

## Разработка состава мелкозернистого бетона на некондиционных компонентах с применением комплексной модифицирующей добавки

*П.Э. Соколов, Д.П. Землянский, М.А. Власов, В.С. Леонтьев, В.И.*

*Каранузов*

*Волгоградский государственный технический университет*

**Аннотация:** В статье рассматривается возможность использования некондиционных сырьевых материалов для изготовления мелкозернистого бетона с помощью многокомпонентной комплексной добавки. Использование тонких песков в качестве сырья для мелкозернистых бетонов является актуальным для многих регионов России, ввиду отсутствия песков с необходимым модулем крупности. Рассмотрен вопрос совместного использования тонкого песка и лежалого цемента, с целью уменьшения затрат (потерь), расширения ассортимента материалов для малоэтажного строительства и решения задач энерго- и ресурсосбережения. Для достижения поставленной цели была использована многокомпонентная комплексная добавка. Исследования были проведены в соответствии с принятым планом дробного факторного эксперимента. Полученные результаты исследований подверглись предварительному анализу и обработке, в результате чего были получены зависимости прочностных свойств от варьирующих факторов. Полученные зависимости позволили подобрать оптимальные дозировки компонентов комплексной модифицирующей добавки, для повышения прочностных показателей мелкозернистого бетона на некондиционных материалах. Установлено, что использование оптимальных расходов компонентов комплексной добавки позволяет увеличить прочностные показатели на 25-30%, по сравнению с контрольным составом.

**Ключевые слова:** мелкозернистый бетон, тонкий песок, лежалый цемент, комплексная добавка, дробный факторный эксперимент, прочность.

Современные тенденции в строительстве направлены на разработку технологий обеспечивающих энерго- и ресурсосбережение, а также эффективного использования сырья и материалов. Поэтому рациональное использование природных нерудных материалов и ресурсосбережение в целом является актуальной задачей при производстве бетонных и железобетонных изделий и конструкций [1]. К таким материалам можно отнести в частности тонкие пески, имеющие модуль крупности менее 1,0, применение которых затруднено или невозможно ввиду присущих им свойств. Наряду с этим на производстве периодически, по независимым от него причинам возникают «отходы» в виде лежалого цемента. Как правило, такого рода некондиционные материалы поступают на полигоны твердых бытовых

---

отходов, либо их пытаются использовать в качестве местных материалов. Оценить объемы таких некондиционных материалов достаточно сложно. Современные методы и пути использования или утилизации некондиционных материалов не позволяют в полном объеме решить проблему их использования и защиты окружающей среды. В связи с этим поиск новых эффективных методов использования некондиционных материалов является актуальной задачей. Одним из путей решения данной проблемы является использование многокомпонентных комплексных добавок для получения местных мелкозернистых бетонов.

Целью данной работы является разработка состава мелкозернистого бетона на тонком песке и некондиционном (лежалом) цементе модифицированного комплексной органоминеральной добавкой, позволяющей расширить ассортимент материалов для малоэтажного строительства.

Научная новизна работы заключается в том, что повышение эффективности мелкозернистого бетона на некондиционных материалах осуществляется за счет модификации его свойств и структуры разработанной многокомпонентной добавкой.

В качестве устойчивого вектора развития производства товарного и сборного бетона и железобетона, наблюдающегося в течение последних 15-20 лет, является широкое использование комплексных модифицирующих добавок, как по назначению, так и по количественному составу [2].

Как правило, основным и наиболее изученным способом «возвращения» активности цементу является его повторный помол.

На региональном уровне в строительной отрасли наиболее перспективными направлениями развития являются снижение себестоимости изделий, при сохранении требуемых качеств за счет использования местных материалов, отходов и некондиционных материалов [3], уменьшения материалоемкости и энергоемкости производства [4-6]. Одним из возможных

---

решений этого вопроса является разработка рецептур, позволяющих получать мелкозернистые бетоны на некондиционных материалах, за счет применения многокомпонентных добавок.

Производство бетона, в том числе мелкозернистого, требует большого количества заполнителей. Однако существующие запасы качественного сырья не всегда позволяют обеспечить производство необходимыми объемами требуемых материалов, ввиду того, что местные пески по модулю крупности относятся к мелким и даже тонким [7, 8]. Поэтому такие пески не могут использоваться без дополнительного введения крупных фракций [9], что ведет к увеличению их стоимости. Работы, направленные на изучение возможности использования мелких и тонких песков в качестве заполнителей для бетонов ведутся как в России [10], так и за рубежом [11-13].

Портландцемент и его разновидности являются основными вяжущими веществами применяемыми в строительстве. Их производство и эффективное использование являются необходимым условием получения качественных и технологичных бетонов и железобетонных изделий [14]. Однако, не редки случаи, когда по различным причинам, порой не зависящим от персонала предприятия, портландцемент теряет большую часть активности и свойств [15]. В этом случае возникает вопрос о возможности использования такого вяжущего.

