УДК 625.855.32

ПОДБОР СОСТАВОВ АКТИВИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В.Д. Галдина, М.С. Черногородова

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Россия, г. Омск

Аннотация. В статье рассматривается использование метода математического планирования эксперимента подобраны составы и получены математические модели свойств активированных минеральных порошков на основе золы-уноса в зависимости от расхода активизирующих добавок. Оптимальные составы и свойства активированных минеральных порошков на основе золы-уноса, соответствующие требованиям ГОСТ 32761-2014 к активированным минеральным порошкам марки МП-1, установлены с помощью пакета программ Maple. Математическое планирование эксперимента позволило значительно сократить процесс подбора и оптимизировать составы активированных минеральных порошков с заданным комплексом свойств.

Ключевые слова: активированный минеральный порошок, активизирующая минеральная добавка, битум нефтяной, зола-унос, математические модели, поверхностно-активное вещество.

ВВЕДЕНИЕ

Минеральный порошок в составе асфальтобетона выполняет две функции: 1) образует совместно с битумом асфальтовое вяжущее вещество, которое омоноличивает и склеивает зерна крупного и мелкого заполнителей, а также заполняет межзерновое пространство каркаса, образованного крупным и мелким заполнителем; 2) заполняет мелкие поры между более крупными частицами щебня и песка. Поэтому присутствие необходимого количества минерального порошка способствует повышению плотности минерального остова и повышению плотности, прочности и водостойкости асфальтобетона [1].

Требования к свойствам минеральных порошков, качеству сырья для их получения и область применения приведены в ГОСТ 32761-2014 [2]. В связи с дефицитом местного карбонатного сырья во многих регионах России для получения минерального порошка используют кремнеземистые (кислые) минеральные материалы, а также техногенные продукты, удовлетворяющие по составу, дисперсности и другим физико-механическим характеристикам требованиям к минеральным порошкам марки МП-3 [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Такие минеральные порошки рекомендуется применять только для асфальтобетонных смесей II, III марок и органоминеральных смесей [2]. В качестве минерального порошка в асфальтобетонных смесях используют золы-уноса и зо-

лошлаковые смеси тепловых электростанций (ТЭС) [3, 4, 5, 7, 11]. Зола-унос представляет собой тонкодисперсный материал с размером зерен менее 0,315 мм, образующийся из минеральной части твердого топлива, сжигаемого в пылевидном состоянии и улавливаемый золоулавливающими устройствами из дымовых газов ТЭС. Золы-уноса и золошлаковые смеси рекомендуется использовать также при строительстве земляного полотна и укрепленных оснований [3, 4, 12, 13].

Исследование химического состава и свойств золы-уноса с электрофильтров ТЭС-4 г. Омска показало, что зола является сверхкислым материалом, по степени дисперсности соответствует требованиям ГОСТ 32761-2014 к минеральным порошкам, однако имеет высокие показатели пористости, битумоемкости и набухания вследствие особенностей микроструктуры и микрорельефа поверхности. При объединении кислой золы-уноса с битумом на границе раздела фаз «зола-битум» протекают процессы физической адсорбции. Поэтому прочность сцепления битума с поверхностью зерен золы пониженная. Асфальтобетон, приготовленный с минеральным порошком из золы-уноса, имеет низкие показатели прочности, теплоустойчивости и водостойкости [11]. Улучшение структурно-механических свойств асфальтобетона может быть достигнуто в результате физико-химической активации минерального порошка путем совмещения физико-химической обработки с механическими

воздействиями. Такие условия создаются при обработке минерального порошка в процессе помола активирующими минеральными или органическими веществами [1]. Оптимальные расходы активирующих добавок устанавливаются в результате постановки пассивного эксперимента, который не всегда дает возможность оптимизации составов из-за наличия эффектов взаимодействия компонентов. Значительно сократить процесс подбора и оптимизировать составы активированных минеральных порошков позволяют методы математического планирования эксперимента [14, 15].

Подбор составов активированных минеральных порошков на основе золы-уноса

Цель работы: с использованием метода математического планирования эксперимента получить математические модели свойств активированных минеральных порошков на основе золы-уноса от расхода активирующих добавок, установить оптимальные составы, при которых активированные минеральные порошки из сверхкислой золы-уноса по свойствам соответствуют требованиям ГОСТ 32761-2014 к активированным минеральным порошкам из карбонатных горных пород марки МП-1.

