

УДК 625.855.32

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ АКТИВИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В.Д. Галдина, доц., к.т.н., М.С. Черногорова, асп.

*Аннотация.* Представлены результаты исследования по подбору составов активированных минеральных порошков из кремнеземистой горной породы с применением метода планирования эксперимента. Получены математические модели свойств активированных минеральных порошков от расхода активирующих добавок в виде уравнений регрессии, установлены оптимальные составы.

*Ключевые слова:* алеврит, активированный минеральный порошок, активирующая минеральная добавка, активирующая органическая добавка, математические модели.

## ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ АКТИВОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ПОРОШКІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

В.Д. Галдіна, доц., к.т.н., М.С. Черногорова, асп.

*Анотація.* Подано результати дослідження з підбору складів активованих мінеральних порошків із кремнеземистої гірської породи із застосуванням методу планування експерименту. Отримано математичні моделі властивостей активованих мінеральних порошків від витрати активуючих добавок у вигляді рівнянь регресії, встановлено оптимально складу.

*Ключові слова:* алеврит, активований мінеральний порошок, активуюча мінеральна добавка, активуюча органічна добавка, математичні моделі.

## OPTIMIZATION OF COMPOSITION OF ACTIVATED MINERAL POWDER USING THE METHOD OF EXPERIMENT DESIGN

V. Galdina, Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof., M. Chernogorodova, P. G.

*Abstract.* Probes on selection of compositions of activated mineral powder produced from silicic rock with application of the method of experiment design are presented. Mathematical models of properties of activated mineral powder depending on the activating additives rate in the form of regression equations are obtained and optimal compositions are determined.

*Key words:* aleurite, activated mineral powder, activating mineral additive, activating organic additive, mathematical models.

### Введение

При разработке составов, технологии и изучении свойств дорожно-строительных материалов большинство экспериментальных исследований формулируются как задачи, связанные с определением оптимальных составов композиций и оптимальных условий процесса. Пути поиска оптимальных рецептурных и технологических факторов различ-

ны. Чаще всего такие задачи решаются путем постановки пассивного эксперимента, заключающегося в последовательном изучении влияния на свойства композиций каждого из факторов (количество компонента, величина параметра) в отдельности при фиксированных значениях других факторов. Данный метод связан со значительными затратами времени и материалов, так как на свойства композиционного материала оказывает влия-

ние большое количество факторов. Одновременно варьировать все факторы и получать количественные оценки основных факторов и эффектов взаимодействия, а также оптимизировать составы композиционных материалов позволяют методы математического планирования эксперимента [1–5]. Практический интерес вызывает получение математических моделей и установление на их основе оптимальных составов активированных минеральных порошков из кремнеземистой горной породы – алеврита.

### Анализ публикаций

В связи с дефицитом карбонатного сырья во многих регионах России для получения минерального порошка используют кремнеземистые минеральные материалы и техногенные продукты [6–13]. Для усиления процессов физической и химической адсорбции на границе раздела «минеральный порошок – битум» и повышения структурно-механических свойств асфальтобетонов, понижения температур приготовления и уплотнения асфальтобетонных смесей поверхность частиц минерального порошка модифицируют минеральными или органическими активными добавками. При этом наиболее эффективно совмещение физико-химической обработки с механическими воздействиями, которое создается при активирующей обработке минерального порошка в процессе помола [6].

### Цель и постановка задачи

Цель исследований заключалась в разработке математических моделей свойств активированных минеральных порошков на основе кремнеземистой горной породы – алеврита от расхода активирующих добавок и установлении оптимальных составов активированных минеральных порошков, которые по комплексу свойств соответствуют требованиям ГОСТ 32761-2014 к активированным минеральным порошкам из карбонатных горных пород марки МП-1.

### Разработка математических моделей свойств активированных минеральных порошков из алеврита

Алеврит – тонкодисперсная кремнеземистая осадочная порода, содержащая, в % мас.:

SiO<sub>2</sub> до 80; CaCO<sub>3</sub> до 5; полуторных окислов (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) до 15. В естественном состоянии алеврит содержит около 60 % зерен мельче 0,071 мм. Так как по минеральному составу и дисперсности такой материал не пригоден к использованию в качестве минерального порошка для асфальтобетона, необходимы активация и гидрофобизация его поверхности в процессе помола до дисперсности, требуемой для активированных минеральных порошков по ГОСТ 32761-2014.