Среди наиболее приемлемых вариантов использования лежалого цемента можно выделить его активацию и условно разделить ее на три базовых способа: механическая, физическая и химическая [16-18]. Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки. Критерием для выбора способа активации лежалого цемента в данной работе послужили – широкое распространение химических добавок и отсутствие необходимости в дополнительном оборудовании для активации.

---

В качестве исходных материалов в работе использовался лежалый цемент марки ПЦ 500 ДОН. На момент проведения исследования вяжущее обладало следующими прочностными характеристиками: предел прочности при сжатии – 24,05 МПа; предел прочности при изгибе – 3,79 МПа. Мелкий заполнитель – тонкий кварцевый песок, с модулем крупности  $M_k$  менее 1,0 и насыпной плотностью – 1489 кг/м<sup>3</sup>.

Для регулирования свойств мелкозернистой бетонной смеси и мелкозернистого бетона применялась комплексная многокомпонентная органоминеральная добавка, состоящая из семи следующих компонентов: тонкодисперсный наполнитель – микрокремнезем конденсированный МК-85, насыпная плотность – 155,8 кг/м<sup>3</sup>, массовая доля диоксида кремнезема (SiO<sub>2</sub>) не менее 85%; суперпластификатор – Sika ViscoCrete-200, в виде водной композиции модифицированных поликарбоксилатных эфиров; суперпластификатор – Sikament 101, в виде водного раствора нафталинсульфанатов; уплотняющая добавка – SikaPaver HC-4, в виде смеси поверхностно-активных веществ; стабилизирующая и пластифицирующая добавка SikaTard M-20, в виде смеси низкомолекулярных моно- и олигосахаридов с сурфактантами; воздухововлекающая добавка SikaControl-95Aer; эфир целлюлозы – RCL-70, для регулирования технологических свойств бетонной смеси. Значения уровней факторов приведены в табл. 1.

Материалы с приведенными выше характеристиками были использованы для подбора контрольного состава мелкозернистого бетона. На основании полученного контрольного состава назначались составы с добавками в соответствии с принятым планом эксперимента. Сухие компоненты мелкозернистой бетонной смеси тщательно перемешивались между собой и затворялись водой с растворенными в ней добавками в жидком виде. Приготовленная и тщательно перемешанная мелкозернистая бетонная смесь использовалась для формирования образцов-балочек размерами

---

40×40×160 мм, которые твердели и набирали прочность в воде. В возрасте 28 суток производилось определение предела прочности при сжатии – функция отклика (Y1) и предела прочности на растяжение при изгибе – функция отклика (Y2), в соответствии с действующими нормативными документами. Определение прочностных характеристик серий готовых образцов проводились на испытательной машине МИИ-100 – определение предела прочности при изгибе, а также гидравлическом прессе ПИ-100-1-1-4 – определение предела прочности при сжатии.

Таблица № 1

Исходные данные эксперимента

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов, %			Интервал варьирования
		нижний (-1)	верхний (+1)	основной	
Микрокремнезем	X1	10	20	15	5
Sika ViscoCrete-200	X2	0,3	2,0	1,15	0,85
Sikament 101	X3	0,6	1,5	1,05	0,45
SikaPaver HC-4	X4	0,2	0,5	0,35	0,15
SikaTard M-20	X5	0,1	1,0	0,55	0,45
SikaControl-95Aer	X6	0,1	2,0	1,05	0,95
RCL-70	X7	0,04	0,06	0,05	0,01

Эффективность любого плана эксперимента в основном определяется количеством опытов. Сравнивая с этой точки зрения полный факторный эксперимент  $2^n$  с дробным факторным экспериментом (ДФЭ)  $2^{n-k}$  последний позволяет существенно сократить количество опытов. При числе факторов 5 и более желательно использовать ДФЭ [19]. Для проведения исследования был принят план дробного факторного эксперимента вида -  $2^{7-3}$ . В табл. 2 приведен второй блок (фрагмент) плана в натуральных единицах измерения и его результаты.

Испытания проводились в случайном порядке, что позволяет гарантировать соответствие модели определенным статистическим утверждениям и снизить влияние факторов, не включенных в исследование. План эксперимента разбит на два блока, в каждый из которых добавлено по одной центральной точке. Блоки использовались с целью уменьшения вероятности ошибки регистрации данных.

