

Использование комплексной модифицирующей добавки для расширения сырьевой базы мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов

П.Э. Соколов, В.В. Вовко, С.В. Лукьяница, А.С. Ломов, В.Б. Черников

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: Рассмотрены современные направления исследований мелкозернистых бетонов. Приведены характеристики используемых материалов и добавок. Проведено планирование эксперимента по использованию комплексной модифицирующей добавки для мелкозернистого дисперсно-армированного бетона на тонком песке. Результаты проведенных исследований проанализированы на статистическую значимость. На основании результатов исследований получены уравнения регрессии для откликов целевых функций – предел прочности на сжатие и изгиб, а также средней плотности мелкозернистого дисперсно-армированного бетона. Построены контурные графики и графики поверхностей функции отклика – предела прочности при сжатии для всех комбинаций двух факторов. Установлен состав комплексной добавки, обеспечивающий мелкозернистому дисперсно-армированному бетону на тонком песке максимальные прочностные характеристики.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, комплексная добавка, планирование эксперимента, прочность, уравнение регрессии, графики функции отклика.

Основные свойства бетонов определяются их составом и качеством используемых материалов. Проектирование состава бетона, в том числе мелкозернистого позволяет улучшить его качество, повысить технико-экономические показатели. Однако довольно часто требования, предъявляемые к бетону являются взаимоисключающими [1].

С момента своего появления и вплоть до настоящего времени цементные бетоны претерпели ряд трансформаций. Первоначально состав цементных бетонов ограничивался небольшим числом компонентов, которые позволяли получать материал с требуемыми свойствами. К настоящему времени бетоны могут содержать в своем составе наряду с традиционными составляющими (цемент, крупный и мелкий заполнители, вода) химические добавки различного назначения, тонкодисперсные наполнители различного происхождения, фибру различных видов и другие добавки.

Параллельно с увеличением количества компонентов цементных бетонов происходит рост стоимости строительного сырья и материалов. Как

следствие, это приводит к увеличению числа факторов, которые необходимо учитывать при проектировании состава бетона [2]. Решение задач подобного рода требует реализации комплексного подхода, который должен включать в себя совокупность физических, экспериментальных и статистических моделей [3].

В работах ряда авторов, посвященных мелкозернистым бетонам, рассматриваются вопросы использования различных техногенных отходов – отсеков от дробления горных пород, продуктов сжигания угля, а также отходов производств совместно с комплексными добавками [4-6], в частности, черной и цветной металлургии [7, 8].

Ряд работ посвящен различным аспектам применения местных [9, 10], мелких, некондиционных и загрязненных песков [11], в том числе с использованием модифицирующих добавок [12].

Осуществляются исследования структуры и свойств мелкозернистых бетонов [13], оценивается их стойкость при использовании заполнителей и наполнителей различного состава [14], в том числе модифицированных заполнителей [15]. Имеют место работы, посвященные анализу совместного влияния вредных примесей и минеральных добавок на прочность мелкозернистого бетона [16].

Проводится сравнительный анализ прочностных характеристик мелкозернистого и тяжелого бетонов, армированных базальтовой фиброй [17], оценивается возможность применения фибры различных видов в технологии мелкозернистых бетонов [18].

При проведении этих работ используются различные виды моделирования [4], в том числе и экстремальное моделирование оптимального состава, и содержание микронаполнителя в бетоне [19].

Таким образом, исследуется широкий круг вопросов, который охватывает все возможные направления, начиная от сырьевых материалов и заканчивая свойствами готовых мелкозернистых бетонов.

Целью данной работы является построение и анализ экспериментально-статистической модели «модифицирующие добавки, мелкодисперсный минеральный наполнитель, фибра – свойства» следующих физико-механических характеристик модифицированного мелкозернистого дисперсно-армированного бетона на местном тонком песке: максимальная прочность при сжатии, прочность на изгиб и средняя плотность в возрасте 28 суток.

При проведении исследований были использованы следующие материалы:

- вяжущее вещество – портландцемент ПЦ 500 Д0 Н (ГОСТ 10178-85, ГОСТ 31108-2016, ГОСТ 30515-2013). Нормальная густота цементного теста - 28,6 %. Предел прочности при сжатии, в возрасте 28 суток – 49,0 МПа. Предел прочности на изгиб – 5,9 МПа;

- мелкий заполнитель – местный кварцевый песок – тонкий, с модулем крупности менее $M_k = 1,0$ и насыпной плотностью – 1466 кг/м^3 (ГОСТ 8736-2014);

- в качестве тонкодисперсного минерального наполнителя применялся конденсированный микрокремнезем «МК-85», с насыпной плотностью – $155,8 \text{ кг/м}^3$, массовая доля диоксида кремнезема (SiO_2) составляет не менее 85%. Рекомендуемая производителем дозировка наполнителя колеблется от 5 до 30%, от массы цемента (ГОСТ Р 56196-2014);

