

УДК 691:624.138

Гильфанов Р.М. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: gilfanov.rash@yandex.ru

Вдовин Е.А. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: vdovin007@mail.ru

Мавлиев Л.Ф. – ассистент

E-mail: lenarmavliev@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Оптимизация состава цементогрунта с комплексной добавкой на основе кремнийорганических соединений

Аннотация

Проведено исследование влияния комплексной добавки на основе октилтриэтоксисилана и гидроксида натрия на прочность и морозостойкость цементогрунта с помощью математического моделирования и применения метода планирования эксперимента. Получены зависимости влияния расхода портландцемента, состава и дозировки комплексной добавки на физико-механические свойства материала. Оптимизирован состав модифицированного цементогрунта с учетом области применения в дорожной одежде и выявлена роль компонентов комплексной добавки в повышении прочности и морозостойкости.

Ключевые слова: цементогрунт, оптимизация состава, физико-механические свойства, комплексная добавка, октилтриэтоксисилан, гидроксид натрия.

Введение. Разработка эффективных материалов для конструктивных слоев дорожных одежд на основе местных укрепленных грунтов с использованием различных вяжущих и модифицирующих добавок является одним из перспективных направлений исследований в дорожном строительстве. Вопросам укрепления грунтов посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых - В.М. Безрука, Ю.М. Васильева, Л.В. Гончаровой, В.М. Кнатько, В.А. Кельмана, В.В. Охотина, П.А. Ребиндера, М.М. Филатова, С.W. Correns, С.S. Dunn, J. Hashimoto, J.K. Mitchell, G.H. Hilt, Davidson D.T., J.G. Laguros, T.W. Lambe, R.C. Mainfort и др.

Для обеспечения возможности применения грунта в конструкциях дорожных одежд одним из наиболее результативных методов является укрепление его цементом. Повышение качества получаемого материала – цементогрунта, является актуальной проблемой, которая не может быть успешно решена, в полной мере, без модификации химическими добавками, влияющими на структуру и свойства цементогрунта.

Как показали исследования, решение данной проблемы возможно путем применения добавок кремнийорганических соединений, позволяющих получить гидрофобные материалы, а также электролитов, придающих цементогрунтам высокие прочностные показатели [1]. На основе анализа научных работ по повышению прочности и морозостойкости строительных материалов [1-9] и проведенных экспериментов получена комплексная добавка, состоящая из кремнийорганического соединения октилтриэтоксисилан (ОТЭС) и электролита гидроксид натрия (ГН). Данная добавка позволяет повысить физико-механические свойства и долговечность цементогрунта. Для выявления особенностей влияния комплексной добавки на физико-механические свойства и долговечность материала, произведена оптимизация состава модифицированного цементогрунта с учетом области применения в конструкциях дорожных одежд.

Экспериментальная часть. В качестве исходных независимых переменных определены следующие факторы: содержание портландцемента ПЦ (8-12), кремнийорганического соединения ОТЭС (0,01-0,05), электролита ГН (0,05-0,25), в % от массы грунта.

Согласно проведенной на кафедре «Изыскания и проектирование автомобильных дорог» КГАСУ научно-технической работе «Разработка технологии устройства дорожных одежд с применением местных минеральных материалов для сельских автомобильных дорог в Республике Татарстан» (Государственный контракт № 247 от

09.12.2013 г.), при использовании для устройства цементогрунтового слоя наиболее распространенного и эффективного современного механизма – регенератора-смесителя (ресайклера, стабилизатора), технологический коэффициент прочности при укреплении легких суглинков принимается равным 0,85. При применении данного коэффициента минимальный предел прочности на сжатие должен составлять 4,71 МПа, предел прочности на растяжение при изгибе – 0,94 МПа.

Учитывая, что, как правило, свойства строительных изделий от технологических факторов описываются зависимостями не выше второго порядка, нами для проведения экспериментальных исследований был выбран план Бокса (В3) (табл. 1), который имеет хорошие характеристики [10]. В основе этого плана лежит полнофакторный эксперимент. В случае экспериментов с тремя факторами мы получаем план с 17 опытами: 8 опытов в вершинах куба (координаты вершин куба определяются наибольшими или наименьшими значениями факторов); 6 опытов в центрах граней куба; 3 опыта в центре куба.