Таблица № 2

План и результаты проведения эксперимента (фрагмент – блок 2)

№ п/п	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y1	Y2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	15,0	1,15	1,05	0,35	0,55	1,05	0,05	31,55	4,17
2	10,0	2,00	0,60	0,20	1,00	2,00	0,04	2,81	1,39
3	20,0	0,30	1,50	0,20	0,10	2,00	0,04	12,57	3,74
4	20,0	2,00	0,60	0,50	0,10	0,10	0,04	14,49	3,97
5	20,0	0,30	0,60	0,20	1,00	0,10	0,06	5,24	3,35
6	10,0	0,30	0,60	0,50	0,10	2,00	0,06	22,36	4,29
7	10,0	2,00	1,50	0,20	0,10	0,10	0,06	19,56	4,11
8	10,0	0,30	1,50	0,50	1,00	0,10	0,04	1,51	1,09
9	20,0	2,00	1,50	0,50	1,00	2,00	0,06	2,04	1,22

Произведем расчет описательных характеристик и проанализируем полученные результаты исследований с помощью коробчатых диаграмм (см. рис. 1).

Для предела прочности при сжатии исследованного мелкозернистого бетона с комплексной многокомпонентной добавкой минимальное значение составляет – 1,29 МПа, нижний квартиль – 2,32 МПа, медиана – 13,53 МПа, среднее значение – 13,21 МПа, верхний квартиль – 21,66 МПа и максимальное значение – 31,55 МПа. Точками на обеих диаграммах нанесены полученные значения пределов прочности при сжатии и при изгибе соответственно. Сплошной горизонтальной линией коричневого цвета отмечено значение предела прочности при сжатии, полученное у

контрольного состава – 24,05 МПа. Таким образом, для четырех составов получено значение предела прочности при сжатии, превышающее значение для контрольного состава. У данной функции отклика имеет место сдвиг распределения в положительную сторону, ввиду того, что верхний «ус» длиннее нижнего.

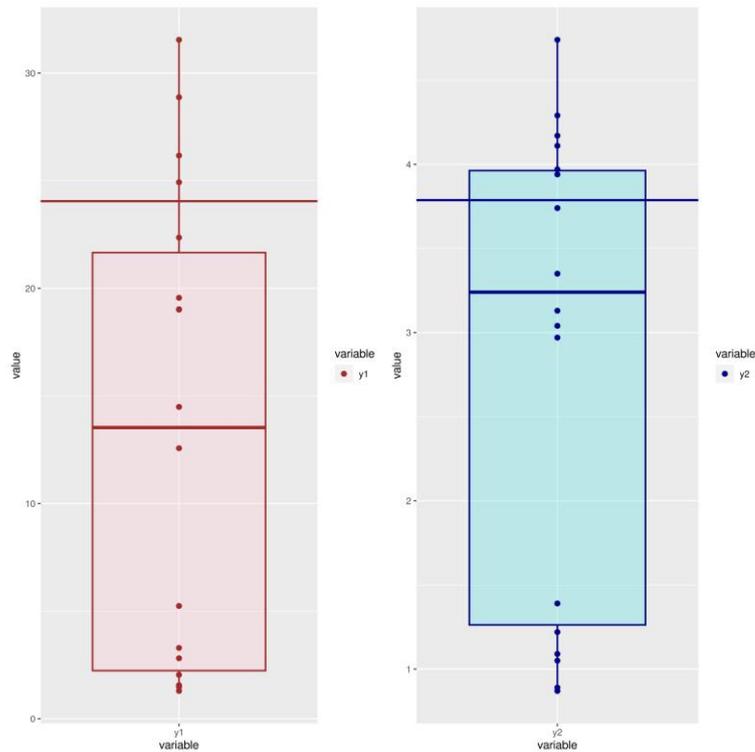


Рис. 1. – Коробчатые диаграммы для функций отклика

Для функции отклика – предел прочности при изгибе минимальное полученное значение составляет – 0,87 МПа, нижний квартиль соответствует – 1,26 МПа, медиана – 3,24 МПа, среднее значение – 2,87 МПа, верхний квартиль – 3,96 МПа и максимальное значение – 4,74 МПа. Сплошная горизонтальная линия синего цвета указано местоположение предела прочности при изгибе, полученное для контрольного состава – 3,79 МПа. У данной функции отклика, аналогично предыдущей имеет место сдвиг распределения в положительную сторону. Выбросы на диаграммах отсутствуют.

На рис. 2 приведены диаграммы ядерной функции плотности, которые отображают распределение значений непрерывных переменных функций отклика.