- для регулирования подвижности мелкозернистой бетонной смеси и ввиду использования тонкого песка в качестве мелкого заполнителя применялся суперпластификатор «Полипласт СП-1» [20], соответствующий требованиям (ГОСТ 24211-2008, ТУ 5870-005-58042865-05) для

пластифицирующих и водоредуцирующих добавок. Он представляет собой смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот различной молекулярной массы. Применяемый суперпластификатор имел концентрацию – 36,2% и плотность – 1,195 г/см³. Дозировка добавки составляла 0,3-0,8% от массы цемента;

- в качестве дисперсно-армирующей составляющей применялось базальтовая фибра «Семmix СемFibra R». Диаметр фиброволокна составляет 20-30 мкм, длина – 10 мм. Минимальная температура применения до -15°C, максимальная температура применения до +30°C;

- добавка «Unticorprot» - инновационный продукт, разработка ООО «Институт промышленной экологии» [21] применялась для придания мелкозернистым бетонам специальных свойств.

Указанные выше материалы были использованы для подбора состава мелкозернистого бетона – контрольного состава, по стандартным методикам: ГОСТ 27006-2019 «Бетоны. Правила подбора состава», ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», «Рекомендации по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов (к ГОСТ 27006-86)», «Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов. Методическое пособие». На основании подобранного контрольного состава назначались составы с наполнителем, добавками и фиброй в соответствии с построенным планом эксперимента.

Оценка физико-механических характеристик исследуемых мелкозернистых бетонов производилась стандартными методами (ГОСТ 30744-2001, ГОСТ 10180-2012). Из приготовленной бетонной смеси формовались балочки размером 40×40×160 мм, которые твердели и набирали прочность в нормальных условиях. По окончании твердения и набора прочности, в возрасте 28 суток производилось определение средней плотности, прочности на растяжение при изгибе и прочности при сжатии в

соответствии с действующей нормативной документацией (ГОСТ 12730.1-2020, ГОСТ 30744-2001).

Планирование эксперимента осуществлялось в соответствии с требованиями действующей нормативной документации (ГОСТ 24026-80). Для проведения эксперимента был применен план полного факторного эксперимента (ПФЭ) - 2^4 , который приведен на рис. 1.

Run	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

Рис. 1. – План полного факторного эксперимента типа 2^4

При создании плана эксперимента использовалось программное обеспечение Minitab. В качестве факторов использованы:

- микрокремнезем (A), с нижним уровнем фактора – 10% и верхним уровнем фактора – 30% (от массы цемента);
- суперпластификатор (B), с нижним уровнем фактора – 0,3% и верхним уровнем фактора – 0,8% (от массы цемента);
- добавка «Unticorprot» (C), с нижним уровнем фактора – 2% и верхним уровнем фактора – 5% (от массы цемента);
- фибра базальтовая (D), с нижним уровнем фактора – 0,05% и верхним уровнем фактора – 0,20% (от массы цемента).

В качестве значений целевых функций были использованы полученные в результате эксперимента:

- прочность при сжатии мелкозернистого бетона, МПа;
- прочность на растяжение при изгибе мелкозернистого бетона, МПа;

- средняя плотность мелкозернистого бетона, кг/л.

Предварительно был изготовлен контрольный состав мелкозернистого бетона, который показал следующие физико-механические свойства:

- предел прочности при сжатии, МПа – 24,1;
- предел прочности при изгибе, МПа – 6,0;
- средняя плотность, кг/л – 2,2.

На основании составленного плана (рис.1) были проведены исследования, результаты которых представлены в таблице №1.

Таблица № 1

Результаты исследований физико-механических характеристик
мелкозернистого бетона

Состав	Расход компонентов в % от массы цемента				Предел прочности, МПа		Средняя плотность, кг/л
	МК-85	СП-1	Unticorprot	фибра	при сжатии	при изгибе	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5	0,3	2	0,05	29,0	6,8	2,14
2	30	0,3	2	0,05	34,0	6,5	2,05
3	5	0,8	2	0,05	35,1	6,9	2,14
4	30	0,8	2	0,05	35,2	6,6	2,09
5	5	0,3	5	0,05	36,7	6,5	2,19
6	30	0,3	5	0,05	36,3	7,1	2,17
7	5	0,8	5	0,05	38,7	7,4	2,20
8	30	0,8	5	0,05	34,0	7,0	2,14
9	5	0,3	2	0,20	33,7	7,3	2,16
10	30	0,3	2	0,20	38,9	7,0	2,17
11	5	0,8	2	0,20	39,1	7,4	2,18
12	30	0,8	2	0,20	35,0	7,3	2,13
13	5	0,3	5	0,20	33,4	7,4	2,20
14	30	0,3	5	0,20	25,7	6,1	2,14
15	5	0,8	5	0,20	39,7	7,7	2,15
16	30	0,8	5	0,20	35,6	7,2	2,10

Полученные результаты позволили подобрать модель данных и построить график оценки влияния факторов на функцию отклика. Результаты

подбора модели и построения графиков дают возможность определить, какие факторы оказывают наибольшее влияние на функции отклика (см. рис. 2).

