерии эффективности, посредством которых произведены разработка и анализ эффективных и рентабельных составов полимерно-битумных вяжущих.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** полимерно-битумное вяжущее, оптимизация, частные и обобщенные критерии эффективности

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю. Разработка и анализ составов полимерно-битумных вяжущих на основе метода многокритериальной оптимизации // Строительство: наука и образование. 2017. Т. 7. Вып. 4 (25). Ст. 4. Режим доступа: <http://nso-journal.ru>.

## OPTIMIZATION OF COMPOSITIONS OF POLYMER-MODIFIED BINDERS WITH ACCOUNT OF EFFECTIVENESS CRITERIA

**M.A. Vysotskaya, S.Yu. Shekhovtsova<sup>1</sup>**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov),  
46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russian Federation;*

*<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),  
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

**ABSTRACT.** The problem of quality assurance of polymer-modified bituminous binders is considered from the system positions. The main aspects of the method of mathematical experimental design — multicriteria optimization — are studied. The definition of optimization is worded, and according to it, subtest and generalized efficiency criteria are proposed, through which the development and analysis of efficient and cost-effective compositions of polymeric-bitumen binders are carried out.

**KEY WORDS:** polymeric-bitumen binder, optimization, subtest and generalized efficiency criteria

**FOR CITATION:** Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu. Razrabotka i analiz sostavov polimerno-bitumnykh vyazhushchikh na osnove metoda mnogokriterial'noy optimizatsii [Optimization of compositions of polymer-modified binders with account of effectiveness criteria]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. 2017, vol. 7, issue 4 (25), paper 4. Available at: <http://nso-journal.ru>. (In Russian)

### ВВЕДЕНИЕ

К выбору полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) в дорожно-строительной отрасли подходят с особым отношением. Это объясняется сложностью системы, их увеличенной стоимостью по сравнению с битумом, а также значительным разбросом в цене на ПБВ одной марки. Поэтому, принимая окончательное решение, руководствуются определенными, соответствующим конкретным условиям,

критериями качества. Но действие всех известных параметров направлено на достижение оптимального значения показателей качества материала.

Качество материала характеризуется совокупностью множества так называемых частных критериев, а также всевозможных способов достижения поставленных задач с множественными комбинационными решениями. Но как разобраться и выбрать оптимальное? Системный подход при разработке и исследовании сложных систем позволяет

упростить сложность и ограничить разнообразие формализованного описания системы с учетом возможного проявления свойств и неопределенности. В результате чего появляется возможность решения задачи многокритериальной оптимизации, которая заключается в управлении характеристиками материала как сложной системой в условиях неопределенных целей и действий [1–17].

Еще один немаловажный вопрос: как сформулировать единую цель, если критериев много, а ресурс достижения находится в «одних руках»? В этом и заключается проблема неопределенности целей. Добиться оптимизации одновременно всех критериев невозможно в принципе. В действительности же существует возможность достижения только сочетания требуемых качеств [2, 3]. Поэтому «оптимизировать» означает найти такое решение, при котором значения целевых функций были бы наилучшими для заданных и необходимых условий задачи.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении аналитического поиска и анализа формируется множество всевозможных вариантов достижения поставленной цели. ПБВ можно представить как сложную систему, в которой подсистемы связаны между собой в единое целое заданными соотношениями. Свойства сложной системы определяются не только свойствами элементов (исходных компонентов), но и характером взаимодействия между ними. Поэтому при разработке сложного функционального материала для получения достаточной информации о системе необходимо проводить системный анализ.

В работе, исходя из имеющихся опыта и знаний в данной области, на основе предварительно про-

веденных исследованиях ПБВ [18–20] подобраны и приведены возможные варианты компонентного состава ПБВ 60 (табл. 1), предположительно обеспечивающие получение конечного продукта, по свойствам соответствующего нормативным требованиям ГОСТ 52056-2003, ГОСТ 22245-90<sup>1</sup>.

В качестве сырьевых компонентов использовали битум марки БНД 60/90 производства завода «Московский НПЗ» и БНД 90/130 — «Саратовский НПЗ», дивинилстирольный термоэластопласт (ДСТ 30Р-01) и пластификатор индустриальное масло марки И-40.

Выбор марок битума обоснован максимальным охватом среднемесячных температур наиболее холодного времени года, в соответствии с которыми регламентируется область применения дорожных битумов.

Результаты модифицирования битумов БНД 60/90 и 90/130 представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

Оценку комплексного влияния компонентного состава на свойства ПБВ, характеризующие его качество, производили с помощью методов многокритериальной оптимизации [2, 3, 9]. Выбор оптимального состава производился по оценке влияния различных процентных соотношений рецептурных компонентов на показатели качества ПБВ. Для получения многофакторной математической модели необходимо из значительного числа факторов, влияющих на моделируемые критерии качества, выбрать статистически значимые для последующего их включения в оптимизационный эксперимент. Это

<sup>1</sup> ГОСТ Р 52056-2003 Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блоксополимеров типа стирол-бутадиен-стирол. Технические условия.