Активирующую обработку золы-уноса проводили при совместном помоле в лабораторной шаровой мельнице минеральных компонентов, предварительно нагретых и обработанных при температуре 140-150 °С активирующей органической добавкой. В экспериментальных исследованиях были использованы:

– зола-унос ТЭС-4 г. Омска, имеющая согласно ОДМ 218.2.031-2013 [4] следующую маркировку ЗУСух. КУ II-Б СГор.Вд – зола-унос сухого улавливания, каменноугольная, низкокальциевая, сверхкислая со средним содержанием горючих, высокодисперсная;

– активирующая минеральная добавка – асбест хризотилитовый марки А-7-300 по ГОСТ 12871-93*, представляет собой ультраосновный волокнистый материал, состоящий из гидросиликата магния $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;

– активирующая органическая добавка, состоящая из смеси битума с катионоактивным поверхностно-активным веществом (ПАВ). Для приготовления активирующей органической добавки использовали вязкий нефтяной дорожный битум марки БНД 60/90 по ГОСТ 22245-90* и адгезионную присадку к дорожным битумам БАП-ДС-3. Присадка БАП-ДС-3 является поверхностно-активным веществом катионного типа, состоит из смеси алкилами-

дополиаминов, алкилимидазолинполиаминов и жирных кислот, улучшает адгезионные свойства битумов при взаимодействии с кислотными и основными минеральными материалами. Присадка выпускается по ТУ 2482-005-33992933-2003 (СТО 33992933-002-2008) ЗАО НПО «Алтайспецпродукт» (г. Бийск Алтайского края) [16].

При получении активированных минеральных порошков количество золы-уноса принималось за 100%. Расходы асбеста, битума и ПАВ назначались сверх 100% от массы золы-уноса.

Подбор составов активированных минеральных порошков на основе золы-уноса проводился с применением метода математического планирования эксперимента. Значения основных независимых факторов на различных уровнях даны в табл. 1. За функции отклика были приняты показатели свойств минерального порошка по ГОСТ 32761-2014: пористость (П); показатель битумоемкости (ПБ); коэффициент водостойкости (КВ), набухание (Н). Испытания минеральных порошков проводили по стандартным методикам (ГОСТ 32764-2014, ГОСТ 32765-2014, ГОСТ 32766-2014, ГОСТ 32707-2014, ГОСТ 32719-2014). Все измерения и испытания проводились на трех параллельных образцах.

Матрица планирования симметричного композиционного трехуровневого плана второго порядка типа B_3 [17] и результаты экспериментов по определению свойств активированных минеральных порошков приведены в табл. 2. Статистическая обработка результатов эксперимента, определение коэффициентов уравнений регрессии, определение оптимальных составов и свойств, а также и построение графических зависимостей производились с помощью пакета прикладных программ Maple. Получены следующие уравнения регрессии в натуральных значениях факторов:

$$\begin{aligned} & \text{П} = 44,322 - 0,07425 \cdot \text{А} - 7,1912 \cdot \text{Б} - \\ & - 7,9725 \cdot \text{ПАВ} + 0,0175 \cdot \text{А} \cdot \text{Б} \cdot \text{ПАВ} - \\ & - 0,00648 \cdot \text{А}^2 + 0,7391 \cdot \text{Б}^2 + 2,6062 \cdot \text{ПАВ}^2; \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{ПБ} = 94,9 - 1,98252 \cdot \text{А} - 10,612 \cdot \text{Б} - \\ & - 20,225 \cdot \text{ПАВ} + 0,09375 \cdot \text{А} \cdot \text{Б} \cdot \text{ПАВ} + \\ & + 0,05875 \cdot \text{А}^2 + 0,96875 \cdot \text{Б}^2 + 4,875 \cdot \text{ПАВ}^2, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{КВ} = 0,68725 + 0,01023 \cdot \text{А} + 0,04313 \cdot \text{Б} + \\ & + 0,0893 \cdot \text{ПАВ} + 0,000375 \cdot \text{А} \cdot \text{Б} \cdot \text{ПАВ} - \\ & - 0,000393 \cdot \text{А}^2 - 0,002344 \cdot \text{Б}^2 - \\ & - 0,024375 \cdot \text{ПАВ}^2; \quad (3) \end{aligned}$$