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		35,017	0,588	59,57	0,000	
superplasticizer	3,087	1,543	0,588	2,63	0,024	1,00
microsilica*unticorprot	-2,891	-1,445	0,588	-2,46	0,032	1,00
unticorprot*fiber	-3,092	-1,546	0,588	-2,63	0,023	1,00
superplasticizer*unticorprot*fiber	2,764	1,382	0,588	2,35	0,038	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2,35113	69,77%	58,78%	36,04%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	140,34	35,086	6,35	0,007
Linear	1	38,12	38,115	6,90	0,024
superplasticizer	1	38,12	38,115	6,90	0,024
2-Way Interactions	2	71,66	35,831	6,48	0,014
microsilica*unticorprot	1	33,42	33,423	6,05	0,032
unticorprot*fiber	1	38,24	38,239	6,92	0,023
3-Way Interactions	1	30,57	30,567	5,53	0,038
superplasticizer*unticorprot*fiber	1	30,57	30,567	5,53	0,038
Error	11	60,81	5,528		
Total	15	201,15			

Рис. 2. – Результаты анализа влияния факторов и взаимодействий факторов на функцию отклика – предел прочности при сжатии мелкозернистого дисперсно-армированного бетона

На рис. 2 в таблице «Coded Coefficients» в столбце «Coef» приведены коэффициенты для полинома оригинальной функции. Таким образом, функция отклика – предел прочности при сжатии для реальных значений факторов имеет вид:

$$R_{сж} = 35,02 + 1,54s - 1,45m \cdot u - 1,55u \cdot f + 1,38s \cdot u \cdot f + \varepsilon, \quad (1)$$

где s , m , u и f – соответственно расходы суперпластификатора, микрокремнезема, «Unticorprot» и фибры в % от массы цемента; ε – отклонение наблюдаемых значений от значений модели, сумма которых составляет 2,35.

Аналогичные уравнения регрессии были получены для функций отклика – предел прочности при изгибе и средней плотности мелкозернистого бетона – формулы (2) и (3).

$$R_{\text{изг}} = 7,01 - 0,16m + 0,18s + 0,17f - 0,13m \cdot f + 0,10s \cdot u - 0,12u \cdot f + 0,12m \cdot s \cdot f - 0,15m \cdot u \cdot f + 0,11m \cdot s \cdot u \cdot f + \varepsilon \quad (2)$$

где $R_{\text{изг}}$ – предел прочности при изгибе; для данной модели сумма отклонений наблюдаемых значений от модели составляет – 0,13.

$$\rho_{\text{ср.б.}} = 2,15 - 0,02m + 0,01u - 0,02u \cdot f + \varepsilon \quad (3)$$

где $\rho_{\text{ср.б.}}$ – средняя плотность бетонной смеси, кг/л; для данной модели отклонение наблюдаемых значений от значений модели составляет - 0,03.