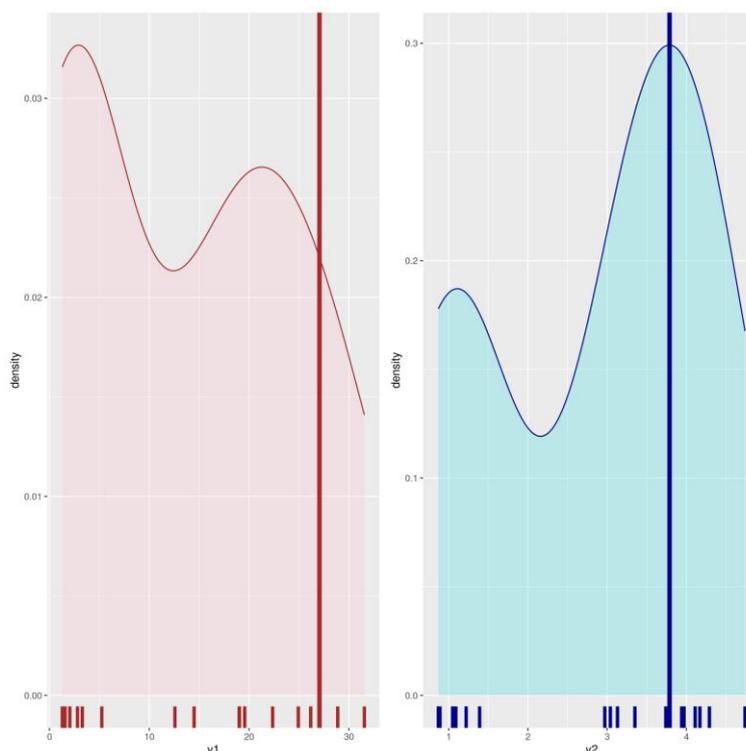


Рис. 2. – Диаграммы ядерной функции плотности переменных отклика

В нижней части диаграмм расположен график-щетка, который показывает реальные значения для каждой функции отклика, наложенные на прямую. На каждую диаграмму нанесена вертикальная линия, соответствующая значениям для контрольного состава мелкозернистого бетона.

Изобразим в графическом и числовом виде коэффициенты корреляции с целью выяснения тесноты связей для полученных экспериментальных данных на рис. 3, с помощью коррелограммы.

Как видно из рис. 3 высокая положительная сила связи имеет место между факторами  $Y_1$  и  $Y_2$ , что характерно для большинства бетонов, в т.ч. мелкозернистых. Высокая отрицательная сила связи отмечена между фактором  $X_5$  и откликами  $Y_1$  и  $Y_2$ . Очень слабая положительная связь

отмечена между следующими переменными: X4 и Y1; X1 и Y2; X1 и Y1; X7 и Y2; X7 и Y1; X6 и Y1. Очень слабая отрицательная связь отмечается между следующими переменными: X4 и Y2; X2 и Y2; X2 и Y1; X3 и Y2; X3 и Y1. Между остальными переменными какой-либо значимой связи не обнаружено.

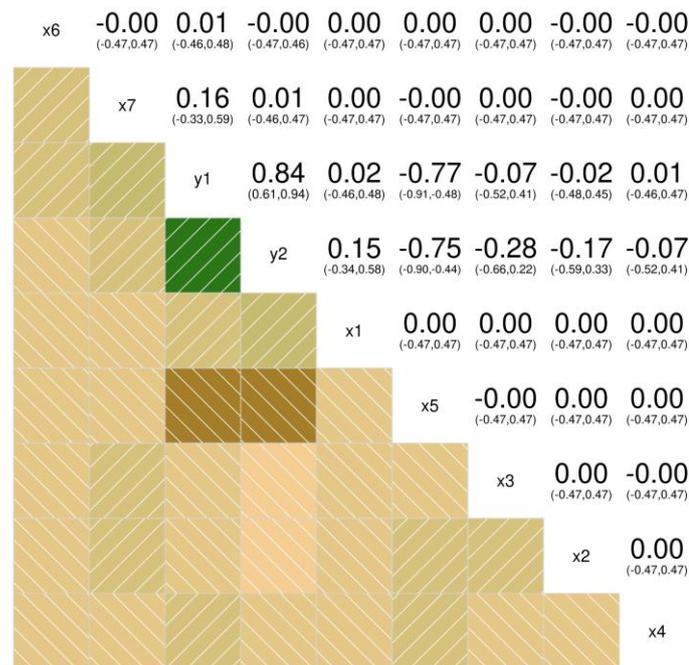


Рис. 3. – Диаграммы ядерной функции плотности переменных отклика

Сравнение различных вариантов моделей позволило получить модель, которая наиболее полно отражает влияние входных переменных и их взаимодействий на исследованные функции отклика. В таблице 3 представлены результаты анализа плана эксперимента для функций отклика.

Используем значения вероятности, приведенные в табл. 3, для определения значимости влияний для отклика – предел прочности при сжатии мелкозернистого бетона. При  $\alpha$  менее 0,05 основные влияния – расход суперпластификатора SikaMent 101 (X3), стабилизирующей добавки SikaTard M-20 (X5) и эфира целлюлозы (X7) являются статистически значимыми. Помимо этого статистически значимыми являются двойные

взаимодействия расходов микрокремнезема (X1) и эфира целлюлозы (X7), расходов суперпластификатора ViscoCrete-200 (X2) и уплотняющей добавки SikaPaver HC-4 (X4), а также тройное взаимодействие расходов микрокремнезема (X1), суперпластификатора ViscoCrete-200 (X2) и уплотняющей добавки SikaPaver HC-4 (X4), поскольку соответствующие им значения вероятности также меньше 0,05 (см. табл. 3).