Таблица 1

**План экспериментов В3 и значения физико-механических свойств
модифицированного цементогрунта**

№ опыта	Содержание поргланцемента, % от массы грунта		Содержание ОТЭС, % от массы грунта		Содержание ГН, % от массы грунта		Предел прочности на изгиб (экспер.) МПа	Предел прочности на сжатие (экспер.) МПа	Коэфф. морозостой. (экспер.)	Предел прочности на изгиб (расчет.) МПа	Предел прочности на сжатие (расчет.) МПа	Коэфф. морозостой. (расчет.)
	X ₁	X ₁ '	X ₂	X ₂ '	X ₃	X ₃ '						
1	12	+1	0,05	+1	0,25	+1	1,12	5,87	0,94	1,12	5,87	0,94
2	12	+1	0,05	+1	0,05	-1	1,06	5,46	0,92	1,06	5,46	0,92
3	12	+1	0,01	-1	0,25	+1	1,08	5,63	0,82	1,08	5,63	0,82
4	12	+1	0,01	-1	0,05	-1	1,02	5,23	0,80	1,02	5,23	0,80
5	8	-1	0,05	+1	0,25	+1	0,91	4,15	0,82	0,91	4,15	0,82
6	8	-1	0,05	+1	0,05	-1	0,84	3,74	0,81	0,85	3,74	0,81
7	8	-1	0,01	-1	0,25	+1	0,87	3,98	0,69	0,87	3,98	0,68
8	8	-1	0,01	-1	0,05	-1	0,81	3,58	0,67	0,81	3,58	0,67
9	12	+1	0,03	0	0,15	0	1,10	5,75	0,93	1,10	5,75	0,93
10	8	-1	0,03	0	0,15	0	0,89	4,06	0,80	0,89	4,06	0,80
11	10	0	0,05	+1	0,15	0	0,97	4,86	0,89	0,97	4,86	0,88
12	10	0	0,01	-1	0,15	0	0,93	4,66	0,73	0,93	4,66	0,74
13	10	0	0,03	0	0,25	+1	0,97	4,82	0,88	0,97	4,82	0,88
14	10	0	0,03	0	0,05	-1	0,91	4,41	0,86	0,91	4,41	0,86
15	10	0	0,03	0	0,15	0	0,96	4,79	0,87	0,96	4,79	0,87
16	10	0	0,03	0	0,15	0	0,98	4,83	0,90	0,96	4,79	0,87
17	10	0	0,03	0	0,15	0	0,94	4,75	0,84	0,96	4,79	0,87

Обработка результатов экспериментов, проведенных по плану В3 с помощью специальной программы, разработанной авторами, позволило построить зависимости (модели) для напряжения изгиба (R_{изг}), напряжения сжатия (R_{сж}), коэффициента морозостойкости (K_{мор}). Эти модели в кодированных переменных имеют следующий вид:

$$R_{изг} = 0,955 + 0,106 \cdot X_1' + 0,019 \cdot X_2' + 0,031 \cdot X_3' + 0,037 \cdot X_1'^2 - 0,008 \cdot X_2'^2 - 0,018 \cdot X_3'^2 + 0,001 \cdot X_1' \cdot X_2' - 0,001 \cdot X_1' \cdot X_3' + 0,001 \cdot X_2' \cdot X_3' \quad (1)$$

$$R_{сж} = 4,789 + 0,843 \cdot X_1' + 0,100 \cdot X_2' + 0,203 \cdot X_3' + 0,117 \cdot X_1'^2 - 0,028 \cdot X_2'^2 - 0,173 \cdot X_3'^2 + 0,017 \cdot X_1' \cdot X_2' + 0,002 \cdot X_2' \cdot X_3' \quad (2)$$

$$K_{мор} = 0,869 + 0,062 \cdot X_1' + 0,067 \cdot X_2' + 0,009 \cdot X_3' - 0,004 \cdot X_1'^2 - 0,059 \cdot X_2'^2 + 0,001 \cdot X_3'^2 - 0,004 \cdot X_1' \cdot X_2' + 0,001 \cdot X_1' \cdot X_3' - 0,001 \cdot X_2' \cdot X_3' \quad (3)$$