ПОДБОР СОСТАВОВ АКТИВИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ
МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

а)

б)

в)

г)

Рисунок 1 – Зависимость пористости (а), показателя битумоемкости (б), набухания (в) и коэффициента водостойкости (г) активированного минерального порошка от расхода при активации битума и ПАВ (пример при А = 10 %)

$$H = 2,7485 - 0,0362 \cdot A - 0,5685 \cdot B - 0,4911 \cdot \text{ПАВ} - 0,00303 \cdot A \cdot B \cdot \text{ПАВ} + 0,00089 \cdot A^2 + 0,0886 \cdot B^2 + 0,06437 \cdot \text{ПАВ}^2, \quad (4)$$

где П – пористость, % по объему; ПБ – показатель битумоемкости, г/100 см³; КВ – коэффициент водостойкости; Н – набухание, % по

объему; А – асбест, % от массы золы-уноса; Б – битум, % от массы золы-уноса; ПАВ – поверхностно-активное вещество, % от массы золы-уноса.

Анализ полученных адекватных моделей показывает, что на изменение показателей

а)

б)

в)

г)

Рисунок 2 – Зависимость пористости (а), показателя битумоемкости (б), набухания (в) и коэффициента водостойкости (г) активированного минерального порошка от расхода асбеста и ПАВ (пример при $B = 2\%$)

свойств активированных минеральных порошков влияет содержание асбеста, битума, ПАВ и совместное действие этих факторов, что выражается в значимости коэффициентов в уравнениях регрессии при A , B , $ПАВ$, A^2 ,

B^2 , $ПАВ^2$ и $(A \cdot B \cdot ПАВ)$. Наибольшее влияние на снижение показателей пористости, битумоемкости, набухания и на увеличение коэффициентов водостойкости оказывают расходы битума и ПАВ.

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ПОДБОР СОСТАВОВ АКТИВИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Таблица 1 – Факторы, уровни факторов и интервалы их варьирования

Факторы	Кодированное значение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		–1	0	+1	
Асбест хризотилковый (А), %	x	0	10	20	10
Битум (Б) %	y	0	1	2	1
Поверхностно-активное вещество (ПАВ), %	z	0	1	2	1

Таблица 2 – Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Порядок проведения опытов	Факторы			Свойства минерального порошка			
		x	y	z	П, %	ПБ, г/100 см ³	КВ	Н, %
1	10	–1	–1	–1	46,4	109	0,70	2,92
2	9	+1	–1	–1	40,0	73	0,76	2,40
3	1	–1	+1	–1	25,7	61	0,79	1,63
4	4	+1	+1	–1	22,2	54	0,83	1,54
5	2	–1	–1	+1	37,8	67	0,78	1,79
6	8	+1	–1	+1	36,0	60	0,80	1,65
7	3	–1	+1	+1	24,0	51	0,89	0,92
8	6	+1	+1	+1	20,2	43	1,00	0,36
9	7	–1	0	0	26,0	58	0,85	1,61
10	13	+1	0	0	25,7	54	0,87	0,98
11	11	0	–1	0	36,5	62	0,78	2,10
12	12	0	+1	0	22,4	46	1,00	1,02
13	5	0	0	–1	32,5	60	0,80	1,75
14	14	0	0	+1	25,7	50	0,95	0,79

Таблица 3 – Оптимальные свойства и составы активированных минеральных порошков

Показатель	Оптимальное значение		Содержание, % от массы золы-уноса		
	минимальное	максимальное	А	Б	ПАВ
Пористость, % по объему	19,18	-	20,00	2,00	1,26
Показатель битумоемкости, г/100 см ³	39,936	-	11,696	2,00	1,625
Коэффициент водостойкости	-	1,014	16,794	2,00	2,00
Набухание, % по объему	0,314	-	20,00	1,95	2,00