ГОСТ 22245-90 Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия (с Изменением № 1).

Табл. 1. Составы ПБВ-60, выполненные на битуме БНД

Номер состава	Составляющие компоненты, %			
	БНД 60/90		БНД 90/130	
	Пластификатор	Полимер	Пластификатор	Полимер
1	3,5	3,0	2,5	2,8
2	3,5	3,3	2,5	3,0
3	3,5	3,5	2,5	3,2
4	3,5	3,8	2,5	3,5
5	4,0	3,0	2,0	2,8
6	4,0	3,3	2,0	3,0
7	4,0	3,5	2,0	3,2
8	4,0	3,8	<b>2,0</b>	<b>3,5</b>
9	4,5	3,0	1,8	2,8
10	4,5	3,3	1,8	3,0
11	<b>4,5</b>	<b>3,5</b>	1,8	3,2
12	4,5	3,8	1,8	3,5

Табл. 2. Физико-механические показатели ПБВ-60 на битуме БНД 60/90

Наименование показателей	ГОСТ 22245-90	Номера составов вяжущих											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Глубина проникания иглы, мм <sup>-1</sup> : при 25 °С при 0 °С	60	51	46	41	37	60	56	50	46	69	65	<b>62</b>	51
	32	22	20	22	20	27	24	25	21	32	31	<b>32</b>	28
Температура размягчения по прибору КиШ, °С	54	57	58	60	63	59	61	65	68	64	66	<b>69</b>	70
Температура хрупкости по Фраасу $T_{хр}$ , °С	-20	-20	-20	-21	-20	-22	-21	-22	-20	-20	-23	<b>-24</b>	-9
Растяжимость, см: при 25 °С при 0 °С	25	13	12	12	11	19	17	16	13	26	24	<b>49</b>	22
	11	7	7	8	6	10	10	11	9	13	13	<b>15</b>	10
Эластичность, %: при 25 °С при 0 °С	80	53	56	61	68	59	62	69	74	67	68	<b>90</b>	91
	70	42	45	51	59	50	52	58	65	53	55	<b>79</b>	71

Табл. 3. Физико-механические показатели ПБВ-60, на битуме БНД 90/130

Наименование показателей	ГОСТ 22245-90	Номера составов вяжущих											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Глубина проникания иглы, мм <sup>-1</sup> : при 25 °С при 0 °С	60	90	88	64	66	78	76	73	<b>68</b>	59	54	54	48
	32	56	53	33	33	52	47	44	<b>33</b>	22	19	18	18
Температура размягчения по прибору КиШ, °С	54	56	57	58	66	57	58	60	<b>64</b>	54	60	69	62
Температура хрупкости по Фраасу $T_{хр}$ , °С	-20	-26	-25	-23	-23	-22	-23	-23	<b>-24</b>	-24	-23	-21	-21
Растяжимость, см: при 25 °С при 0 °С	25	45	41	50	56	51	56	58	<b>70</b>	50	40	36	36
	11	16	16	21	18	17	19	24	<b>25</b>	13	12	10	10
Эластичность, %: при 25 °С при 0 °С	80	50	53	72	71	70	70	74	<b>80</b>	68	72	76	76
	70	42	42	65	65	62	64	70	<b>75</b>	66	68	68	70

возможно, когда установлен ограниченный требуемый ряд критериев.

В данной работе расчет производился на примере полного факторного эксперимента, поэтому учитывались все параметры качества, регламентируемые ГОСТ 52056-2003 и ГОСТ 22245-90. В соответствии с этой методикой для выбора оптимального состава ПБВ необходимо оценить эффективность каждого состава (см. табл. 2 и 3). Оптимизация является комплексным анализом, оценка которого осуществляется по параметрам, обеспечивающим получение ПБВ надлежащего качества, отвечающего нормативным документам. При этом полученные показатели качества должны превышать нормативные, которые были приняты за базовые. Критерием качества выступает численная величина, характеризующая способность удовлетворить установленные потребности. Частный критерий эффективности рассчитывается по формуле (на примере показателя пенетрации при 25 °С):

$$K_{П25} = \frac{\Pi_{25}^i}{\Pi_{25ГОСТ}}$$

где  $K_{П25}$  — частный критерий эффективности;  $\Pi_{25}^i$  — фактический показатель;  $\Pi_{25ГОСТ}$  — требование ГОСТ.

На основании представленной формулы рассчитывался критерий эффективности для каждого показателя вяжущего ПБВ-60 из табл. 2 и 3. Результаты представлены в табл. 4 и 5.