Для получения достаточно надежных выводов об их качестве все построенные модели (1)-(3) были проверены на адекватность по критерию Фишера и критерию «средней относительной погрешности». Так для модели (1) (напряжение на изгиб) расчетное значение критерия Фишера составило $F_{рас} = 0,125$ в то время как критическое значение $F_{кр} = F(\alpha; f_1; f_2) = F(0,05; 5; 2) = 19,300$; здесь $\alpha = 0,05$ – уровень значимости, f_1, f_2 – числа степеней свободы, определяемые по формулам: $f_1 = n - t = 15 - 10 = 5$, где $n = 15$ – число опытов в плане, $t = 10$ – количество значимых коэффициентов в модели; $f_2 = m - 1 = 3 - 1 = 2$, где m – число дублирования опытов в центре плана. Поскольку $F_{рас} < F_{кр}$, для данной модели, то она является адекватной по критерию Фишера. Средняя относительная погрешность между экспериментальными и расчетными значениями полученными для модели (1) есть $A_{ср} = 0,70 \%$, что меньше критического значения данного показателя, составляющего $A_{кр} = 8 \%$, то есть и по данному критерию модель (1) является адекватной. Результаты проверки всех моделей на адекватность представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения критерия Фишера и средней относительной погрешности моделей

Название модели	Критерий Фишера $F_{рас}$	Средняя относительная погрешность $A_{ср}, \%$
Напряжение на изгиб (1)	0,125	0,70
Напряжение на сжатие (2)	0,119	0,12
Коэффициент морозостойкости (3)	0,148	0,87

Как видно из данных табл. 2 модели (1)-(3) являются адекватными, поскольку расчетные значения критериев Фишера и средней относительной погрешности для них являются во много раз меньшими, чем их критические значения. Поэтому эти модели можно использовать при решении задач оптимизации по подбору значений технологических факторов: прочность на изгиб ($R_{изг}$), прочность на сжатие ($R_{сж}$), коэффициент морозостойкости ($K_{мор}$), обеспечивающих наилучшие характеристики модифицированного грунта [11].

Математическая формулировка этой задачи имеет вид:

$$R_{изг} \longrightarrow 0,94, R_{сж} \longrightarrow 4,71, K_{мор} \longrightarrow \max, \quad (4)$$

$$\text{при } 8 \leq X_1 \leq 12; 0,01 \leq X_2 \leq 0,05; 0,05 \leq X_3 \leq 0,25. \quad (5)$$

Прежде чем начать решать задачу оптимизации (4)-(5) переведем модели (1)-(3) из кодированных переменных в натуральные, путем подстановки в эти модели выражений кодированных переменных через натуральные:

$$X_i = \frac{2 \cdot (X_i - X_{iер})}{(X_{i\max} - X_{i\min})}, i=1,3. \quad (6)$$

После перевода этих моделей из кодированных переменных в натуральные, они приобретают вид:

$$R_{изг} = 1,21875 + 0,132 \cdot X_1 + 1,825 \cdot X_2 + 0,885 \cdot X_3 + 0,00925 \cdot X_1^2 - 20,00 \cdot X_2^2 - 1,800 \cdot X_3^2 - 0,025 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,005 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,500 \cdot X_2 \cdot X_3, \quad (7)$$

$$R_{сж} = 2,72425 - 0,17625 \cdot X_1 + 4,80 \cdot X_2 + 7,190 \cdot X_3 - 0,02925 \cdot X_1^2 - 70,0 \cdot X_2^2 - 17,30 \cdot X_3^2 + 0,425 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,0 \cdot X_2 \cdot X_3, \quad (8)$$

$$K_{мор} = 0,18975 + 0,05325 \cdot X_1 + 13,2750 \cdot X_2 + 0,0250 \cdot X_3 - 0,0010 \cdot X_1^2 - 147,5000 \cdot X_2^2 + 0,100 \cdot X_3^2 - 0,100 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,500 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (9)$$

Решим задачу (4)-(5) методом выделения главного критерия, потому что данный метод является наиболее употребительной в инженерной практике [12]. При использовании этого метода вместо задачи (4)-(5) придется решить три однокритериальные задачи оптимизации:

$$A) R_{сж} \longrightarrow 4,71 \quad (10)$$

$$\text{при } 8 \leq X_1 \leq 12;$$

$$0,01 \leq X_2 \leq 0,05;$$

$$0,05 \leq X_3 \leq 0,25;$$

$$R_{изг} \geq 0,94;$$

$$K_{мор} \geq 0,75. \quad (11)$$

$$B) R_{изз} \longrightarrow 0,94 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &\text{при } 8 \leq X_1 \leq 12; \\ &0,01 \leq X_2 \leq 0,05; \\ &0,05 \leq X_3 \leq 0,25; \end{aligned} \quad (13)$$

$$R_{сж} \geq 4,71;$$

$$K_{мор} \geq 0,75.$$

$$C) K_{мор} \longrightarrow 0,75 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &\text{при } 8 \leq X_1 \leq 12; \\ &0,01 \leq X_2 \leq 0,05; \\ &0,05 \leq X_3 \leq 0,25; \end{aligned} \quad (15)$$

$$R_{сж} \geq 4,71;$$

$$R_{изз} \geq 0,94.$$

При этом следует иметь ввиду, что X_1 , X_2 , X_3 должны стремиться к своим минимальным значениям.