Графические зависимости изменения свойств активированных минеральных порошков от расхода для активации минеральной и органических добавок показаны на рис. 1 и 2. Из данных рис. 1 следует, что при увеличении количества битума и ПАВ для активации при расходе асбеста 10% понижаются П, ПБ, Н и увеличивается КВ. Минимальные значения показатели П, ПБ, Н и максимальные значения КВ принимают при расходах битума и ПАВ, равных 2% мас. Если активация золы-уноса проводится без применения битума, то ПБ выше 50 г/100 см³, П более 30% и Н более 1,8%, что не соответствует требованиям стандарта к активированному минеральному порошку марки МП-1. При неизменном расходе битума 2% мас. увеличение количества асбеста приводит к снижению П, ПБ и Н. Коэффициент водостойкости имеет экстремальную зависимость от содержания асбеста и максимальное значение принимает при содержании асбеста 11,696%. Увеличение количества ПАВ для активации минерального порошка способствует значительному снижению П, ПБ, Н и увеличению коэффициента водостойкости (рис. 2).

По уравнениям регрессии в результате оптимизации определены минимальные значения П, ПБ, Н и максимальное значение для КВ в зависимости от содержания активирующих добавок (табл. 3). Минеральные порошки из золы-уноса по минеральному составу сырья относятся к марке МП-3 [2]. Однако исследования показали, что активированные минеральные порошки на основе золы-уноса оптимальных и рациональных составов удовлетворяют требованиям ГОСТ 32761-2014 к активированному минеральному порошку из карбонатных горных пород марки МП-1. Рациональные составы активированных минеральных порошков могут быть получены: 1) активацией золы-уноса смесью битума с БАП-ДС-3 при расходе битума 1,0 – 2,0% и БАП-ДС-3 – 1,53 – 1,83%; 2) совместной активацией золы уноса асбестом хризотилowym в количестве 10 – 20% и смесью битума с БАП-ДС-3 при расходе битума 1,0-2,0% и БАП-ДС-3 – 1,0-2,0%.

При активации золы асбестом на поверхности частиц золы образуются адсорбционные центры из катионов магния Mg^{2+} с высоким положительным потенциалом, которые способствуют химической адсорбции битума (или смеси битума с ПАВ) с модифицированной поверхностью золы-уноса. Значительное улучшение свойств активированных минеральных порошков достигается при совмест-

ном размоле золы-уноса и асбеста, обработанных смесью битума с ПАВ. В результате физико-химического взаимодействия между адсорбционными центрами и смесью битума с ПАВ на поверхности зерен золы-уноса образуется тонкий слой высокоструктурированного битума, который является своеобразным структурно-механическим барьером, хемосорбционно-связанным с минеральной поверхностью. Структурно-механический барьер облегчает смачивание активированного минерального порошка битумом; дезагрегирует зерна минерального порошка; придает поверхности зерен гидрофобные свойства, способствует химическому взаимодействию битума с их поверхностью и снижает фильтрацию битума в поры минеральных зерен [1]. Кроме того, при совместном размолу золы-уноса с активирующими добавками изменяется форма зерен золы, уменьшается количество открытых и закрытых микро- и макропор, а также микротрещин гидрофильных стекловидных частиц. Изменение характера поверхности и формы частиц золы приводит к снижению пористости, битумоемкости, набухания и повышению коэффициента водостойкости активированного минерального порошка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием метода планирования эксперимента получены математические модели в виде уравнений регрессии, отражающие влияние расхода активирующих минеральной и органических добавок на свойства активированных минеральных порошков на основе золы-уноса. Планирование эксперимента позволило одновременно варьировать все факторы и получить количественные оценки основных факторов и эффектов взаимодействия.

Определены оптимальные и рациональные составы активированных минеральных порошков на основе сверхкислой золы-уноса, технические свойства которых соответствуют требованиям ГОСТ 32761-2014 к активированному минеральному порошку из карбонатных горных пород марки МП-1. Такие минеральные порошки могут быть получены: 1) активацией золы-уноса смесью битума с катионактивным ПАВ; 2) совместной активацией золы уноса асбестом хризотилowym и смесью битума с катионактивным ПАВ.