Таблица № 3

Оцениваемые влияния и коэффициенты

Факторы и взаимодействия	Эффект	Коэффициент	T-критерий Стьюдента	P-значение
Функция отклика Y1				
Константа		11,083	48,33	0,000
X3	-1,517	-0,786	-3,43	0,008
X5	-17,364	-8,682	-37,86	0,000
X7	3,666	1,833	7,99	0,000
X1X7	3,019	1,509	6,58	0,000
X2X4	-3,314	-1,657	-7,22	0,000
X1X2X4	-4,691	-2,346	-3,41	0,008
Функция отклика Y2				
Константа		4,455	11,31	0,000
X3	-0,786	-0,393	-2,82	0,014
X5	-2,141	-1,071	-7,69	0,000
X1X5	0,666	0,333	2,39	0,033
X1X2X3X5	-3,561	-1,781	-4,26	0,001

Для функции отклика – предел прочности при изгибе (Y2) мелкозернистого бетона на некондиционных компонентах с комплексной органо-минеральной добавкой, при  $\alpha$  менее 0,05 значимыми являются факторы X3, X5, двойное взаимодействие X1X5 и четверное взаимодействие X1X3X3X5. Обращает на себя внимание тот факт, что факторы X3 и X5 имеют место в обеих функциях отклика. Факторы X1, X2 и X4 имеют место

только во взаимодействиях, а фактор X6 не имеет статистической значимости в обеих функциях отклика. Таким образом, фактором X6 можно пренебречь.

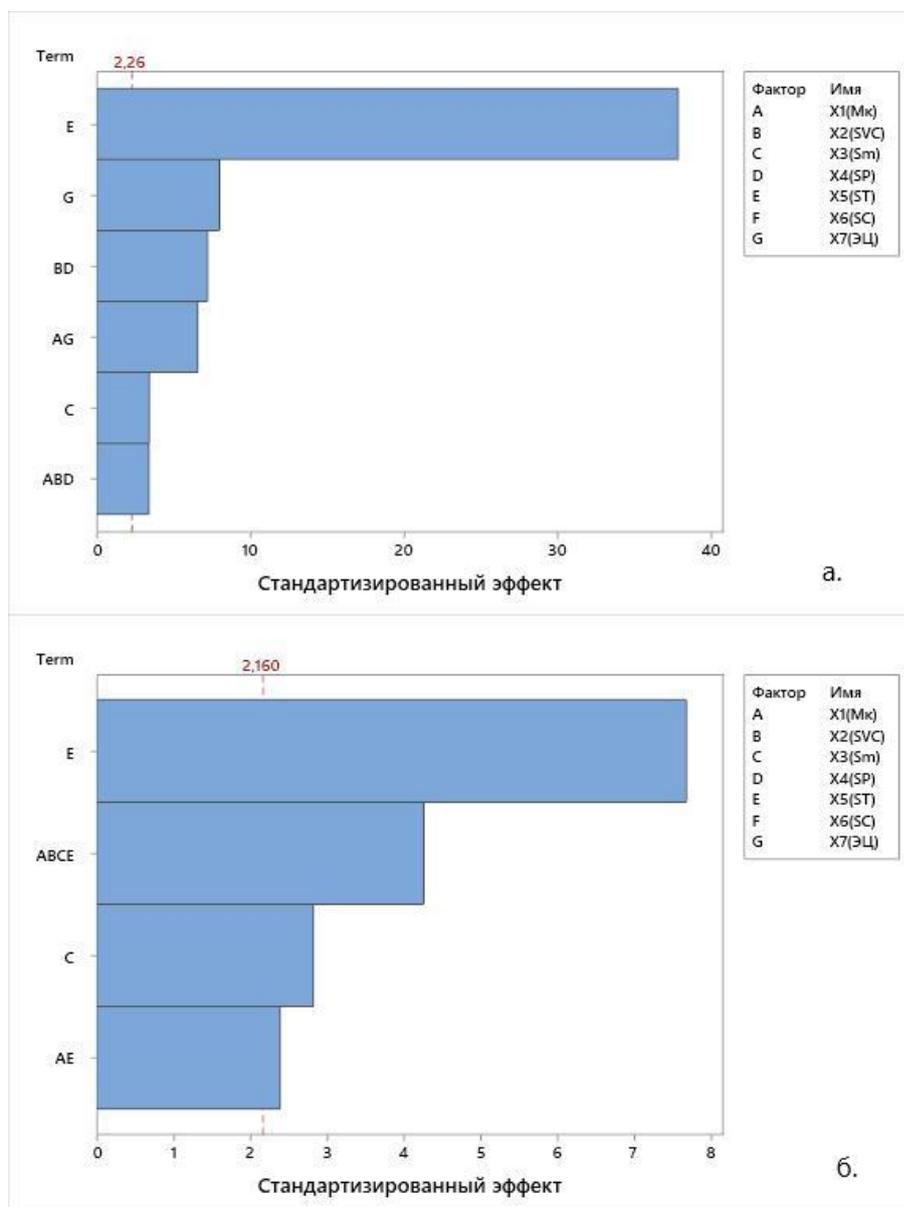


Рис. 4. – Оценка влияния факторов по закону Парето: а – для предела прочности при сжатии; б – для предела прочности при изгибе