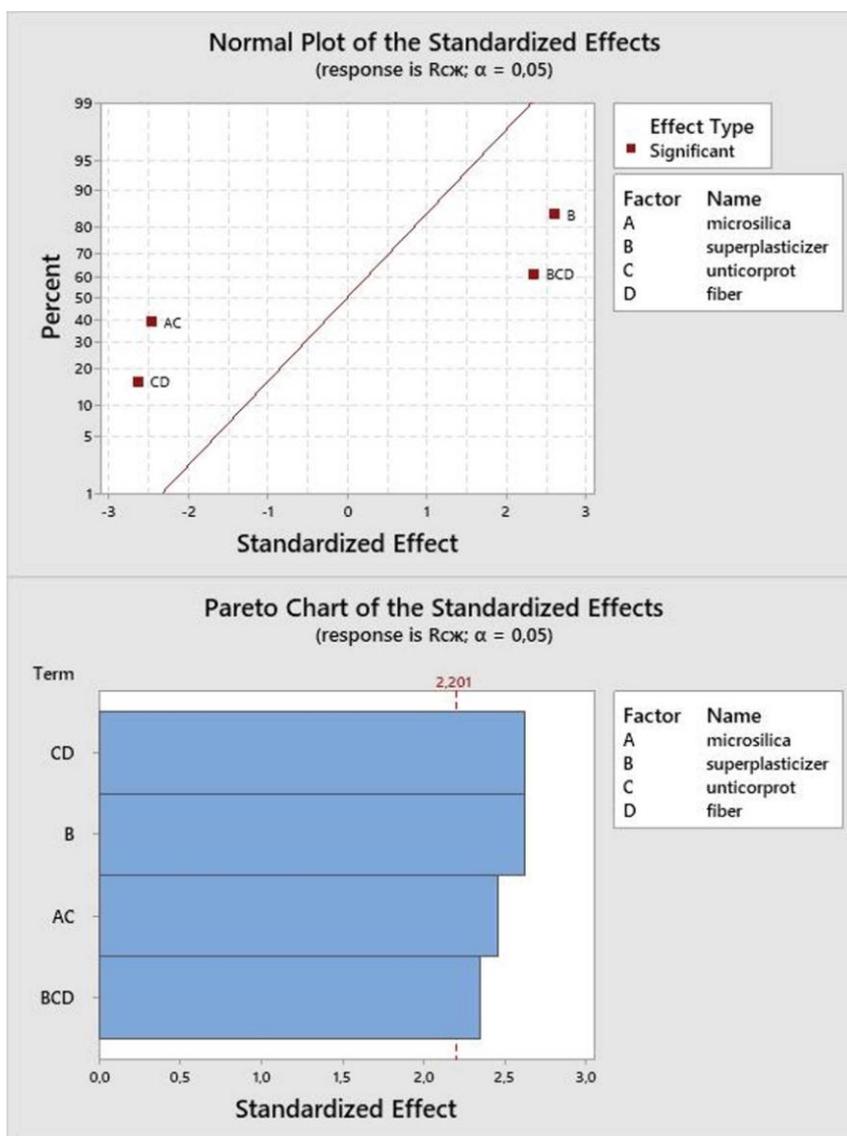


Рис. 3. – Графики влияния факторов на предел прочности при сжатии мелкозернистого дисперсно-армированного бетона

На рис. 3 сверху приведен график оценки влияния исследованных факторов на предел прочности при сжатии мелкозернистого бетона по нормальному закону распределения, а снизу по закону Парето.

Используем значения вероятности (P-Value) приведенные на рис. 2 в таблице «Estimated Effects and Coefficients» (оцениваемые влияния и коэффициенты) для определения значимости влияний. При $\alpha=0,05$ статистически значимыми являются основное влияние – расход суперпластификатора (superplasticizer), двойные взаимодействия «расход микрокремнезема – расход «Unticorprot»» (microsilica*unicorprot) и «расход «Unticorprot» - расход базальтовой фибры», а также тройное взаимодействие «расход суперпластификатора - расход «Unticorprot» - расход базальтовой фибры» (superplasticizer* unicorprot*fiber), т.к. соответствующие значения вероятности менее 0,05 ($P_1=0,024$, $P_2=0,032$, $P_3=0,023$ и $P_4=0,038$). Однако остальные факторы, их двойные, тройные и четверные взаимодействия статистически значимыми не являются, поскольку соответствующие значения вероятности имеют слишком высокие значения, превышающие 0,05. Отметим, что эти результаты получены после перебора различных комбинаций факторов и их взаимодействий.

Предварительную оценку адекватности полученной модели можно произвести, используя коэффициент детерминации R-Sq (см. рис. 2).

Парный коэффициент детерминации для функции отклика – предел прочности при сжатии мелкозернистого дисперсно-армированного бетона с комплексной добавкой составляет – 69,77%. Это означает, что изменение предела прочности, при сжатии мелкозернистого бетона модифицированного комплексной добавкой почти на 70% зависит от исследуемых факторов, а на долю других факторов приходится немногим более 30% изменения результативного показателя. Поэтому характер связи можно оценить, как умеренный. Т.е. нельзя говорить об очень высокой степени соответствия

модели экспериментальным значениям. Парный коэффициент детерминации для функции отклика – средняя плотность модифицированного мелкозернистого бетона составляет – 75,05%, т.е. изменение средней плотности более чем на 75% зависит от исследуемых факторов. Наибольшая величина парного коэффициента детерминации 96,68% приходится на предел прочности при изгибе.

Дальнейший анализ и обсуждение результатов проведем на примере предела прочности при сжатии мелкозернистого дисперсно-армированного бетона. Как видно из формулы (1), на величину предела прочности при сжатии мелкозернистого модифицированного бетона значимые факторы и их взаимодействия оказывают в целом одинаковое влияние, которое колеблется от 1,38 до 1,55. Таким образом, наибольшее влияние на предел прочности при сжатии оказывают содержание суперпластификатора и содержание взаимодействия ««Unticorprot» - базальтовая фибра». Промежуточное положение по величине влияния занимает содержание взаимодействия «микрокремнезем – базальтовая фибра». Наименьшее влияние на предел прочности при сжатии мелкозернистого модифицированного бетона оказывает содержание тройного взаимодействия «суперпластификатор – «Unticorprot» - базальтовая фибра».

Однако, если не учитывать величину влияния различных факторов и их взаимодействий, то можно заключить следующее: к повышению предела прочности при сжатии мелкозернистого дисперсно-армированного бетона приводит повышенное содержание суперпластификатора и взаимодействия «суперпластификатор – «Unticorprot» - базальтовая фибра»; напротив повышенное содержание взаимодействия «микрокремнезем – «Unticorprot»», а также взаимодействия ««Unticorprot» - базальтовая фибра» приводит к снижению предела прочности при сжатии. На наш взгляд, это говорит о том, что микрокремнезем, «Unticorprot» и в определенной степени базальтовая

фибра обладают высокой водопотребностью. Наряду с этим использование тонкого песка только усиливает этот эффект.