Активированные минеральные порошки на основе золы-уноса гидрофобны, характе-

ризуются низкими показателями пористости, битумоемкости и набухания, высокими коэффициентами водостойкости, что позволяет рекомендовать их для применения в любых асфальтобетонных и органоминеральных смесях, в том числе асфальтобетонных и полимерасфальтобетонных смесях I марки и щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гезенцвей, Л.Б. Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцвей, Н.В. Горелышев, А.М. Богуславский, И.В. Королев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1985. – 350 с.
2. ГОСТ 32761 – 2014. Дороги общего пользования. Порошок минеральный. Технические требования. – Введен впервые; введ. 2015 – 02 – 01. – М. : ФГУП Стандартиформ, 2014. – 12 с.
3. Путилин, Е.И. Применение зол-уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог / Е.И. Путилин, В.С. Цветков // Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. – М. : ФГУП Союздорнии, 2003. – 22 с.
4. Методические рекомендации по применению золы-уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве. ОДМ 218.2.031-2013. – Взамен ВСН 185-75. – М. : Федеральное дорожное агентство, 2013. – 44 с.
5. Ярмолинская, Н.И. Дорожный асфальтобетон с применением минеральных порошков из техногенных отходов промышленности: учеб. пособие. – Хабаровск : Изд-во Хабар. гос. ун-та, 2002. – 103 с.
6. Ярмолинская, Н.И. Повышение коррозионной стойкости асфальтобетона на основе отходов ТЭС / Н.И. Ярмолинская, Л.С. Цупикова // Строительные материалы. – 2007. – № 9. – С. 46 – 47.
7. Надыкто, Г.И. Исследование возможности использования вторичных продуктов переработки нефти в качестве минерального порошка для производства асфальтобетонных смесей / Г.И. Надыкто, В.С. Прокопец // Повышение эффективности дорожных и строительных материалов для условий Сибири: сб. науч. тр. Омск: Изд-во СибАДИ, 2000. С. 89 – 93.
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. 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.
10. Галдина, В.Д. Минеральные порошки из горючих сланцев / В.Д. Галдина, Е.В. Гурова, О.И. Кривонос, Е.Н. Терехова, Г.В. Плаксин, Е.А. Райская // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2015. – № 2. – С. 20 – 24.
11. Галдина, В.Д. Использование золы-уноса в качестве минерального порошка для асфальтобетона / В.Д. Галдина, М.С. Черногородова // Решение экологических проблем современного общества для устойчивого развития: сб. материалов научно-практической конференции, посвященной 20-летию юбилею кафедры экологии, природопользования и биологии. – Омск : ЛИТЕРА, 2016. С. 134 – 138.
12. Сиротюк, В.В. Стандартизация и перспективы использования золошлаков энергетики для дорожного строительства в России / В.В. Сиротюк // Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование: м-лы III науч.- практ. семинара, 22 – 23 апреля 2010. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 58 – 59.
13. Степанец, В.Г. Опыт строительства дорожных одежд с основаниями из золоминеральных смесей в Омской области / В.Г. Степанец, М.В. Исаенко, А.В. Герасимов, И.В. Герасимова // Автомобильные дороги. – 2013. – № 9. – С. 93 – 94.
14. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М. : Статистика, 1992. – 375 с.
15. Аугамбаев, М. Основы планирования научно-исследовательского эксперимента / М. Аугамбаев, А.З. Иванов, Ю.И. Терехов; под ред. Г.М. Рудакова. – Ташкент : Укитувчи, 2004. – 336 с.
16. Адгезионная присадка БАП-ДС-3 для дорожных битумов / В.С. Прокопец, В.Д. Галдина, Г.И. Надыкто, Е.А. Бедрин // Строительные материалы. – 2005. – № 10. – С. 12 – 13.
17. Бродский В.З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: справочное издание / В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова. – М. : Металлургия, 1982. – 752 с.

SELECTION OF STRUCTURES OF THE ACTIVATED MINERAL POWDERS WITH USE OF A METHOD OF PLANNING OF EXPERIMENT

V.D.Galdina, M.S.Chernogorodova

Abstract. With use of a method of mathematical planning of experiment structures are picked up and mathematical models of properties of the activated mineral powders on the basis of ashes-ablation depending on the expense of activating additives are received. Optimum structures and properties of the activated mineral powders on the basis of the ashes-ablation, corresponding to requirements of GOST 32761-2014 to the activated mineral powders of mark of MP-1, are established by means of software package Maple. Mathematical planning of experiment has allowed to reduce considerably process of selection and to optimise structures of the activated mineral powders with the set complex of properties.