На основании полученной базы частных критериев эффективности проводили оптимизацию составов ПБВ 60 по обобщенному критерию эффективности, вид которого учитывает особенности анализируемого объекта. Рассчитывается он для каждого состава вяжущего по формуле

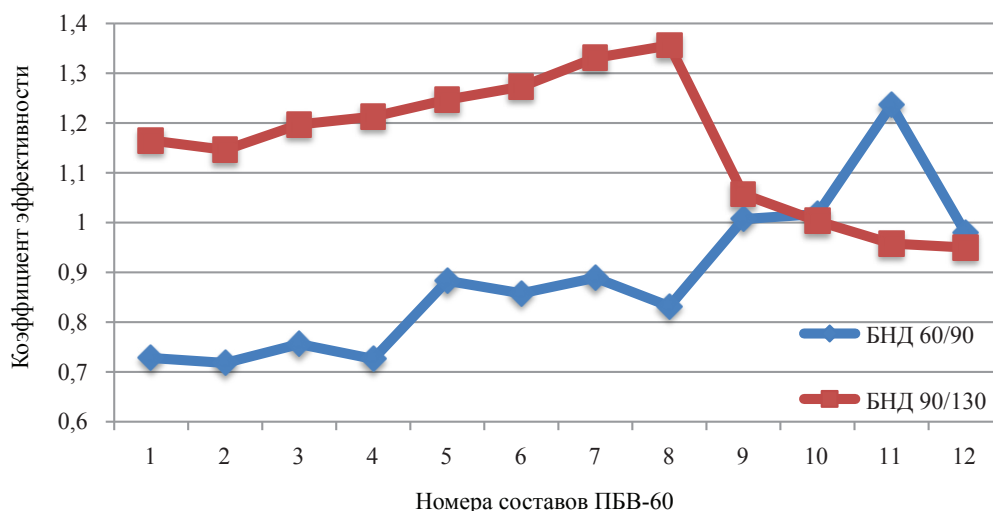
$$K_{эф} = \sqrt[n]{N_{n=1}^i K_i} = \sqrt[8]{K_{П25} K_{П10} K_{Тразм} K_{Тхр} K_{Д25} K_{Д10} K_{Э25} K_{Э0}}$$

Табл. 4. Критерии эффективности для ПБВ-60 на битуме БНД 60/90

Наименование показателей	Номера составов вяжущих											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Глубина проникания иглы, мм <sup>-1</sup> : при 25 °С при 0 °С	0,85	0,77	0,68	0,62	1,0	0,93	0,83	0,76	1,15	1,08	<b>1,03</b>	0,85
	0,68	0,63	0,69	0,63	0,84	0,75	0,78	0,66	1,0	1,0	<b>1,0</b>	0,88
Температура размягчения, °С	1,06	1,07	1,11	1,17	1,09	1,13	1,2	1,26	1,19	1,22	<b>1,3</b>	1,3
Температура хрупкости по Фраасу $T_{xp}$ , °С	1,0	1,0	1,05	1,0	1,10	1,05	1,10	1,0	1,0	1,15	<b>1,2</b>	1,95
Растяжимость, см: при 25 °С при 0 °С	0,52	0,48	0,48	0,44	0,76	0,68	0,64	0,52	1,0	0,96	<b>1,96</b>	0,88
	0,63	0,64	0,73	0,55	0,91	0,91	1,0	0,82	1,2	1,18	<b>1,36</b>	0,91
Эластичность, %: при 25 °С при 0 °С	0,66	0,7	0,76	0,85	0,74	0,78	0,86	0,93	1,84	0,85	<b>1,13</b>	1,14
	0,6	0,64	0,73	0,84	0,71	0,74	0,82	0,93	1,76	0,79	<b>1,13</b>	1,01

Табл. 5. Критерии эффективности для ПБВ-60 на битуме БНД 90/130

Наименование показателей	Номера составов вяжущих											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Глубина проникания иглы, мм <sup>-1</sup> : при 25 °С при 0 °С	1,50	1,46	1,06	1,10	1,30	1,26	1,21	<b>1,13</b>	0,98	0,90	0,90	0,80
	1,75	1,65	1,03	1,03	1,62	1,46	1,37	<b>1,03</b>	0,68	0,59	0,56	0,56
Температура размягчения по прибору КиШ, °С	1,03	1,05	1,07	1,22	1,05	1,07	1,11	<b>1,20</b>	1,04	1,10	1,12	1,14
Температура хрупкости по Фраасу $T_{xp}$ , °С	1,30	1,25	1,15	1,15	1,10	1,05	1,15	<b>1,20</b>	1,20	1,15	1,05	1,05
Растяжимость, см: при 25 °С при 0 °С	1,80	1,64	2,00	2,24	2,04	2,24	2,32	<b>2,80</b>	2,0	1,60	1,44	1,44
	1,45	1,45	1,90	1,63	1,54	1,72	2,18	<b>2,27</b>	1,18	1,09	0,09	0,90
Эластичность, %: при 25 °С при 0 °С	0,62	0,66	0,90	0,88	0,87	0,87	0,92	<b>1,0</b>	0,85	0,90	0,95	0,95
	0,60	0,60	0,92	0,92	0,88	0,91	1,0	<b>1,07</b>	1,94	0,97	0,97	1,0



Критерии эффективности составов ПБВ 60 на различных битумах

Результаты расчета обобщенных критериев эффективности для выбора оптимального состава ПБВ 60 на битумах двух марок приведены на рисунке.

