

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИКАТОРА НА ОСНОВЕ РАСШИРЯЮЩЕЙ ДОБАВКИ В ТЯЖЕЛОМ ЦЕМЕНТНОМ БЕТОНЕ

А. В. Назарова, к.т.н.; С. В. Сороканич, к.т.н.; Д. С. Коваленко

ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет им. В. Даля»

Аннотация. В данной статье представлены результаты выполненной оптимизации состава комплексного модификатора на основе расширяющей добавки для тяжелого цементного бетона. В качестве параметров рассматриваемых переменных факторов при планировании эксперимента приняты: содержание оксидносульфоалюминатной расширяющей добавки и поликарбоксилатного суперпластификатора. Целью оптимизации является получение комплексного модификатора бетона, который способен обеспечить марку по подвижности бетонной смеси П4 и предел прочности при сжатии в проектном возрасте не менее 40 МПа для бетонов с пониженной усадкой. Для достижения заданной цели область оптимальных значений лежит в следующих пределах: содержание расширяющей добавки – 8...10,5 % от массы цемента, а содержание суперпластификатора «MasterGlenium 115» – 1,3...1,5 %.

Ключевые слова: тяжелый бетон, усадка, расширяющая добавка, оптимизация состава, осадка конуса, прочность при сжатии.



*Назарова
Антонина Васильевна*



*Сороканич
Станислав Васильевич*



*Коваленко
Денис Сергеевич*

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Долговечность является одним из требований к любому конструктивному материалу, то есть способностью его в определенных условиях внешнего воздействия не изменять свои свойства. При этом большинство этих материалов теряют свои свойства вследствие развития в них трещинообразования, разделяющих их на отдельные элементы, неспособные противостоять воздействию внешней среды. Для тяжелых цементных бетонов зарождение и развитие в нем трещин способствует попаданию различных агрессивных веществ в эти трещины, что ведёт к развитию коррозии бетона и арматурной стали. Как правило, возникновению трещин в изделиях из бетона способствуют деформации усадки и расширения [1-4].

Одним из способов снижения деформаций усадки является введение расширяющих добавок в состав бетонов. При применении этих добавок в составах комплексных добавок-модификаторов бетонов возможно получить полифункциональный эффект и полностью реализовать потенциал всех компонентов [5, 6].

В данной работе был разработан и оптимизирован состав комплексного модификатора на основе расширяющей добавки оксидносульфоалюминатного типа. В качестве этой добавки обычно выступает смесь из глиноземсодержащего, сульфатного и оксидного компонентов. Расширение осуществляется при взаимодействии алюминатных и сульфатсодержащих фаз с образованием игольчатых кристаллов этtringита, а также дополнительно за счет новообразований оксидов кальция из оксидного компонента. Глиноземсодержащим компонентом принята шамотно-каолиновая пыль (отход производства Донбасского региона, получаемый из электрофильтров вращающихся печей при обжиге шамота), характеризующаяся высокой дисперсностью частиц и повышенным содержанием Al_2O_3 .

(до 40 %). Гипсовый камень использовался в качестве сульфатного компонента. Оксидным компонентом принята известь.

Целью работы является оптимизация состава комплексного модификатора с расширяющей добавкой оксидносульфоалюминатного типа в тяжелом цементном бетоне с пониженной усадкой по величине содержания расширяющей добавки и поликарбоксилатного суперпластификатора для обеспечения требуемых показателей подвижности бетонной смеси и предела прочности при сжатии бетона в проектном возрасте.

ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ПЦ) производства ОАО «Новоросцемент» (г. Новороссийск, РФ);
- природный кварцевый песок (П) Лутугинского песчаного карьера с модулем крупности 1,35;
- щебень фракции 5-20 (Щ) Торезского карьера;
- активный минеральный дисперсный заполнитель – микрокремнезем (МК);
- расширяющая оксидносульфоалюминатная добавка (ОСА) на основе шамотно-каолиновой пыли (65 %), гипса (30 %) и извести (5 %);
- поликарбоксилатный суперпластификатор (СП) «MasterGlenium 115»;
- техническая вода (В).