С помощью графиков (см. рис. 3) оценим значимость влияния факторов и их взаимодействий на примере предела прочности при сжатии мелкозернистого дисперсно-армированного бетона. Уменьшение или увеличение количества факторов или их взаимодействий не привело к улучшению полученной модели. Снизу на рис. 3 представлена гистограмма Парето, которая отображает абсолютные значения влияния факторов и их взаимодействий. Красная контрольная вертикальная линия указывает табличное значение критерия Стьюдента. Факторы и их взаимодействия, для которых рассчитанные значения критерия Стьюдента превышают табличное значение – являются статистически значимыми. Сверху на рис. 3 представлена оценка влияний факторов и их взаимодействий по нормальному закону распределения. Красными квадратиками обозначены значимые факторы и их взаимодействия. Как видно на графике, один фактор и одно тройное взаимодействие являются положительными, а два двойных взаимодействий - отрицательными. На основании анализа графиков влияния можно сделать вывод о том, что модель является значимой, однако при этом модель не является иерархической.

Построим контурные графики (см. рис. 4) и графики поверхностей функции отклика (см. рис. 5) - предела прочности при сжатии мелкозернистого дисперсно-армированного бетона. Из всех возможных вариантов контурных графиков, на рис. 4, в качестве примера приведены следующие комбинации двух факторов: микрокремнезем - «Unticorprot» (см. рис. 4.а) и суперпластификатор - «Unticorprot» (см. рис. 4.б). Графики поверхностей функции отклика для аналогичных комбинаций факторов приведены на рис. 5.а и рис. 5.б соответственно.

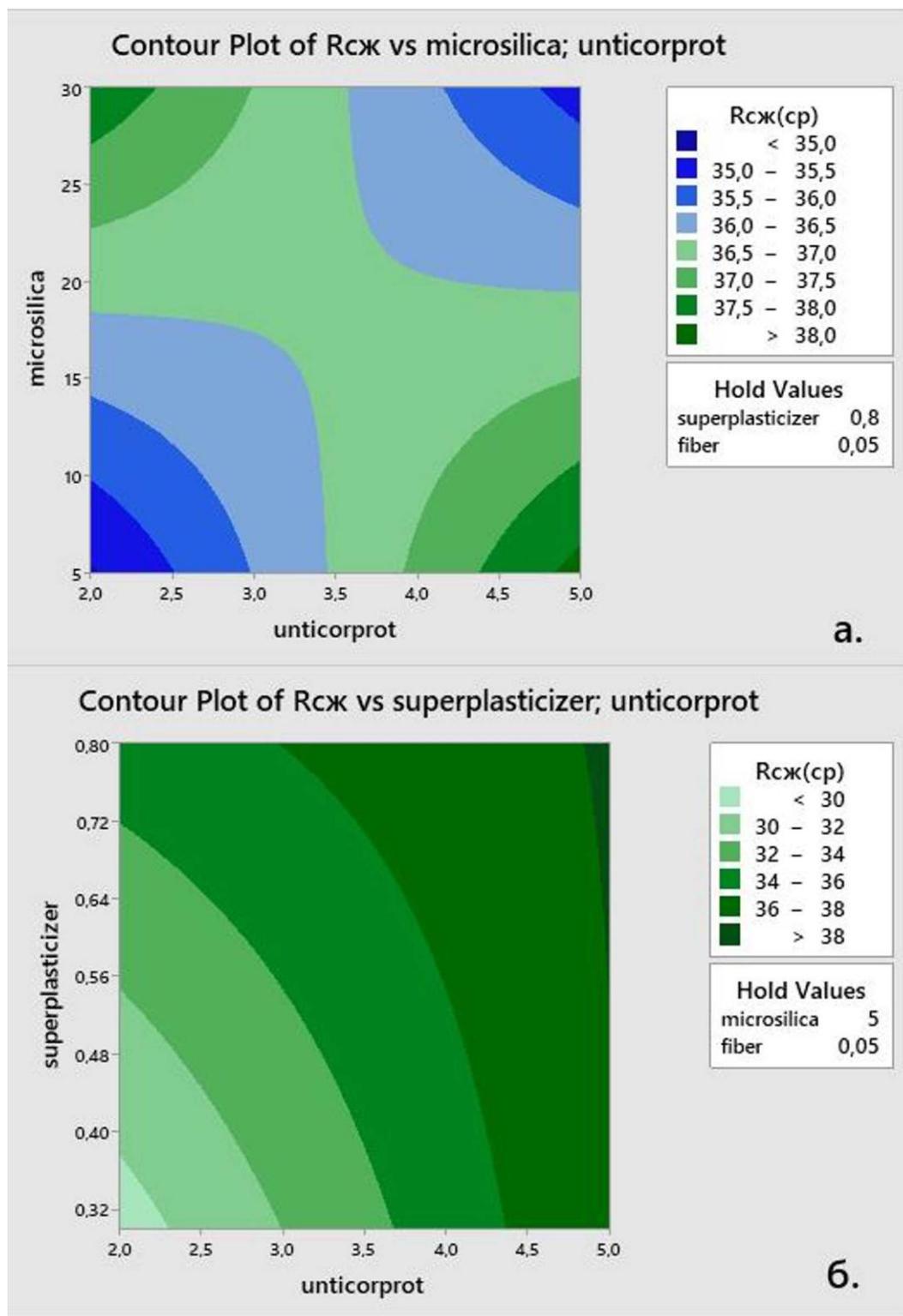


Рис. 4. – Контурные графики функции отклика модифицированного мелкозернистого дисперсно-армированного бетона