Из представленного графика видно, что наилучший показатель обобщенного критерия эффективности для ПБВ 60 на битуме БНД 60/90 соответствует образцу вяжущего № 11, содержание варьируемых компонентов в котором составило: пластификатора — 4,5, а полимера — 3,5, для ПБВ 60, выполненного на битуме БНД 90/130; наилучший показатель критерия эффективности соответствует образцу вяжущего № 8, содержание компонентов в котором составило 2,0 и 3,5 соответственно.

## ВЫВОДЫ

Конечной целью работы было, варьируя компонентные составы и марки битума, подобрать эффективные составы ПБВ. В процессе постановки эксперимента была получена выборка данных, по формальным признакам отвечающая требованиям к ПБВ-60, состоящая из трех составов, приготовленных на битуме БНД 60/90, и восьми составов на битуме БНД 90/130. При этом необходимо отметить, что интервал варьирования процентного

содержания пластификатора и полимерного модификатора достаточно узок. Другими словами, при расширении диапазона варьирования компонентных составов или усложнении системы за счет введения дополнительного вещества (поверхностно-активных добавок, сшивающих агентов, ингибиторов старения и т.д.) при приготовлении ПБВ-60 вероятность получения составов, отвечающих требованиям стандартов, значительно возрастает. В результате исследователь сталкивается с проблемой выбора оптимального состава вяжущего из возможного множества, решить которую, не имея эффективного и всестороннего инструмента оценки, сложно, а при значительном объеме выборки данных и показателей задача становится практически неразрешимой. Используя системный анализ, возможно синтезировать сложную систему, что позволяет определить ее оптимальные рецептурно-технологические параметры, обеспечивающие достижение необходимых свойств. Таким образом, исследователь, имея на руках множество всевозможных данных по компонентному составу и его влиянию на качественные показатели конечного продукта, может, исходя из необходимых потребителю критериев качества, в кратчайшие сроки и с наименьшими трудовыми затратами подобрать оптимальный состав.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Бормотов А.Н., Прошин И.А., Королев Е.В.* Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов. Пенза : ПГТА, 2011. 352 с.
2. *Иноземцев С.С., Королев Е.В.* Эксплуатационные свойства наномодифицированных щебеночно-мастичных асфальтобетонов // Вестник МГСУ. 2015. № 3. С. 29–39.
3. *Бормотов А.Н.* Многокритериальный синтез композита как задача управления // Вестник ТГТУ. 2010. Т. 16. № 4. С. 924–937.
4. *Васильков А.В., Бормотов А.Н., Прошин И.А.* Компьютерное моделирование эволюции структурообразования лиофильных систем // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2011. № 2. С. 198–203.
5. *Mittag H.J., H. Rinne.* Statistical methods of quality assurance. London/New York : Chapman & Hall, 1993. 194 p.
6. *Иноземцев С.С., Королев Е.В.* Разработка наномодификаторов и исследование их влияния на свойства битумных вяжущих веществ // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 131–139.
7. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Основы теории систем и системного анализа. СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2001. 512 с.
8. *Колмогоров А.Н., Фомин С.В.* Функциональный анализ. М. : Наука, 1984. 295 с.
9. *Баженов Ю.М., Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В.* Системный анализ в строительном материаловедении. М. : Изд-во МГСУ, 2012. 432 с.
10. *Люпаев Б.М., Потанов Ю.Б., Борисов Ю.М., Полетаев Ю.А.* Бинарные оценки эффективности технических решений // Вестник ВГТУ. 2008. Т. 4. № 3. С. 57–60.
11. *Налимов В.В., Чернова Н.А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М. : Наука, 1965. 148 с.
12. *Райс Дж.* Матричные вычисления и математическое обеспечение / пер. с англ. О.Б. Арушаняна. М. : Мир, 1984. 264 с.
13. *Самарский А.А., Михайлов А.П.* Математическое моделирование. М. : Физматлит, 1997. 184 с.
14. *Bormotov A.N., Bublik O.V., Proshin A.P.* Epoxy composites with increased density for radiation protection // City, ecology, construction: Program, report and information at the international scientific and practical conference (Egypt. Cairo. 1999)
15. *Hocking R.R.* Methods and Applications of Linear Models: Regression and the Analysis of Variance. New York : Wiley, 1996. 347 p.
16. *Darlington R.B.* Regression and linear models. New York : McGraw-Hill, 1990. 256 p.
17. *Эбеллинг В., Энгель А., Файстель Р.* Физика процессов эволюции. М. : УРСС, 2001. 326 с.



18. Киндеев О.Н., Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю. Влияние вида пластификатора на свойства битума и полимерно-битумных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 1. С. 26–30.

19. Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю. Влияние морфологии на качественные показатели полимер-

но-битумного вяжущего // Мир нефтепродуктов. 2015. № 11. С. 19–24.

20. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu., Kindeev O.N. The destruction of polymer modified binder and prescription factors her determining // International Journal of Pharmacy and Technology. September 2016. Vol. 8 (3). Pp. 18200–18211.