Подвижность бетонных смесей определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний», предел прочности при сжатии бетонных образцов определяли на образцах-кубах с размером ребра 0,1 м, твердевших в нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Оптимизацию составов бетона выполняли с применением метода математического планирования эксперимента (ПФЭ 2к). Статистический анализ и обработку полученных результатов проводили на основе статистических моделей в соответствии с [7].

Графическую интерпретацию уравнений выполняли с использованием программного комплекса «MathCAD for Windows».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе после выполненных экспериментальных исследований в качестве базового был принят состав бетонной смеси, который характеризовался маркой по подвижности П4 и пределом прочности в возрасте 28 суток 42,7 МПа, а расход компонентов составлял: ПЦ = 400 кг; П = 545 кг; Щ = 1 170 кг; В = 175 л; ОСА = 40 кг; МК = 38 кг; СП = 5,2 л. На основе метода планирования эксперимента ПФЭ = 2^к выполнена оптимизация состава комплексного модификатора на основе расширяющей оксидносульфоалюминатной добавки для тяжелого цементного бетона по величине содержания расширяющей добавки (на основе шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести) и содержания поликарбоксилатного суперпластификатора.

В качестве параметров оптимизации комплексного модификатора приняты:

Y₁ – подвижность бетонной смеси (граничные значения – не менее 16 см, не более 21 см);

Y₂ – предел прочности бетона при сжатии в проектном возрасте (с граничными значениями не менее 40 МПа).

В качестве рассматриваемых переменных факторов при планировании эксперимента приняты:

X₁ – количество добавки СП, % от расхода цемента;

X₂ – количество расширяющей добавки ОСА, % от расхода цемента.

Значения факторов варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Значение факторов варьирования

Код фактора	Интервал варьирования	Уровни фактора		
		-1	0	+1
X ₁	0,2	1,1	1,3	1,5
X ₂	2	8	10	12

Матрица планирования и результаты экспериментов по подвижности бетонной смеси и прочности при сжатии представлены в таблицах 2, 3 соответственно.

Таблица 2.

Матрица планирования и результаты эксперимента (подвижность смеси)

№ оп.	Кодированное значение факторов		Натуральное значение факторов		Выходная переменная (осадка конуса, см)				Расчетные показатели	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂	Y _{u1}	Y _{u2}	Y _u	S _{u2}	Y _u	
1	+1	+1	1,5	12	18	17	17,5	0,5	16,87	
2	-1	+1	1,1	12	8	11	9,5	4,5	10,07	
3	+1	-1	1,5	8	18	20	19	2	19,67	
4	-1	-1	1,1	8	13	14	13,5	0,5	12,87	

Таблица 3.

Матрица планирования и результаты эксперимента (прочность при сжатии)

№ оп.	Кодированное значение факторов		Натуральное значение факторов		Выходная переменная (предел прочности при сжатии, МПа)				Расчетные показатели	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂	Y _{u1}	Y _{u2}	Y _{u3}	Y _u	S _{u2}	Y _u
1	+1	+1	1,5	12	34	36,5	35	35,17	3,16	36,5
2	-1	+1	1,1	12	42	40,7	41,5	41,4	0,86	41,3
3	+1	-1	1,5	8	43,7	42,1	45,3	43,7	5,12	40,1
4	-1	-1	1,1	8	41,5	42,6	43,7	42,6	2,42	44,9

Проверка значимости коэффициентов математических моделей выполнена по критерию Стьюдента, адекватность математических моделей проверена по критерию Фишера. Были получены следующие уравнения регрессии:

$$\hat{y}_1 = 14,87 + 3,4X_1 - 1,4X_2 \quad (1)$$

$$\hat{y}_2 = 40,7 - 2,4X_1 - 1,8X_1X_2 \quad (2)$$

Формулы перехода от кодированных значений факторов эксперимента к натуральным для уравнений 1 и 2 соответственно имеют вид:

$$X_1 = \frac{x_1 - 1,3}{0,2}; \quad X_2 = \frac{x_2 - 10}{2}. \quad (3, 4)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии (1), характеризующего изменение подвижности бетонных смесей от действующих факторов (X_1, X_2), представлена на рис. 1.