Активированные минеральные порошки получали совместным помолом в лабораторной шаровой мельнице алеврита и активирующей минеральной добавки, предварительно нагретых и обработанных при температуре 130–140 °С активирующей органической добавкой. В качестве активирующей минеральной добавки использовали портландцемент класса ЦЕМ II/A III 32,5 Н, в качестве активирующей органической добавки – вязкий дорожный битум марки БНД 60/90.

При подборе составов дорожно-строительных материалов дозировки компонентов изменяют в определенных пределах, руководствуясь физическими соображениями. На основе исследований по технологии, составам и свойствам активированных минеральных порошков [10, 13] расходы минеральной и органических добавок были назначены в следующих количествах: портландцемент – от 0 до 15 %; битум марки БНД 60/90 – от 0 до 4 % от массы алеврита. Уровни варьирования исследуемых рецептурных факторов в кодированных величинах и их численные значения представлены в табл. 1.

За функции отклика были приняты показатели свойств минеральных порошков по ГОСТ 32761-2014: пористость (П); показатель битумоемкости (ПБ); набухание (Н); коэффициент водостойкости (КВ). Испытания минеральных порошков проводили по стандартным методикам согласно требованиям ГОСТ 32761-2014. Все измерения и испытания проводились на трех параллельных образцах. Матрица планирования композиционного симметричного ортогонального трехуровневого плана второго порядка [1] и результаты экспериментов по определению основных технических свойств минеральных порошков даны в табл. 2.

Таблица 1 Факторы, уровни факторов и интервалы их варьирования

Факторы	Кодированное значение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Портландцемент (Ц), %	x	0	7,5	15	7,5
Битум (Б), %	y	0	2,0	4,0	2,0

Таблица 2 Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	Порядок проведения опытов	Факторы		П, % по объему	ПБ, г/100 см <sup>3</sup>	Н, % по объему	КВ
		x	y				
1	9	-1	-1	36,7	68,9	9,43	0,35
2	3	+1	-1	34,5	63,8	3,55	0,52
3	7	-1	+1	22,5	44,7	2,92	0,76
4	5	+1	+1	23,1	46,2	1,21	1,00
5	1	-1	0	27,8	57,0	3,08	0,72
6	4	+1	0	24,9	53,0	1,46	0,82
7	9	0	-1	35,0	66,5	5,28	0,46
8	2	0	+1	24,3	50,1	1,73	0,85
9	6	0	0	26,5	56,0	2,25	0,78

Статистическая обработка результатов эксперимента, вычисление коэффициентов уравнений регрессии, определение оптимальных составов и свойств, а также и построение графических зависимостей проводились с применением компьютерных технологий при помощи пакета прикладных программ Maple. Получены адекватные математические модели в виде уравнений регрессии, которые в натуральных значениях факторов имеют следующий вид:

$$P = 36,734 - 0,10050C - 0,00619C^2 - 6,3249B + 0,73750B^2 + 0,04666C \times B \quad (1)$$

$$PB = 68,681 + 0,11926C - 0,03387C^2 - 7,0331B + 0,33750B^2 + 0,10996C \times B \quad (2)$$

$$H = 8,8392 - 0,48350C + 0,03387C^2 - 3,3113B + 0,43917B^2 + 0,06951C \times B \quad (3)$$

$$KB = 0,3754 + 0,00936C - 0,00002C^2 + 0,21458B - 0,0291B^2 + 0,00117C \times B \quad (4)$$

Коэффициенты уравнений регрессии отражают связь между исследуемыми свойствами минеральных порошков и содержанием активирующих добавок. На снижение пористости, показателя битумоемкости и набухания, а также на повышение коэффициента водостойкости наибольшее влияние оказывает расход битума. В меньшей степени изменение этих показателей зависит от расхода це-

мента, а также совместного действия этих факторов. Как следует из данных рисунка, при увеличении количества битума понижаются П, ПБ, Н и увеличивается КВ. Минимальных значений показатели П, ПБ, Н и максимальных значений КВ достигают при расходе битума 2,5–4,0 % мас. Использование цемента для активации способствует снижению Н и повышению КВ. За параметры оптимизации были приняты требования ГОСТ 32761-2014 к активированным минеральным порошкам из карбонатной горной породы марки МП-1: пористость – не более 30 % по объему; набухание – не более 1,8 % по объему; показатель битумоемкости – не более 50 г/100 см<sup>3</sup>. По зерновому составу такой минеральный порошок должен содержать частиц размером мельче: 2 мм – не менее 100; 0,125 мм – не менее 85; 0,063 мм – не менее 70 % по массе. К коэффициентам водостойкости минеральных порошков марок МП-1 и МП-2 стандарт не предъявляет требований, так как битум, как правило, имеет хорошую адгезию к поверхности карбонатных горных пород.