Оценим графически значимость приведенных выше факторов для соответствующих функций отклика. На рис. 4 представлены гистограммы Парето, отображающие абсолютные значения влияния факторов и их взаимодействий. Красной линией указана граница соответствующая табличному значению критерия Стьюдента. Все факторы и их

взаимодействия являются значимыми, если значения критерия Стьюдента пересекают эту линию, т.е. превышают табличные значения.

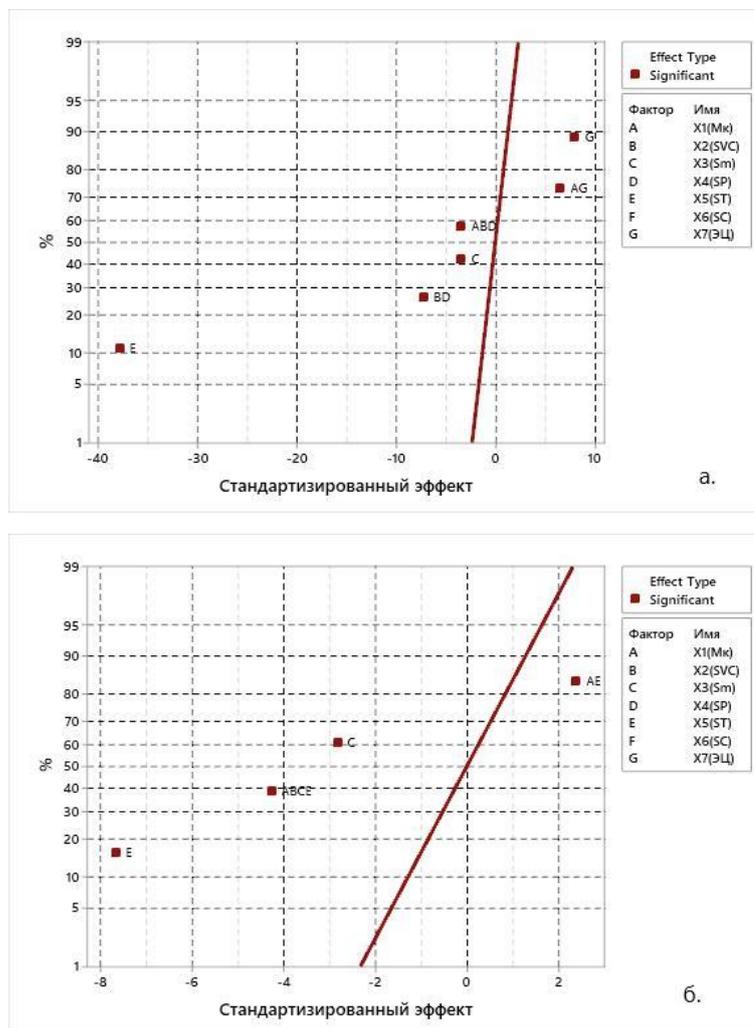


Рис. 5. – Схема для определения высоты падения центра тяжести

Оценку влияния факторов и их взаимодействий можно произвести по нормальному закону распределения, которые представлены на рис. 5 для обеих функций отклика. Красные квадратики, расположенные справа от красной линии, имеют положительный знак, а слева – отрицательный.

По результатам обработки данных, и в соответствии методикой приведенной в [20] получены уравнения регрессии для пределов прочности при сжатии – формула (1) и при изгибе – формула (2).

$$R_{сж} = 11,08 - 0,79X3 - 8,68X5 + 1,83X7 + 1,51X1X7 - 1,66X2X4 - 2,35X1X2X4 + \varepsilon, \quad (1)$$

$$R_{сж} = 4,46 - 0,39X3 - 1,07X5 + 0,33X1X5 - 1,78X1X2X3X5 + \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  - отклонение наблюдаемых значений от модельных, сумма которых, равна: 0,9173 – для предела прочности при сжатии и 0,5571 – для предела прочности при изгибе.

Оценить адекватность моделей можно на основании коэффициента детерминации  $R^2$ , который равен 99,63% - для предела прочности при сжатии и 87,49% - для предела прочности при изгибе. Таким образом, предел прочности при сжатии практически полностью зависит от исследуемых факторов, следовательно, характер связи можно оценить как очень сильный. Для предела прочности при изгибе это означает, что изменение этого показателя у мелкозернистого бетона на некондиционных материалах с комплексной добавкой на 87,49% зависит от исследуемых факторов, а на долю других факторов приходится 12,51% изменения этого показателя. Поэтому характер связи можно оценить как сильный.