Keywords: the activated mineral powder, an activating mineral additive, bitumen oil, ashes-ablation, mathematical models, surface-active substance.

REFERENCES

1. Gezentsvej, L.B., Gorelyshev, N.V., Boguslavsky, A.M., Korolev, I.V. Dorozhnyi asfal'tobeton [Road asphalt concrete]. Moscow. Transport. 1985. 350 p.
2. GOST 32761-2014. Dorogi odshchego polovanijas'. Poroshok mineral'nyi. Tekhnicheskie trebovaniya. [Public roads. A powder mineral. Technical requirements]. Vveden v pervye 2015 – 02 – 01. Moscow. Standartinform. 2014. 12 p.
3. Putilin, E.I. Primenenie zol-unosa i zoloshlakovykh smesey pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog. [Application of harms-ablations and zoloshlakovykh mixes at building of highways]. Obsornaeja informatsija otechestvennogo i zarubezhnogo opyta primeneniya otkhodov ot szhiganiya tverdogo topliva na TES. [The Survey information of domestic and foreign experience of application of a waste from burning of firm fuel on TES] Moscow. FGUP Sojuzdornii. 2003. 22 p.
4. Metodicheskie pekomentatsii po primeneniju zol-unosa i zoloshlakovykh smesey ot szhiganiya uglja na teplovykh elektrostantsijakh v dorozhnom stroitel'stve. ODM 218.2.031 – 2013. [Methodical recommendations about application of ashes-ablation and zoloshlakovykh mixes from coal burning on thermal power stations in road building' ODM 218.2.031 – 2013]. In exchange VSN 185 – 75. Moscow. Federal road agency. 2013. 44 p.
5. Jarmolinskaja, N.I. Dorozhnyi asfal'tobeton s primeneniem mineral'nykh poroshkov iz tekhnogennykh otkhodov promyshlennosti. Uchebnoe posobie. [Road asfaltobeton with application of mineral powders from a technogenic waste of the industry]. Studies the grant. Khabarovsk: Publishing house. Habar. gos. Un-y, 2002. 103 p.
6. Jarmolinskaja, N.I., Tsupikova, L.S. Povyshenie korrozionnoj stoykosti asfal'tobetona na osnove otkhodov TES [Increasing of the corrosion resistance of asphalt concrete from waste TES]. [Construkcion materials. 2007. No. 9. Pp. 46 – 47.
7. Nadykto, G.I., Prokopets, V.S. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya produktov pererabotki nefi v kachestve mineral'nogo poroshka dlja proizvodstva asfal'tobetonnykh smesey. [Issledovanie of possibility of use of by-products of oil refining as a mineral powder for manufacture asfaltobetonnykh mixes]. Povyshenie effektivnosti dorozhnykh i stroitel'nykh materialov dlja usloviy Sibiri. [Increase of efficiency of road and building materials for conditions of Siberia]. Sb. nauch. tr. Omsk: Publishing house SibAdl. 2000. Pp. 89 – 93.
8. Lesovik, V.S., Prokopets, V.S., Boldyrev, P.A. Mineral'nye poroshki iz gornykh porod kislogo sostava. [Mineral powders from rocks of sour structure Construkcion materials. 2005. No. 8. Pp. 44 – 46.
9. Nadykto, G.I., Galdina, V.D., Prokopets, V.S. Struktura i svojstva asfal'tovykh vjazhushch na osnive mineral'nykh poroshkov razlichnoj prirody [Struktura and properties asphalt knitting on the basis of mineral powders of the various nature]. Construkcion materials. 2011. No. 5. Pp. 32 – 35.
10. Galdina, V.D., Gurova, E.V., Krivonos, O.I., Rayskaya, E.A., Terecova, E.N., Plaksin, G.V. Mineral'nye poroshki iz gorjuchikh slantsev. [Mineral povders from combustible slates]. The Science and technics in road branch. 2015. No. 2. Pp. 20 – 24.
11. Galdina, V.D., Chernogorodova, M.S. Ispol'sovanie zoly-unosa v kachestve mineral'nogo

poroshka dlja asfal'tobetona [Use of ashes-ablation as the mineral powder for asphalt concrete]. Reshenie ekologicheskikh problem sovremenno-go obshchestva dlja ustoychivogo razvitiya. [The Decision of environmental problems of a modern society for a sustainable development: sb. Materials of the scientifically-practical conference devoted to 20-year-old anniversary of chair of ecology, wildlife management and biology] Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvjashchennoy 20-letnemu yubileyu kafedry ekologii, prirodopol'zovaniya i biologii. Omsk. LITERA. 2016. Pp. 134 – 138.