По уравнениям регрессии установлены оптимальные составы активированных минеральных порошков, при которых пористость, показатель битумоемкости и набухание имеют минимальные величины, а коэффициент водостойкости принимает максимальные значения (табл. 3). В результате активации алеврита цементом изменяется характер поверхности частиц кремнеземистой породы – из кислой она переходит в основную. На поверхности зерен алеврита образуются ад-

сорбционные центры из катионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  с высоким положительным потенциалом, которые способствуют образованию хемосорбционных слоев при взаимодействии с битумом и повышают структурирующую способность минерального порошка. При совместной активации алеврита с минераль-

ной и органической добавками на поверхности минеральных зерен образуется тонкий слой битума, хемосорбционносвязанный с минеральной поверхностью, который модифицирует поверхность зерен алеврита и изменяет их адсорбционные свойства.

Таблица 3 Оптимальные свойства и составы активированных минеральных порошков

Показатель	Оптимальное значение		Содержание, % от массы алеврита	
	минимальное	максимальное	Ц	Б
Пористость, % по объему	23,11	–	15	3,81
Показатель битумоемкости, г/100 см <sup>3</sup>	45,95	–	0	4,00
Набухание, % по объему	0,75	–	15	2,58
Коэффициент водостойкости	–	0,97	15	3,97