Поступила в редакцию 14 июля 2017 г.

Принята в доработанном виде 2 октября 2017 г.

Одобрена для публикации 25 октября 2017 г.

О Б АВТОРАХ: **Высоцкая Марина Алексеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог, **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; goruri@rambler.ru;

**Шеховцова Светлана Юрьевна**, кандидат технических наук, ассистент кафедры строительных материалов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ShehovtsovaSYU@mgsu.ru; O-7490-2017.

## INTRODUCTION

Polymeric-bitumen binders (PBB) in the road construction industry must be selected with a special approach. This is due to the system complexity, its increased cost compared to bitumen, as well as a significant price range of the PBB of one brand. Therefore, when making a final decision, they are guided by certain efficiency criteria that meet specific conditions. But the influence of all known parameters is aimed at achieving the optimum value of material quality indicators.

Material quality is characterized by a combination of a set of so-called subtest criteria, as well as all possible ways to achieve the tasks with multiple combinational solutions. But how to understand and choose the optimal one? A systematic approach to the development and research of complex systems makes it possible to simplify the complexity and limit the variety of formalized description of the system, taking into account the possible demonstration of properties and uncertainty. As a result, it becomes possible to solve the problem of multicriteria optimization, which involves managing the characteristics of the material as a complex system in the context of uncertain goals and actions [1–17].

Another important question: how to define a single goal, if there are many criteria, and the resource of achievement is in “a single pair of hands”? This is the problem of ambiguity of goals. It is impossible to achieve optimization of all the criteria simultaneously, in principle. Actually, however, it is possible to achieve only a combination of the required qualities [2, 3]. Therefore, to “optimize” here means to find a solution in which the value of the objective functions would be best for the given and necessary conditions of the problem.

## RESEARCH RESULTS

When performing analytical search and analysis, a set of various options is formed to achieve the goal. PBB can be presented as a complex system in which the subsystems are connected together in a single whole by defined formulas. The properties of a complex system are determined not only by the properties of the elements (the primary components), but also by the nature of the interaction between it. Therefore, when developing a complex functional material to obtain sufficient information about the system, it is necessary to carry out a system analysis.

Based on the experience and knowledge in this field, based on the preliminary studies of polymeric-bitumen binders [18–20], the possible variants of the component composition of the PBB 60 are selected and shown (Table 1), presumably providing the final product meeting, according to its properties, the regulatory requirements of GOST 52056-2003, GOST 22245-90<sup>2</sup>.

Bitumen of BND 60/90 grade produced by the plant “Moscow Refinery” and BND 90/130 by “Saratov Refinery”, divinylstyrene thermoplastic elastomer (DST 30R-01) and plasticizer industrial oil I-40 were used as raw materials.

The choice of bitumen grades is determined by the highest possible coverage of the average monthly temperatures of the coldest season, in accordance with which the uses of road bitumen are regulated.

<sup>2</sup> GOST R 52056-2003 Polymeric-bitumen asphalt binders on the basis of block polymer of SBS type. Technical specification.

GOST 22245-90 Bitumen petroleum viscous for road building. Technical specification (as amended N1).

**Table 1.** Compositions PBB-60, made on bitumen BND

Composition No.	Components, %			
	BND 60/90		BND 90/130	
	Plasticizer	Polymeric material	Plasticizer	Polymeric material
1	3.5	3.0	2.5	2.8
2	3.5	3.3	2.5	3.0
3	3.5	3.5	2.5	3.2
4	3.5	3.8	2.5	3.5
5	4.0	3.0	2.0	2.8
6	4.0	3.3	2.0	3.0
7	4.0	3.5	2.0	3.2
8	4.0	3.8	<b>2.0</b>	<b>3.5</b>
9	4.5	3.0	1.8	2.8
10	4.5	3.3	1.8	3.0
<b>11</b>	<b>4.5</b>	<b>3.5</b>	1.8	3.2
12	4.5	3.8	1.8	3.5

The results of the modification of bitumen BND 60/90 and 90/130 are presented in Table 2 and 3 respectively.

Complex impact assessment of the component composition on the PBB properties, characterizing its quality, was performed using multicriterion optimization methods [2, 3, 9]. The choice of the optimal composition was made by impact assessment of various percentage ratios of the formulation components on the quality indicators of the PBB. To obtain a multifactor mathematical model, it is necessary to choose from a significant number of factors influencing the computational quality criteria to be statistically significant for its subsequent inclusion in the optimization experiment. This is possible when a limited set of criteria is established.