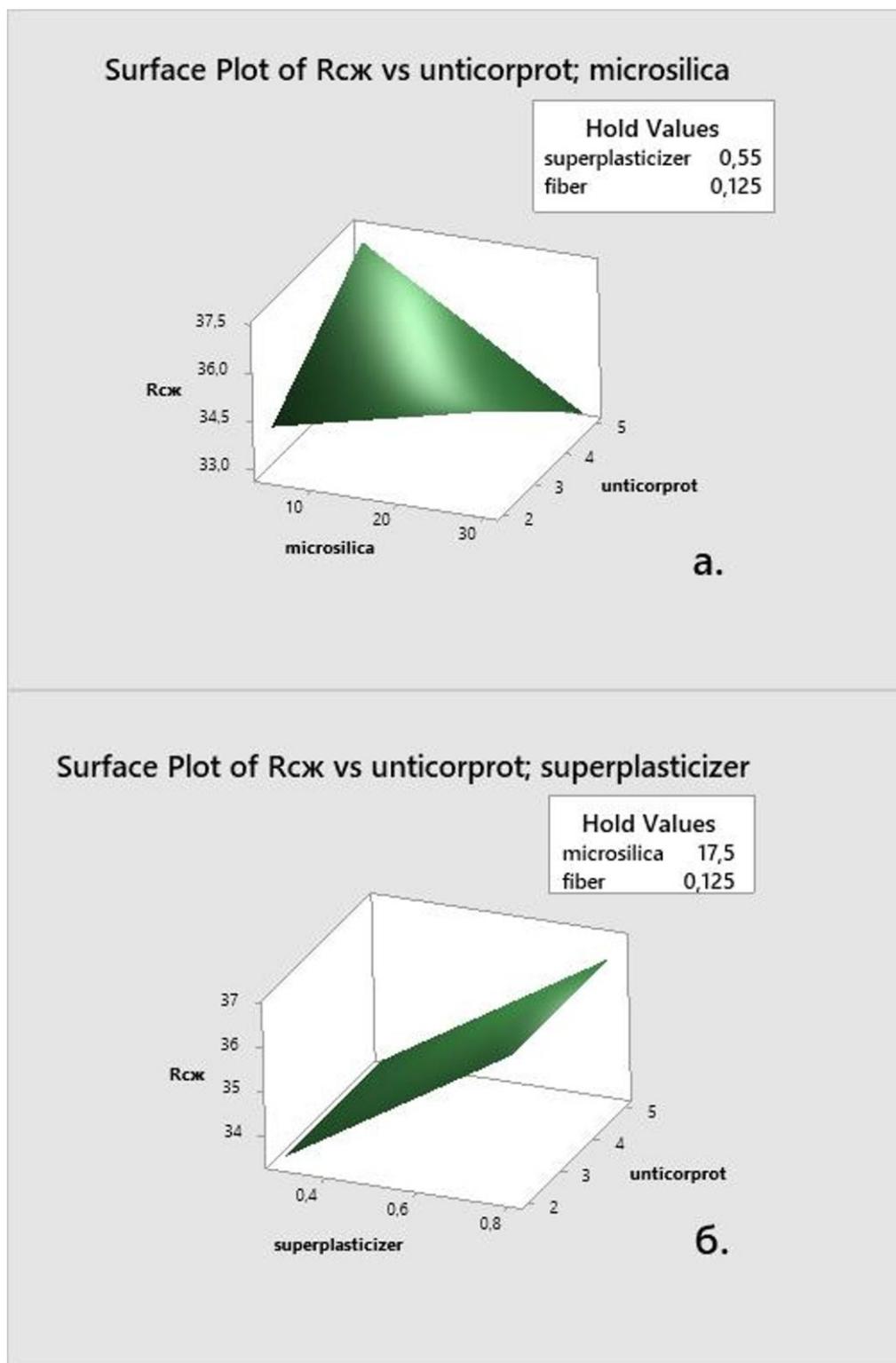


Рис. 5. – Графики поверхностей функции отклика модифицированного мелкозернистого дисперсно-армированного бетона

Проведем анализ данных эксперимента и сравним их физико-механические характеристики с характеристиками контрольного состава