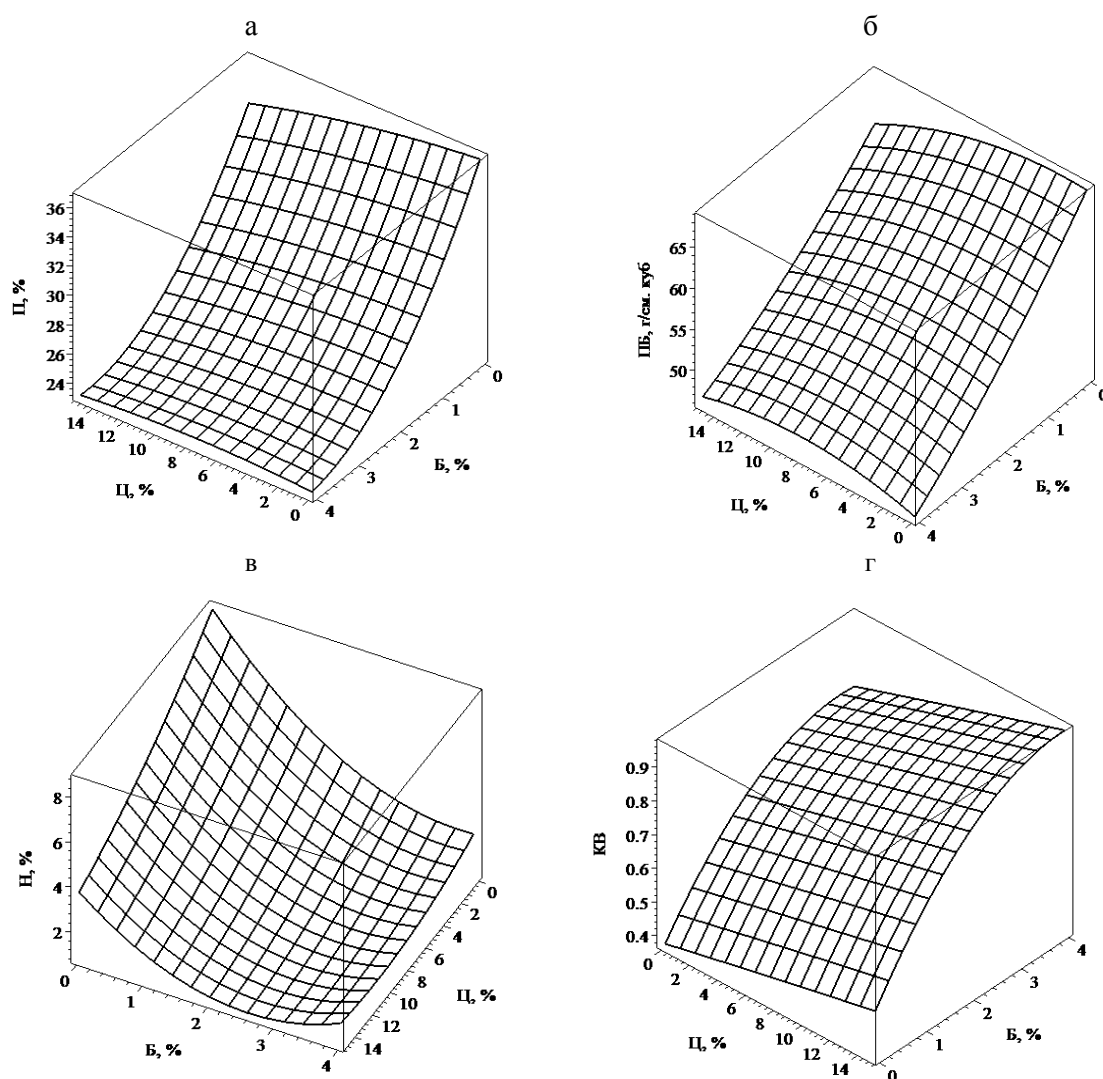


Рис. Зависимость пористости (а), показателя битумоемкости (б), набухания (в) и коэффициента водостойкости (г) активированного минерального порошка от расхода цемента и битума при активации алеврита

В итоге значительно улучшаются свойства активированного минерального порошка: понижаются пористость, показатель битумоёмкости и набухание, увеличивается коэффициент водостойкости, поверхность зерен приобретает гидрофобные свойства.

### Выводы

С применением метода планирования эксперимента получены математические модели свойств активированных минеральных порошков на основе алеврита от расхода активирующих добавок. Математические модели в виде уравнений регрессии отражают влияние компонентного состава на свойства активированных минеральных порошков и позволяют оптимизировать их составы. Оптимальные составы активированных минеральных порошков на основе алеврита, технические свойства которых соответствуют требованиям ГОСТ 32761-2014 к активированному минеральному порошку из карбонатных горных пород марки МП-1, могут быть получены совместной активацией алеврита цементом и битумом при расходе цемента 15 %, битума – 2,58–4 % от массы алеврита.

### Литература

1. Ахназарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М. : Высш. шк., 1985. – 328 с.
2. Шестаков В.Н. Планирование эксперимента в оптимизационных задачах технической мелиорации грунтов: учеб. пособие / Шестаков В.Н. – Омск : СибАДИ, 2007. – 96 с.
3. Низина Т.А. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Т.А. Низина, А.С. Баыков // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – № 2 (62). – С. 13–26.
4. Прокопец В.С. Модификация дорожного асфальтобетона резиновыми порошками механоактивационного способа получения: монография / В.С. Прокопец, Т.Л. Иванова. – Омск: СибАДИ, 2012. – 116 с.
5. Галдина В.Д. Моделирование на ЭВМ подбора состава полимерно-битумного вяжущего / В.Д. Галдина // Вестник ТГАСУ. – 2011. – № 4. – С. 132–138.
6. Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцевей, Н.В. Горельшев, А.М. Богуславский, И.В. Королев; под ред. Л.Б. Гезенцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.
7. Ковалев Я.Н. Активационные технологические дорожных композиционных материалов (научно-практические основы) / Я.Н. Ковалев. – Минск : Беларуская энциклапедыя, 2002. – 334 с.
8. Лесовик В.С. Минеральные порошки из горных пород кислого состава / В.С. Лесовик, В.С. Прокопец, П.А. Болдырев // Строительные материалы. – 2005. – № 8. – С. 44–46.
9. Гридчин А.М. Дорожные композиты на основе дисперсного вспученного перлита / А.М. Гридчин, А.П. Коротаев, В.В. Ядыкина и др. // Строительные материалы. – 2009. – № 5. – С. 42–44.
10. Надыкто Г.И. Структура и свойства асфальтовых вяжущих на основе минеральных порошков различной природы / Г.И. Надыкто, В.Д. Галдина, В.С. Прокопец // Строительные материалы. – 2011. – № 5. – С. 32–35.
11. Лебедев М.С. Изменение свойств минеральных порошков из алюмосиликатного сырья под влиянием термической модификации / М.С. Лебедев, В.В. Строкова, И.В. Жерновский, И.Ю. Потапова // Строительные материалы. – 2012. – № 9. – С. 68–70.
12. Галдина, В.Д. Подбор составов активированных минеральных порошков с использованием метода планирования эксперимента / В.Д. Галдина, М.С. Черногорова // Вестник СибАДИ. – 2017. – Вып. 2, (54). – С. 90–98.
13. Галдина В.Д. Технология приготовления и свойства минерального порошка из алеврита / В.Д. Галдина // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2016. – С. 177–186.

Рецензент: В.К. Жданюк, профессор, д.т.н., ХНАДУ.