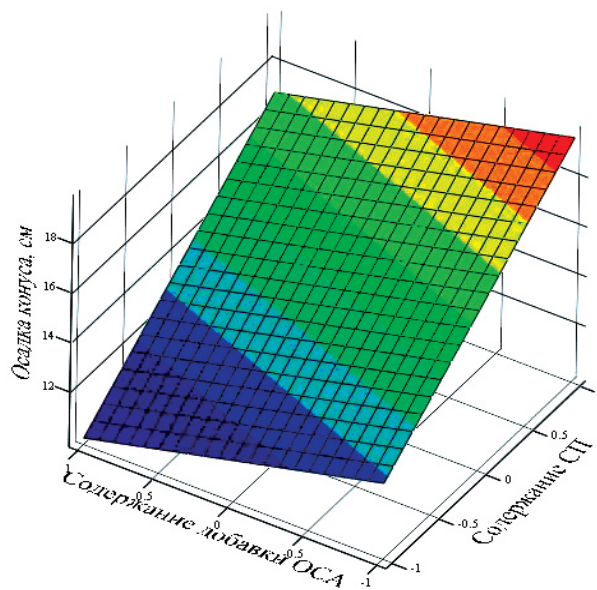
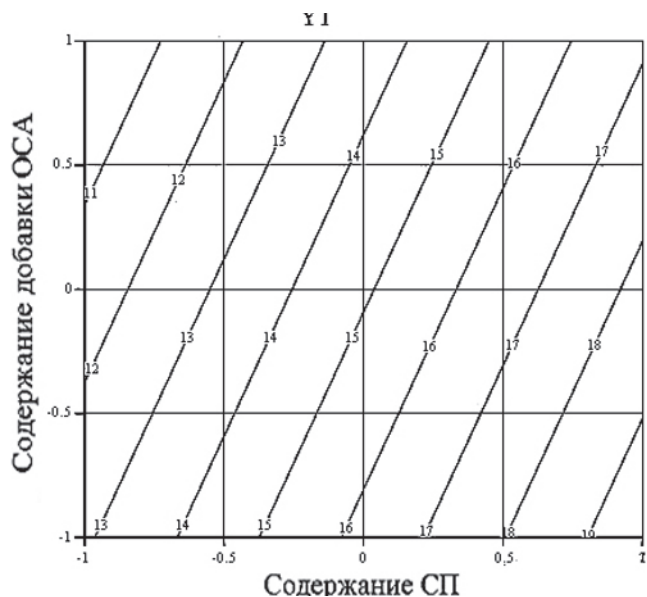


Рис. 1. Графическая интерпретация уравнения регрессии (1), характеризующего изменение подвижности бетонных смесей от действующих факторов (X_1, X_2)

Установлено, что на величину подвижности бетонной смеси в большей мере оказывает влияние фактор (X_1) – содержание суперпластификатора, чем расширяющей добавки ОСА (X_2). Повышение содержания добавки СП приводит к повышению подвижности бетонной смеси, напротив, повышенное содержание до-

бавки ОСА снижает её технологические свойства, что является следствием высокой водопотребности компонентов этой добавки. Графическая интерпретация уравнения регрессии (2), характеризующего изменение предела прочности при сжатии бетона от действующих факторов (X_1, X_2), представлена на рис. 2.