Проводя анализ формулы (1) необходимо отметить, что на величину предела прочности при сжатии мелкозернистого бетона на некондиционных материалах с комплексной модифицирующей добавкой значимые факторы и их взаимодействия оказывают различные влияния, которые колеблются на порядок, от 0,78 до 8,68. Наименьшее влияние оказывает расход суперпластификатора Sikament 101. Больше в 2-3 раза влияние оказывают расход эфира целлюлозы, двойные взаимодействия расходов микрокремнезема и эфира целлюлозы, а также взаимодействие суперпластификатора ViscoCrete и уплотняющей добавки SikaPaver и наконец, тройное взаимодействие расходов микрокремнезема, суперпластификатора ViscoCrete и уплотняющей добавки.

Повышению предела прочности при сжатии способствует увеличение расхода эфира целлюлозы и увеличение величины двойного взаимодействия расхода микрокремнезема и эфира целлюлозы. Напротив, увеличение остальных факторов и взаимодействий способствует снижению предела

---

прочности при сжатии. Отчасти это можно объяснить наличием моно- и олигосахаров в добавке SikaTard, что замедляет процессы гидратации и набора прочности, а также большим расходом микрокремнезема, эффективность которого используется не полностью, ввиду низкой активности лежалого цемента.

Как видно из формулы (2) значимые факторы и их взаимодействия оказывают на величину предела прочности при изгибе относительно небольшое влияние. Незначительно влияют на предел прочности при изгибе расход суперпластификатора Sikament и двойное взаимодействие расхода микрокремнезема на расход стабилизирующей добавки SikaTard. Несколько большее влияние оказывает фактор расхода добавки SikaTard и четверное взаимодействие расходов микрокремнезема, суперпластификатора ViscoCrete, суперпластификатора Sikament и стабилизирующей добавки SikaTard. Общими для обеих уравнений является наличие в каждом из них факторов расхода суперпластификатора Sikament и расход стабилизирующей добавки SikaTard.

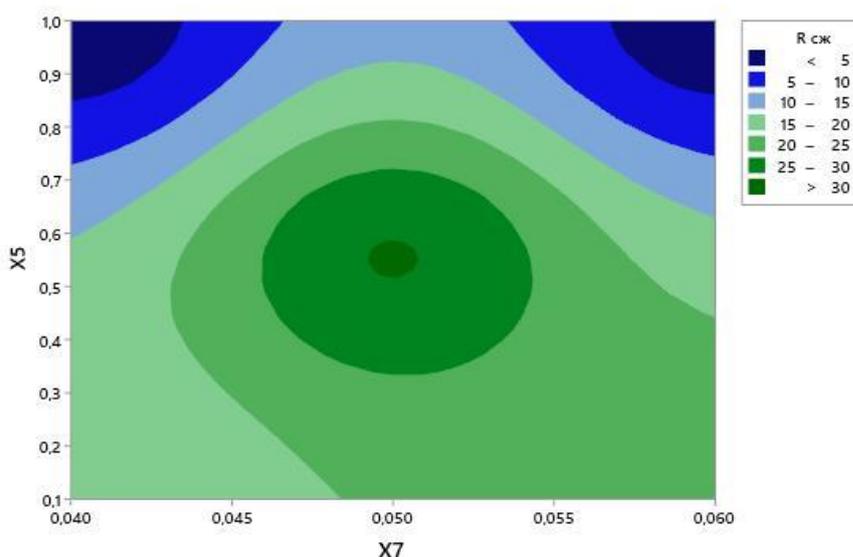


Рис. 6. – Схема для определения высоты падения центра тяжести

Построим контурный график (см. рис. 6) и график поверхности (см. рис. 7) зависимости функции отклика – предел прочности при сжатии от факторов расход стабилизирующей добавки и расход эфира целлюлозы в качестве примера. Как видно из контурного графика, максимальные значения предела прочности при сжатии достигаются при расходах материалов соответствующих значениям центральных точек плана. Максимальный расход добавки X5, при минимальном и максимальном расходе добавки X7 приводит к резкому снижению предела прочности при сжатии.

Полученная поверхность близка по своей форме к ковбойской шляпе (cowboy hat), с максимальными значениями предела прочности при сжатии соответствующим центральным точкам плана эксперимента.