Решаем задачи (10)-(11), (12)-(13), (14)-(15), методом Ньютона в совокупности с методом штрафных функций [13]. В результате получаем следующее приближение множества Парето (множества не улучшаемых альтернатив):

$$X_1 = 10,86; X_2 = 0,016; X_3 = 0,05; R_{сж} = 4,71; R_{изз} = 0,94; K_{мор} = 0,81;$$

$$X_1 = 9,49; X_2 = 0,05; X_3 = 0,21; R_{сж} = 4,71; R_{изз} = 0,95; K_{мор} = 0,87;$$

$$X_1 = 10; X_2 = 0,01; X_3 = 0,22; R_{сж} = 4,71; R_{изз} = 0,95; K_{мор} = 0,75;$$

$$X_1 = 10; X_2 = 0,03; X_3 = 0,10; R_{сж} = 4,75; R_{изз} = 0,96; K_{мор} = 0,86.$$

Какую же из этих точек принять в качестве решения задачи (4)-(5) зависит от лица принимающего решения (ЛПР), который обладает более полной информацией. Такая ситуация является стандартной при решении задач многокритериальной оптимизации [12], когда в качестве решения получается не одна точка, а целое множество точек.

Как следует из уравнений регрессии, с увеличением расхода электролита наблюдается рост прочности. Увеличение расхода КОС приводит к повышению прочности и морозостойкости, а затем к их снижению. Понижение показателей прочности и морозостойкости при повышении дозировок, по-видимому, объясняется блокирующим действием кремнийорганического соединения на частицы цемента.

С новой комплексной добавкой получен цементогрунт с максимальной маркой по прочности М40 и морозостойкости F15. Согласно ГОСТ 23558, областью применения такого цементогрунта в конструкциях дорожных одежд является основание дорожных одежд облегченного и покрытие переходного типов.

Марка по прочности М40 с учетом технологического коэффициента прочности и максимальный коэффициент морозостойкости после 15 циклов замораживания-оттаивания достигнуты при оптимальном расходе цемента 10 %, дозировке ОТЭС – 0,03 %, ГН – 0,1 %: предел прочности при сжатии – 4,75 МПа, предел прочности на растяжение при изгибе – 0,96 МПа, коэффициент морозостойкости после 15 циклов замораживания-оттаивания – 0,86. При этом введение комплексной добавки в состав цементогрунта привело к повышению прочности на сжатие на 31,6 %, прочности на растяжении при изгибе на 35,2 %, морозостойкости на 62,3 %.

Заключение. Получены математические зависимости влияния расхода портландцемента, состава и дозировки комплексной добавки на основе кремнийорганического соединения и электролита на физико-механические свойства цементогрунта. Оптимизирован состав цементогрунта, модифицированного комплексной добавкой с учетом области применения в дорожной одежде и выявлена роль ее компонентов в повышении прочности и морозостойкости конструкционного материала. Оптимальный состав цементогрунта с комплексной добавкой следующий: грунт – 100 %, портландцемент – 10 %, октилтриэтоксисилан – 0,03 % (от массы грунта) и гидроксид натрия – 0,1 % (от массы грунта).

Список библиографических ссылок

1. Могилевич В.М. и др. Дорожные одежды из цементогрунта. – М.: Транспорт, 1972. – 214 с.

2. Марков Л.А. и др. Улучшение свойств грунтов поверхностно-активными и структурообразующими веществами. – М.: Автотрансиздат, 1963. – 176 с.
3. Карась Ю.В. Комплексное применение цемента и гидрофобизирующих веществ для укрепления грунтов: Автореферат дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. – М., 1967. – 33 с.
4. Соболевский М.В., Музовская О.А., Попелева Г.С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. – М.: Химия, 1975. – 256 с.
5. Новосельнов А.А. Кремнийорганические гидрофобные покрытия на поверхности строительных материалов: Дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. – М., 2002. – 231 с.
6. Мухаметрахимов Р.Х., Изотов В.С. Исследование влияния кремнийорганических соединений на свойства фиброцементных плит // Известия КГАСУ, 2011, № 4 (18). – С. 254-259.
7. Богданов Р.Р., Ибрагимов Р.А., Изотов В.С. Исследование влияние отечественных гидрофобизаторов на основные свойства цементного теста и раствора // Известия КГАСУ, 2013, № 4 (26). – С. 207-210.
8. Седнев В.А., Савченко Н.А. Кремнийорганические композиции для нанесения защитных гидрофобизирующих покрытий на строительные материалы // Физика и химия обработки материалов, 2011, № 6. – С. 76-81.
9. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1998. – 768 с.
10. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. – Киев: Высшая школа, 1987. – 328 с.
11. Ахмадиев Ф.Г., Гильфанов Р.М. Математическое моделирование и оптимизация «состав-свойство» многокомпонентных смесей // Известия КГАСУ, 2012, № 2 (20). – С. 289-297.
12. Герасимов Е.Н., Почтман Ю.М., Скалозуб В.В. Многокритериальная оптимизация конструкций. – Киев-Донецк: Вища школа, 1985. – 134 с.
13. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: МИР, 1975. – 534 с.