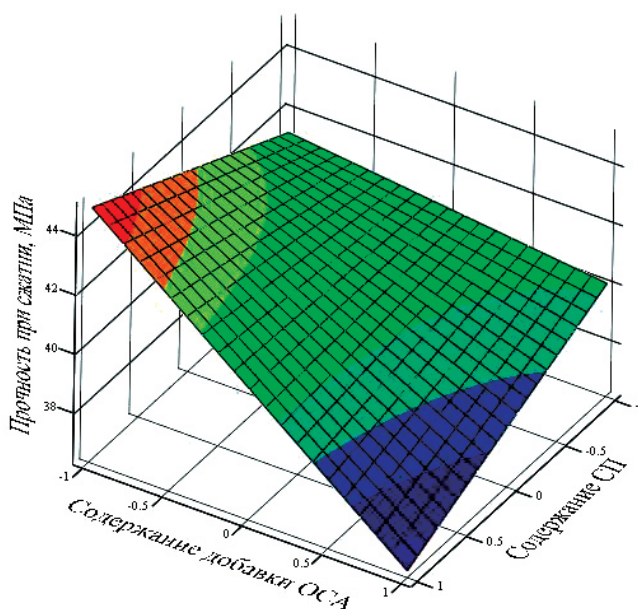
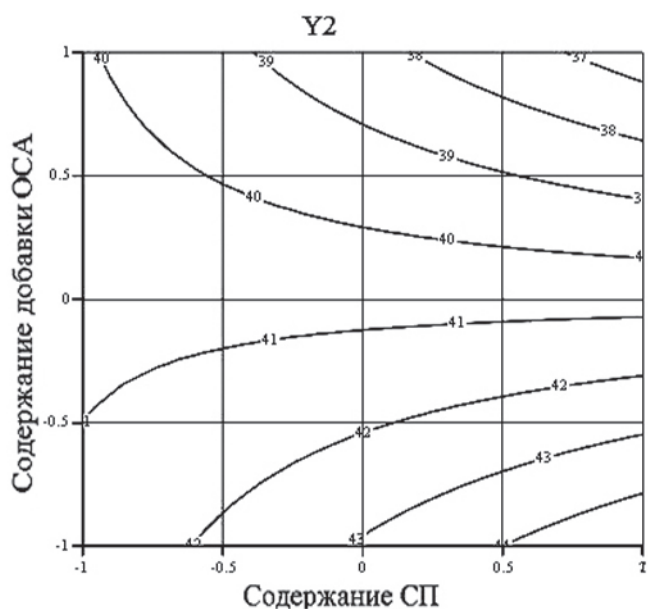


Рис. 2. Графическая интерпретация уравнения регрессии (2), характеризующего изменение предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток от действующих факторов (X_1, X_2)

Показано, что прочность бетона при сжатии повышается при увеличении дозировки суперпластификатора (фактор X_1) и снижении расхода добавки ОСА (фактор X_2). Также присутствует вторая зависимость повышения прочности: при повышении содержания расширяющей добавки ОСА необходимая прочность (40 МПа) достигается при снижении количества СП.

В соответствии с принятыми граничными значениями функций отклика: марка по подвижности бетонной смеси П4, предел прочности при сжатии бетона в проектном возрасте не менее 40 МПа, область оптимальных составов бетонных смесей по величине содержания расширяющей оксидносульфоалюминатной добавки (ОСА=8...10,5 %) и суперпластификатора (СП=1,3...1,5 %) представлена на рис. 3.

При расчетах экономической эффективности за базовый вариант принят состав бетона с прочностью при сжатии $R_{сж} = 43,8$ МПа, в котором расширяющим компонентом принята порошкообразная добавка «Expancrete» итальянской фирмы «Marec», а в качестве разработанного – состав бетона с прочностью при сжатии $R_{сж} = 43,0$ МПа с оптимизированной по составу расширяющей оксидносульфоалюминатной добавкой на основе шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести.

Калькуляция стоимости сырьевых материалов на 1 м³ бетона по базовому и разработанному вариантам составов приведена в таблице 4.

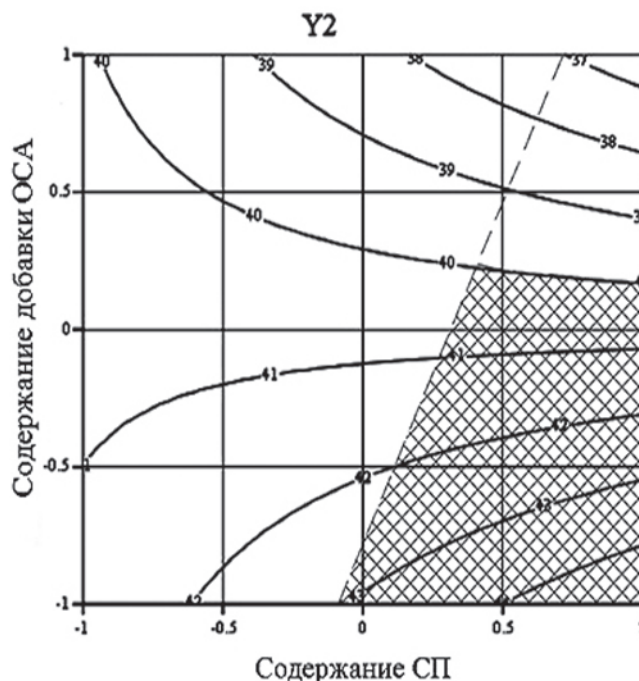


Рис. 3. Область оптимальных составов тяжелого цементного бетона с комплексным модификатором на основе расширяющей добавкой ОСА

Таблица 4.