мелкозернистого бетона. Как видно из таблицы №1, минимальная прочность при сжатии мелкозернистого дисперсно-армированного бетона на тонком песке составляет 25,71 МПа, что на 6,7% превышает этот показатель, полученный у контрольного состава. Максимальный предел прочности при сжатии составляет 39,73 МПа, что на 64,85% выше, чем у контрольного состава. Минимальный предел прочности при изгибе у исследуемого мелкозернистого дисперсно-армированного бетона составляет 6,05 МПа, что на 0,83% выше, чем у контрольного состава. Максимальный предел прочности при изгибе составляет 7,71 МПа, что выше, чем у контрольного состава на 28,5%. Оба максимальных показателя соответствуют составу №15. Минимальная средняя плотность 2,048 кг/л соответствует составу №2, она на 6,9% меньше, чем у контрольного состава. Максимальная средняя плотность получена у составов №7 и 13, она равна средней плотности у контрольного состава. Средняя плотность у состава №15 на 50 кг/м³ меньше, чем у контрольного состава. Несмотря на незначительные различия по средней плотности в случае реального производства и с учетом поставленных целей, она может оказывать существенное влияние на принятие производственных решений.

Таким образом, наилучшим по прочностным показателям следует считать состав №15. Комплексная добавка этого состава включает: 5% микрокремнезема; 0,8% суперпластификатора; 5% «Unticorprop» и 0,2% базальтовой фибры.

На основании полученных результатов планирования и проведения эксперимента, обработки и анализа полученных данных можно сделать следующие выводы и заключения. Получены уравнения регрессии, описывающие зависимости предела прочности при сжатии, предела прочности при изгибе и средней плотности мелкозернистого дисперсно-армированного бетона на тонком песке от расхода составляющих

комплексной модифицирующей добавки. Подтверждена адекватность и значимость полученных моделей. Установлен состав комплексной добавки, обеспечивающий максимальный предел прочности при сжатии мелкозернистого дисперсно-армированного бетона на местном тонком песке.

Литература

1. Бумага А.И., Братчун В.И., Конопацкий Е.В. Оптимизация состава комбинированного заполнителя мелкозернистого бетона методами БН-исчисления // Современное промышленное и гражданское строительство. 2016. Т. 12. №2. С. 91-98.

2. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих (повышение прочности и морозостойкости, минимизация расхода ресурсов) // Современное промышленное и гражданское строительство. 2007. Т. 3. №1. С. 5-15.

3. Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2. С. 13-25.

4. Ерошкина Е.А., Коровкин М.О., Саденко С.М., Кирьянова А.А. Влияние состава геополимерного вяжущего на основе отсева дробления гранита на свойства мелкозернистого бетона // PGUAS Bulletin: construction, science and education. 2020. №2. С. 27-33.

5. Буравчук Н.И., Кондюрин А.М., Гурьянова О.В. Мелкозернистый бетон на основе вторичных продуктов сжигания угля // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №4. С. 11-14.

6. Низина Т.А., Селяев В.П., Балыков А.С., Коровкин Д.И., Володин В.В. Высоконаполненные мелкозернистые бетоны на техногенном заполнителе // Сборник научных трудов РААСН. 2017. Т. 2. С. 271-275. DOI:10.22337/9785432302212-2017-271-275.

7. Кравцов А.В., Евсеева Т.М., Дубровина Ю.Ю., Цыбакин С.В. Математическое моделирование составов мелкозернистых бетонов с использованием техногенных отходов медеплавильного производства // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №6. С. 50-55.

8. Скрипникова Н.К., Шеховцев В.В., Григорьевская Д.К., Семеновых М.А., Юрьев И.Ю. Мелкозернистый бетон с использованием отходов металлургии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. №2. 185-191. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-185-191.

9. Балыков А.С., Низина Т.А., Коровкин Д.И., Володин В.В., Карабанов М.О. Модифицированные мелкозернистые бетоны из высоконаполненных самоуплотняющихся смесей, содержащих мелкий природный кварцевый песок // Огарев-ONLINE. 2020. №3. С. 1-8.

10. Ращупкина М.А., Березкина Ю.В., Гутарева Н.А., Обадьянов А.В. Эффективность использования мелких песков Сурей-Юганского месторождения Ханты-Мансийского Автономного округа – Югры при производстве мелкозернистых бетонов // Сб. трудов. Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России. СибАДИ. Омск. 2012. С. 187-191.

11. Буйко О.В., Бирицевский В.А., Тимошкин В.С., Будилко И.С. Анализ применения загрязненного заполнителя в мелкозернистом бетоне // Пользуновский альманах. 2020. №2. Т. 1. С. 39-41.

12. Буренина О.Н., Саввинова М.Е., Андреева А.В. Исследование физико-механических свойств модифицированного мелкозернистого бетона из местного сырья Республики Саха (Якутия) // Вестник ВСГУТУ. 2018. №1. С. 25-29.

13. Харченко А.И., Алексеев В.А., Харченко И.Я., Баженов Д.А. Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе композиционных вяжущих // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 3. С. 322-331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331.