In this investigation, the calculation was made using the full factorial experiment as an example, so all the quality parameters regulated by GOST 52056-2003 and GOST 22245-90 were taken into account. In ac-

cordance with this methodology, to determine the optimal composition of the PBB, it is necessary to estimate the efficiency of each composition (see Tables 2 and 3). Optimization is a complex analysis, the evaluation of which is carried out according to the parameters ensuring the manufacturing of a PBB of the appropriate quality that meets the regulatory documents. At the same time, the quality indicators obtained must exceed the normative ones, which were accepted as basic. The quality criterion is a numerical value that characterizes the ability to satisfy established needs. A subtest efficiency criterion is calculated according to the formula (using as an example the penetration index at 25 °C):

$$C_{P_{25}} = \frac{P_{25}^i}{P_{25GOST}^i}$$

Where  $C_{P_{25}}$  — subtest efficiency criteria;  $P_{25}^i$  — actual parameter;  $P_{25GOST}^i$  — GOST requirement.

**Table 2.** Physical and mechanical parameters of PBB-60 on BND 60/90 bitumen

Parameter name	GOST 22245-90	Binder composition No.												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Needle penetration, mm <sup>-1</sup> :														
at 25 °C	60	51	46	41	37	60	56	50	46	69	65	<b>62</b>	51	
at 0 °C	32	22	20	22	20	27	24	25	21	32	31	<b>32</b>	28	
Melting point on instrument (ring-and-ball method), °C	54	57	58	60	63	59	61	65	68	64	66	<b>69</b>	70	
Fraas brittle point $T_{br}$ , °C	-20	-20	-20	-21	-20	-22	-21	-22	-20	-20	-23	<b>-24</b>	-9	
Expansivity, cm:														
at 25 °C	25	13	12	12	11	19	17	16	13	26	24	<b>49</b>	22	
at 0 °C	11	7	7	8	6	10	10	11	9	13	13	<b>15</b>	10	
Elasticity, %:														
at 25 °C	80	53	56	61	68	59	62	69	74	67	68	<b>90</b>	91	
at 0 °C	70	42	45	51	59	50	52	58	65	53	55	<b>79</b>	71	

**Table 3.** Physical and mechanical parameters of PBB-60 on BND 90/130 bitumen

Parameter name	GOST 22245-90	Binder composition No.											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Needle penetration, mm <sup>-1</sup> :													
at 25 °C	60	90	88	64	66	78	76	73	<b>68</b>	59	54	54	48
at 0 °C	32	56	53	33	33	52	47	44	<b>33</b>	22	19	18	18
Melting point on instrument (ring-and-ball method), °C	54	56	57	58	66	57	58	60	<b>64</b>	54	60	69	62
Fraas brittle point $T_{br}$ , °C	-20	-26	-25	-23	-23	-22	-23	-23	<b>-24</b>	-24	-23	-21	-21
Expansivity, cm:													
at 25 °C	25	45	41	50	56	51	56	58	<b>70</b>	50	40	36	36
at 0 °C	11	16	16	21	18	17	19	24	<b>25</b>	13	12	10	10
Elasticity, %:													
at 25 °C	80	50	53	72	71	70	70	74	<b>80</b>	68	72	76	76
at 0 °C	70	42	42	65	65	62	64	70	<b>75</b>	66	68	68	70

On the basis of the presented formula, an efficiency criterion was calculated for each indicator of binder PBB-60 from Table 2 and 3. The results are shown in Table 4 and 5.

On account of the obtained base of subtest efficiency criteria, the PBB 60 compositions were optimized according to the generalized efficiency criterion, the form of which takes into account the features of the analyzed object. It is calculated for each binder composition by formula

$$C_{ef} = \sqrt[n]{N_{n-1}^i C_i} = \sqrt[8]{C_{P25} C_{P0} C_{Tmelt} C_{Tbr} C_{D25} C_{D0} C_{E25} C_{E0}}$$

Calculation data of generalized efficiency criteria for selecting the optimum composition of PBB 60 on bitumen of two grades are shown in the figure.

It can be seen from the presented diagram that the best indicator of the generalized efficiency criterion for PBB 60 on bitumen BND 60/90 corresponds to the binder sample No. 11, with the following content of the variable components: plasticizer — 4.5, and poly-

mer — 3.5, for PBB 60, on bitumen BND 90/130; the best indicator of the efficiency criterion corresponds to the sample of binder No. 8, the content of components in which was 2.0 and 3.5, respectively.

### SUMMARY

The ultimate objective of the work was, by varying the components of the compositions and grades of bitumen, to select the effective compositions of polymer-bitumen binders. During the setting up of the experiment, a data sample was obtained, according to formal criteria, meeting the requirements for PBB-60, consisting of three compositions prepared on bitumen BND 60/90, and eight compositions on bitumen BND 90/130. It should be noted that the variability interval of the plasticizer and polymer modifier percentage is rather narrow. In other words, the probability of obtaining compositions meeting the requirements of standards is significantly increased with the expansion of the variability interval of blend compositions or the complication of the system due to the introduction of additional substance