Калькуляция стоимости сырьевых материалов

Наименование сырьевых материалов	Ед. изм.	Стоимость материала, руб.	Расход на 1 м ³ бетона	Стоимость на 1 м ³ бетона
1	2	3	4	5
Базовый состав				
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	6400	0,400	2560
Песок	т	400	0,545	218
Щебень	т	650	1,175	763,75
Вода	т	33,64	0,176	5,92
Суперпластификатор Master Glenium 115	л	230	5,2	1196
Микрокремнезем	кг	15	38	570
Expancrete	кг	100	28	2800
Итого:				8113,67
Состав с добавкой ОСА				
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	6400	0,400	2560
Песок	т	400	0,545	218
Щебень	т	650	1,175	763,75
Вода	т	33,64	0,176	5,92
Суперпластификатор MasterGlenium 115	л	230	5,2	1196
Микрокремнезем	кг	15	38	570
Добавка ОСА:				
– шамотно-каолиновая пыль	кг	15	20,8	312
– гипс	кг	4	9,6	38,4
– известь	кг	7	1,6	11,2
Итого:				5675,27

Согласно данным таблицы 4, экономическая эффективность по показателю стоимости сырьевых материалов на 1 м³ модифицированного бетона при замене фирменной расширяющей добавки «Expancrete» разработанной добавкой ОСА составит:

$$\mathcal{E} = 8\,113,67 - 5\,675,27 = 2\,438,4 \text{ руб.}$$

ВЫВОДЫ

По результатам выполненной оптимизации состава комплексного модификатора на основе расширяющей добавки для тяжелого цементного бетона с пониженной усадкой по содержанию расширяющей добавки и суперпластификатора было установлено, что

для обеспечения марки бетонной смеси по подвижности П4 и предела прочности при сжатии бетона в проектном возрасте не менее 40 Мпа область оптимальных составов находится в следующих пределах: содержание расширяющей добавки оксидносульфоалюминатного типа 8...10,5 % от массы цемента; содержание суперпластификатора «MasterGlenium 115» – 1,3...1,5 %.

По итогам расчетов экономической эффективности по показателю стоимости сырьевых материалов на 1 м³ модифицированного бетона при замене фирменной расширяющей добавки «Ехрапcrete» разработанной добавкой ОСА сумма составит 2 438,4 руб.

Список литературы

1. Батраков, В. Г. Модификаторы бетона – новые возможности [Текст] / В. Г. Батраков // Мат-лы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона. – М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. – Кн. 1. – С. 184-208.
2. Холмянский, М. М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность [Текст] / М. М. Холмянский. – М.: Стройиздат, 1997. – 576 с.
3. Рамачандран, В. Наука о бетоне [Текст] / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.
4. Kurdowski, W. Cement and concrete chemistry [Text] / W. Kurdowski. – Springer Publ., 2014. – 700 p.
5. Кардунян, Г. С. Новый органо-минеральный модификатор серии «МБ» – Эмбелит для производства высококачественных бетонов [Текст] / Г. С. Кардунян, С. С. Каприелов // Строительные материалы. – № 8, 2005. – С. 12-15.
6. Кирсанова, А. А. Высокофункциональные тяжелые бетоны, модифицированные комплексными добавками, включающими метаколин [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.23.05 / А. А. Кирсанова – Томск, 2016. – 164 с.
7. Вознесенский, В. А. Современные методы оптимизации композиционных материалов [Текст] / В. А. Вознесенский, В. Н. Выровой, В. Е. Керш, Т. В. Ляшенко – К.: Будивельник, 1983. – 144 с.