14. Рахимбаев Ш.М., Тольпина Н.М., Тольпин Д.А. Сравнительная стойкость бетона с заполнителями и наполнителями разного состава // Известия вузов. Строительство. 2018. №10. С. 13-21. DOI 10.32683/0536-1052-2018-718-10-13-21.

15. Кононова О.В., Черепов В.Д., Солдатова Е.А. Композиционные материалы на основе модифицированных отсеков дробления карбонатных пород // Известия КазГАСУ. 2011. №1. С. 165-171.

16. Казаков Н.П., Кадоркин Д.А. Результаты лабораторных исследований влияния вредных примесей и минеральных добавок на прочность бетона // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. 2019. №4. С. 200-204.

17. Мандрыгина А.А., Шаманов В.А. Прочностные характеристики мелкозернистого и тяжелого бетона, армированного базальтовой фиброй // Инженерный вестник Дона. 2019. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/5958.

18. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Чамурлиев М.Ю. Применение полипропиленовой микрофибры в технологии геоплимерного мелкозернистого бетона // Инженерный вестник Дона. 2018. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5024.

19. Карпиков Е.Г., Янченко В.С., Королева Е.Л., Семичев С.М., Новикова В.И., Патугин А.С. Экстремальное моделирование оптимального состава и содержание микронаполнителя в бетоне // Строительные материалы. 2015. №11. С. 9-12.



20. Суперпластификаторы Полипласт. // URL: polyplastug.ru/superplstifikator/.
21. ООО «Институт промышленной экологии». // URL: industrialecology.ru.

References

1. Bumaga A.I., Bratchun V.I., Konopatskiy E.V. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016. Т. 12. №2. pp. 91-98.
2. Voznesenskiy V.A., Lyashenko T.V., Dovgan' A.D. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2007. Т. 3. №1. pp. 5-15.
3. Nizina T.A., Balykov A.S. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. 2016. №2. pp. 13-25.
4. Eroshkina E.A., Korovkin M.O., Sadenko S.M., Kir'yanova A.A. *PGUAS Bulletin: constraction, science and education*. 2020. №2. pp. 27-33.
5. Buravchuk N.I., Kondyurin A.M., Gur'yanova O.V. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2012. №4. pp. 11-14.
6. Nizina T.A., Selyaev V.P., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin V.V. *Sbornik nauchnykh trudov RAASN*. 2017. Т. 2. pp. 271-275. DOI: 10.22337/9785432302212-2017-271-275.
7. Kravtsov A.V., Evseeva T.M., Dubrovina Yu.Yu., Tsybakin S.V. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017. №6. pp. 50-55.
8. Skripnikova N.K., Shekhovtsev V.V., Grigorevskaya D.K., Semenovyykh M.A., Yur'ev I.Yu. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2019. Т. 21. №2. pp. 185-191. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-185-191.
9. Balykov A.S., Nizina T.A., Korovkin D.I., Volodin V.V., Karabanov M.O. *Ogarev-ONLINE*. 2020. №3. pp. 1-8.
10. Rashchupkina M.A., Berezkina Yu.V., Gutareva N.A., Obad'yanov A.V. *Sb. trudov. Orientirovannye fundamental'nye i prikladnye issledovaniya* –

osnova modernizatsii i innovatsionnogo razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo i dorozhno-transportnogo kompleksov Rossii. SibADI. Omsk. 2012. pp. 187-191.

11. Buyko O.V., Biritsevskiy V.A., Timoshkin V.S., Budilko I.S. Pol'zunovskiy al'manakh. 2020. №2. T. 1. pp. 39-41.

12. Burenina O.N., Savvinova M.E., Andreeva A.V. Vestnik VSGUTU. 2018. №1. pp. 25-29.

13. Kharchenko A.I., Alekseev V.A., Kharchenko I.Ya., Bazhenov D.A. Vestnik MGSU. 2019. T. 14. Vyp. 3. pp. 322-331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331.

14. Rakhimbaev Sh.M., Tolypina N.M., Tolypin D.A. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2018. №10. pp. 13-21. DOI 10.32683/0536-1052-2018-718-10-13-21.

15. Kononova O.V., Cherepov V.D., Soldatova E.A. Izvestiya KazGASU. 2011. №1. pp. 165-171.

16. Kazakov N.P., Kadorkin D.A. Nauchnye problemy material'no-tekhnicheskogo obespecheniya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii. 2019. №4. pp. 200-204.

17. Mandrygina A.A., Shamanov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/5958.

18. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Chamurliev M.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5024.

19. Karpikov E.G., Yanchenko V.S., Koroleva E.L., Semichev S.M., Novikova V.I., Patugin A.S. Stroitel'nye materialy. 2015. №11. pp. 9-12.

20. Superplastifikatory Poliplast. [Superplasticizers Polyplast]. URL: polyplastug.ru/superplstifikator.

21. ООО «Институт промышленной экологии». [«Institute of Industrial Ecology» LLC]. URL: industrialecology.ru.