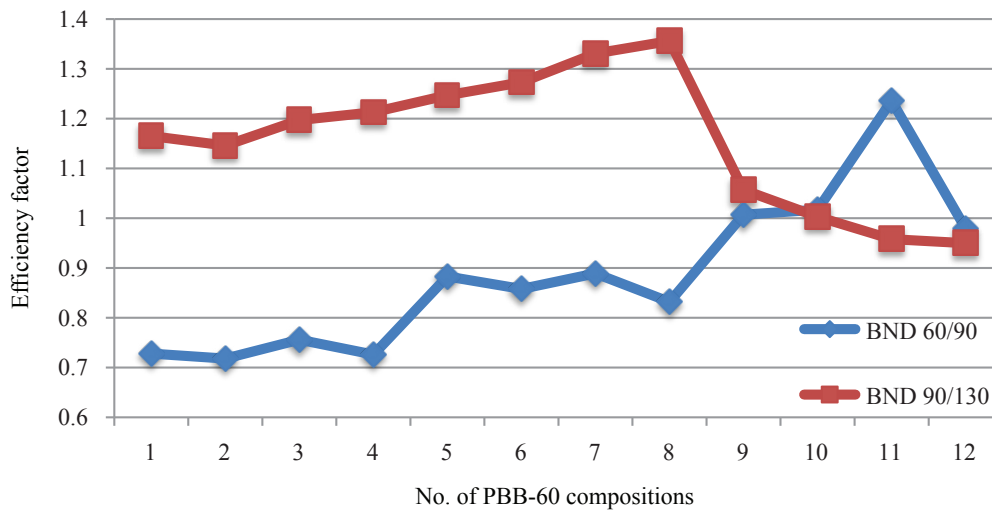
**Table 4.** Efficiency criteria for PBB-60 on BND 60/90 bitumen

Parameter name	Binder composition No.												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Needle penetration, mm <sup>-1</sup> :													
at 25 °C	0.85	0.77	0.68	0.62	1.0	0.93	0.83	0.76	1.15	1.08	<b>1.03</b>	0.85	
at 0 °C	0.68	0.63	0.69	0.63	0.84	0.75	0.78	0.66	1.0	1.0	<b>1.0</b>	0.88	
Melting point, °C	1.06	1.07	1.11	1.17	1.09	1.13	1.2	1.26	1.19	1.22	<b>1.3</b>	1.3	
Fraas brittle point $T_{br}$ , °C	1.0	1.0	1.05	1.0	1.10	1.05	1.10	1.0	1.0	1.15	<b>1.2</b>	1.95	
Expansivity, cm:													
at 25 °C	0.52	0.48	0.48	0.44	0.76	0.68	0.64	0.52	1.0	0.96	<b>1.96</b>	0.88	
at 0 °C	0.63	0.64	0.73	0.55	0.91	0.91	1.0	0.82	1.2	1.18	<b>1.36</b>	0.91	
Elasticity, %:													
at 25 °C	0.66	0.7	0.76	0.85	0.74	0.78	0.86	0.93	1.84	0.85	<b>1.13</b>	1.14	
at 0 °C	0.6	0.64	0.73	0.84	0.71	0.74	0.82	0.93	1.76	0.79	<b>1.13</b>	1.01	



**Table 5.** Efficiency criteria for PBB-60 on BND 90/130 bitumen

Parameter name	Binder composition No.												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Needle penetration, mm <sup>-1</sup> :													
at 25 °C	1.50	1.46	1.06	1.10	1.30	1.26	1.21	<b>1.13</b>	0.98	0.90	0.90	0.80	
at 0 °C	1.75	1.65	1.03	1.03	1.62	1.46	1.37	<b>1.03</b>	0.68	0.59	0.56	0.56	
Melting point on instrument (ring-and-ball method), °C	1.03	1.05	1.07	1.22	1.05	1.07	1.11	<b>1.20</b>	1.04	1.10	1.12	1.14	
Fraas brittle point $T_{br}$ , °C	1.30	1.25	1.15	1.15	1.10	1.05	1.15	<b>1.20</b>	1.20	1.15	1.05	1.05	
Expansivity, cm:													
at 25 °C	1.80	1.64	2.00	2.24	2.04	2.24	2.32	<b>2.80</b>	2.0	1.60	1.44	1.44	
at 0 °C	1.45	1.45	1.90	1.63	1.54	1.72	2.18	<b>2.27</b>	1.18	1.09	0.09	0.90	
Elasticity, %:													
at 25 °C	0.62	0.66	0.90	0.88	0.87	0.87	0.92	<b>1.0</b>	0.85	0.90	0.95	0.95	
at 0 °C	0.60	0.60	0.92	0.92	0.88	0.91	1.0	<b>1.07</b>	1.94	0.97	0.97	1.0	



Efficiency criteria of PBB 60 compositions on various bitumens

(adhesion agents, crosslinking agents, age resistors, etc.) in preparing PBB-60. As a result, the researcher faces the challenge of choosing the optimal composition of the binder from a possible set, which is difficult to solve without an effective and comprehensive assessment tool, and with a significant amount of data and indicators, the problem becomes virtually unsolvable. Using system analysis, it is possible to create a complex sys-

tem, which allows determining its optimal compound and technological parameters ensuring the achievement of the necessary properties. Thus, based on the quality criteria necessary for the consumer, the researcher can select the optimal composition in the shortest possible time and with the least labor costs, having various data sets concerning the component composition and their effect on the quality criteria of the final product.