Gilfanov R.M. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: gilfanov.rash@yandex.ru

Vdovin E.A. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: vdovin007@mail.ru

Mavliev L.F. – assistant

E-mail: lenarmavliev@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Optimization of composition of soil-cement with complex additive based on organosilicon compounds

Resume

To enable the application of soil in road structures one of the most effective methods is the strengthening of its cement. Improving the quality of the material is an urgent problem that cannot be solved, in full, without modification of the chemical additive, affecting the structure and properties of soil-cement. Studies have shown that the solution of this problem is possible through the use of additives organosilicon compounds, allowing obtaining hydrophobic materials and electrolytes that give soil-cement high strength properties. Based on the analysis of scientific works to increase strength and frost resistance of building materials and conducted experiments obtained the complex, consisting of organosilicon octyltriethoxysilane and the electrolyte is sodium hydroxide.

In the work the influence of the additive on the basis of octyltriethoxysilane and sodium hydroxide strength and frost resistance of soil-cement using mathematical modeling and the

application of the method of experiment planning. The dependences of the influence of consumption of Portland cement, composition and dosages complex additives on the mechanical properties of the material. The composition of the modified soil-cement with regard to applications in the road pavement and the role of the components of comprehensive additives to increase the strength and hardness optimized.

Keywords: soil-cement, optimization of composition, physic-mechanical properties, the complex, octyltriethoxysilane, sodium hydroxide.

Reference list

1. Mogilevich V.M. and other. Road service from soil-cement. – M.: Transport, 1972. – 214 p.
2. Markov L.A. and other. Improved properties of soil surfactants and structure-forming substances. – M.: Autotransizdat, 1963. – 176 p.
3. Karas J.V. Complex application of cement and water-repellent substances for soil stabilization: abstract of thesis. for obtaining the academic degree of PhD. – M., 1967. – 33 p.
4. Sobolevskiy M.V., Muzovskaya O.A., Popelova G.S. Properties and applications of silicone products. – M.: Himiya, 1975. – 256 p.
5. Novosel'nov A.A. Silicone hydrophobic coating on the surface of building materials: Diss. for obtaining the academic degree of PhD. – M., 2002. – 231 p.
6. Muhametrahimov R.H., Izotov V.S. investigation of the influence of organosilicon compounds on the properties of fiber-cement slabs // News of the KSUAE, 2011, № 4 (18). – P. 254-259.
7. Bogdanov R.R., Ibragimov R.A., Izotov V.C. The Study of the influence of domestic water-repellent agent on the basic properties of cement paste and mortar // News of the KSUAE, 2013, № 4 (26). – P. 207-210.
8. Sednev V.A., Savchenko N.A. Silicone composition for applying a protective water-repellent coatings for building materials // *Physika i himiya obrabotki materialov*, 2011, № 6. – P. 76-81.
9. Batrakov V.G. Modified concretes. Theory and practice. 2nd ed., Rev. and ext. – M.: Visshaya shkola, 1998. – 768 p.
10. Voznesenskiy V.A., Lyashenko T.V., Ogarkov B.L. Numerical solution methods of construction and technological tasks on the computer. – Kiev: Visshaya shkola, 1987. – 328 p.
11. Ahmad F.G., Gilfanov R.M. Mathematical modeling and optimization «composition-property» multicomponent mixtures // News of the KSUAE, 2012, № 2 (20). – P. 289-297.
12. Gerasimov E.N., Pochtman Y.M., Skalozub V.V. Multicriterion optimization of structures. – Kyiv-Donetsk: Vyscha SHKOLA, 1985. – 134 p.
13. Himmelblau D. Applied nonlinear programming. – M.: MIR, 1975. – 534 p.