12. Sirotyuk, V.V. Standartizatsiya i perspektivy ispol'zovaniya zoloshlakov energetiki dlja dorozhnogo stroitel'stva v Rossii. [Standartizatsiya and use prospects zoloshlakov power for road building in Russia]. Zoloshlaki TES: udalenie, transport, pererabotka, skladirovanie. Materialy III nauchno-praknicheskogo seminar. [Zoloshlaki TES: removal, transport, processing, warehousing: m-ly III nauchn. – prakt. A seminar. 22 on April. 23rd 2010]. Moscow. Publishing house MEI, 2010. Pp. 58 – 59.

13. Stepanets, V.G., Isaenko, M.V., Gerasimov, A.V., Gerasimova, I.V. Opyt stroitel'stva dorozhnykh odezhd iz zolomineral'nykh smesey v Omskoy oblasti. [Opyt of building of road clothes with the bases from zolomineral'nykh mixes in the Omsk region]. Highways. 2013. Pp. 93 – 94.

14. Nalimov, V.V., Chernova N.A. Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov. [Century of Century Statistical methods of planning of extreme experiments]. Moscow. Statistika. 1992. 375 p.

15. Augambaev, M., Ivanov, A.Z., Terekhov, Ju.I. Osnovy planirovaniya nauchno-issledovatel'skogo eksperimenta. [Osnovy of planning of

research experiment]. Tashkent. Ukituvchi. 2004. 336p.

16. Prokopets, V.S., Galdina, V.D., Nadykto, G.I., Bedrin, E.A. Adgezionnaja prisadka BAP-DS-3 dlja dorozhnykh bitumov. [Adhesive additive BAP-DS-3 for road bitumens]. Konstrukcion materials. 2005. No. 10. Pp. 12 – 13.

17. Brodskiy, V.Z., Brodskiy, L.I., Golikova, T.I. Tablitsy planov eksperimenta dlya faktornykh i polinomial'nykh modeley. Spravochnoe izdanie. [Tables of plans of experiment for factorial and polinomialnyh models. A reference media]. Moscow. Metallurgy. 1982. 752 p.

Галдина Вера Дмитриевна (Омск, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные материалы и специальные технологии» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: ver.galdina@yandex.ru)

Черногородова Мария Сергеевна (Омск, Россия) – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные, тяговые машины и гидропривод» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: www.mamarya@mail.ru)

Vera Dmitrievna Galdina (Omsk, Russian Federation) – candidate of technical sciences, the associate professor of Department «Construkcion materials and special technologies» of The Siberian automobile and highwau universitet (SibADI) (644080, Omsk, Mira Avenue, 5, e-mail: ver.galdina@yandex.ru)

Marija Sergeevna Chernogorodova (Omsk, Russian Federation) – The post-graduate student of Department «Hoisting-and-transport, Traction Cars and Hydraulik Aktuator » of The Siberian automobile and highwau universitet (SibADI) (644080, Omsk, Mira Avenue, 5, e-mail: www.mamarya@mail.ru)

УДК 624.012.45.046

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСКАЛЫВАНИЯ БЕТОНА В ЗОНЕ АНКЕРОВКИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ

Ю.В. Краснощёков

Аннотация. В статье приведены результаты компьютерного моделирования опытных образцов, предназначенных для испытаний на выдергивание арматуры из бетона. Анализируется напряженное состояние бетона в зоне анкерования и определяются участки вероятного образования раскалывающих трещин при упругих деформациях материалов. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными. Для теоретического обоснования возможного раскалывания привлекаются задачи теории упругости о действии сосредоточенной силы в точке бесконечного тела и полупространстве.