## REFERENCES

1. Bormotov A.N., Proshin I.A., Korolev E.V. *Matematicheskoe modelirovanie i mnogokriterial'nyy sintez kompozitsionnykh materialov* [Mathematical modeling and multi-criteria synthesis of composite materials] Penza, Penza State Technical Academy, 2011. 352 p. (In Russian)
2. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. *Ekspluatatsionnye svoystva nanomodifitsirovannykh shchebenochno-mastichnykh asfal'tobetonov* [Operational properties of nanomodified stone-mastic asphalt]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, vol. 3, pp. 29–39. (In Russian)

3. Bormotov A.N. Mnogokriterial'nyy sintez kompozita kak zadacha upravleniya [Multi-criteria synthesis of a composite as control task]. *Vestnik TGTU* [Bulletin of the Tambov State Technical University]. 2010, vol. 4, pp. 924–937. (In Russian)
4. Vasilkov A.B., Bormotov A.N., Proshin I.A. Komp'yuternoe modelirovanie evolyutsii strukturoobrazovaniya liofil'nykh sistem [Computer modeling of liophilic systems structurization evolution at presence of solvate layers]. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU]. 2011, vol. 2, pp. 198–203. (In Russian)
5. Mittag H.J., Rinne H. *Statistical methods of quality assurance*. London. New York, Chapman & Hall, 1993. 194 p.
6. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Razrabotka nanomodifikatorov i issledovanie ikh vliyaniya na svoystva bitumnykh vyazhushchikh veshchestv [Development of nanomodifiers and research of their influence on the properties of bituminous binders]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, vol. 10, pp. 131–139. (In Russian)
7. Volkova V.N., Denisov A.A. *Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza* [Fundamentals of the theory of systems and systems analysis]. Saint-Petersburg, 2001. 512 p. (In Russian)
8. Kolmogorov A.N., Fomin C.B. *Funktsional'nyy analiz* [Functional analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 295 p. (In Russian)
9. Bazhenov Yu.M., Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. *Sistemnyy analiz v stroitel'nom materialovedenii* [System analysis in building materials science]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, 2012. 432 p. (In Russian)
10. Lupaev B.M., Potapov Yu.B., Borisov Yu.M., Poletaev Yu.A. Binarnye otsenki effektivnosti tekhnicheskikh resheniy [Binary estimates of efficiency of technical decisions]. *Vestnik VGTU* [Bulletin of Voronezh State Technical University]. 2008, vol. 3, pp. 57–60. (In Russian)
11. Nalimov V.V., Chernova H.A. *Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov* [Statistical methods for planning extreme experiments]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 148 p. (In Russian)
12. Rice J.R. *Matrix Computations and Mathematical Software*. McGraw-Hill, 1981. 248 p.
13. Samarsky A.A., Mikhailov A.P. *Matematicheskie modelirovanie* [Mathematical modeling]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1997. 184 p. (In Russian)
14. Bormotov A.N., Bublik O.V., Proshin A.P. Epoxy composites with increased density for radiation protection. *City, ecology, construction : Program, report and information at the international scientific and practical conference (Egypt. Cairo. 1999)*.
15. Hocking R.R. *Methods and Applications of Linear Models: Regression and the Analysis of Variance*. New York, Wiley, 1996. 347 p.
16. Darlington R.B. *Regression and Linear Models*. New York, McGraw-Hill, 1990. 256 p.
17. Ebeling V., Engel A., Faystel R. *Fizika protsessov evolyutsii* [Physics of evolution processes]. Moscow, URSS Publ., 2001. 326 p. (In Russian)
18. Kindeev O.N., Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu. Vliyanie vida plastifikatora na svoystva bituma i polimerno-bitumnykh vyazhushchikh [Influence of the type of plasticizer on the properties of bitumen and polymer-bitumen binders]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2016, vol. 1, pp. 26–30. (In Russian)
19. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu. Vliyaniye morfologii na kachestvennye pokazateli polimerno-bitumnogo vyazhushchego [Influence of morphology on the qualitative indicators of polymer-bituminous binder]. *Mir nefteproduktov* [World of Oil Products]. 2015, vol. 11, pp. 19–24. (In Russian)
20. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu., Kindeev O.N. The Destruction of Polymer Modified Binder and Prescription Factors Her Determining. *International Journal of Pharmacy and Technology*. September 2016, vol. 8 (3), pp. 18200–18211. (In Russian)

Received July 14, 2017.

Adopted in final form on October 2, 2017.

Approved for publication October 25, 2017.

ABOUT THE AUTHORS: **Vysotskaya Marina Alekseevna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automobile and Railways, **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova (BSTU named after V.G. Shukhov)**, 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russian Federation; roruri@rambler.ru.

**Shekhovtsova Svetlana Yur'evna**, Candidate of Technical Sciences, Assistant, Department of Construction Materials, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ShehovtsovaSYU@mgisu.ru; O-7490-2017.