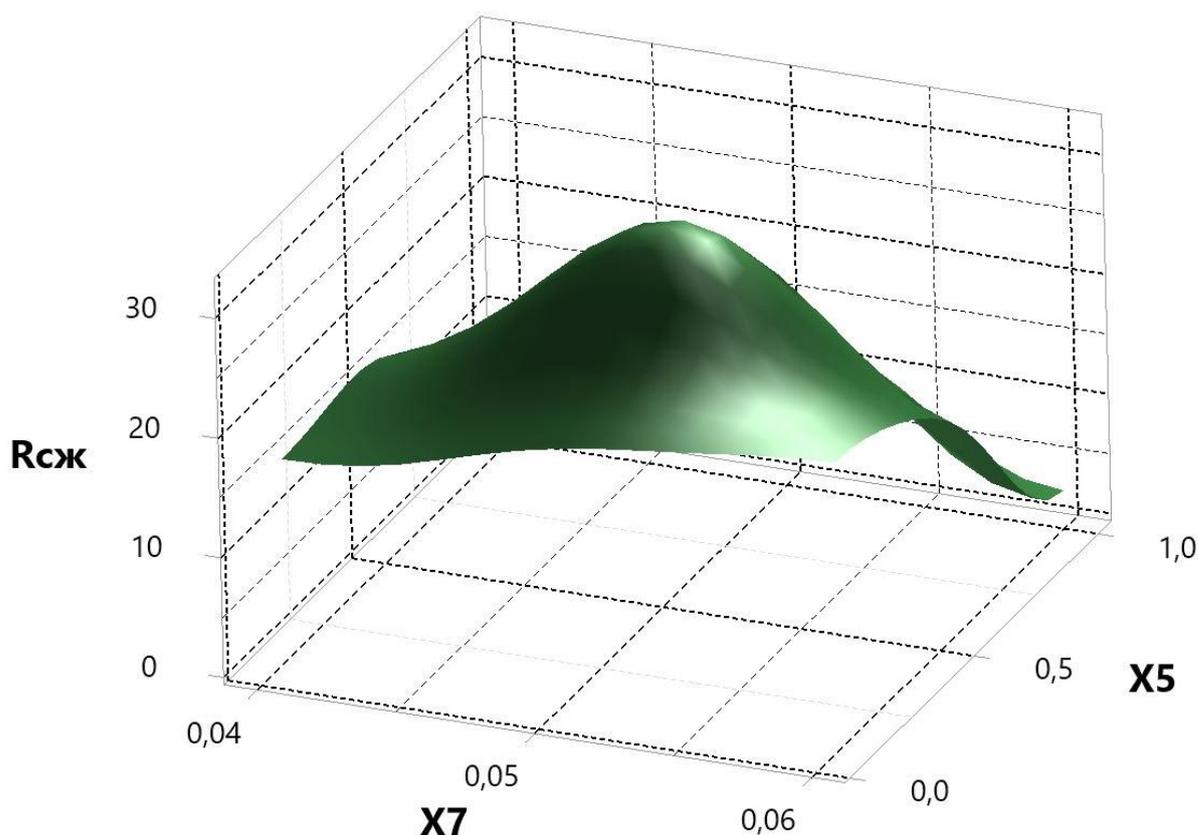


Рис. 7. – Схема для определения высоты падения центра тяжести  
Наибольший предел прочности при сжатии получен у состава №1 (случайный порядок) – 31,55 МПа. Данный состав соответствует центральной

точке второго блока плана эксперимента. Таким образом, прирост предела прочности наилучшего состава по сравнению с контрольным составляет – 30,35%, или 7,3 МПа. Наибольший предел прочности при изгибе получен у состава № 12 (случайный порядок) – 4,74 МПа. Данный состав соответствует центральной точке первого блока плана эксперимента. Прирост предела прочности при изгибе наилучшего состава по сравнению с контрольным составом – 25,15%, или 0,95 МПа.

Анализ уравнений регрессии показал следующее:

- среди составляющих многокомпонентной добавки выявлен один не значимый компонент - воздухововлекающая добавка SikaControl-95Aer;
- основными значимыми факторами, оказывающими влияние на прочностные показатели исследованного мелкозернистого бетона являются: суперпластификатор Sikament 101, стабилизирующая добавка SikaTard M-20 и эфир целлюлозы;
- остальные составляющие комплексной добавки оказывают влияние на прочностные показатели мелкозернистого бетона, на некондиционных компонентах присутствуя лишь в составе взаимодействий факторов.

Анализ полученных результатов позволил установить, что использование комплексной добавки для получения мелкозернистого бетона на некондиционных компонентах позволяет увеличить прочностные показатели на 25-30%.

Как следует из результатов проведенных исследований, вид и расход одной и той же добавки в составе комплексной может по-разному оказывать влияние на показатели прочности мелкозернистого бетона на некондиционных материалах. Так, при изменении расходов стабилизирующей добавки и эфира целлюлозы, показатели прочности мелкозернистого бетона могут, как увеличиваться, так и уменьшаться. Таким образом, можно говорить, что само по себе изменение расхода одной добавки

---

в составе комплексной не является достаточным условием для повышения прочностных показателей мелкозернистого бетона. При выборе добавок для разработки комплексной добавки и при назначении их расходов, необходимо исходить из поставленных задач и комплексно рассматривать влияние различных факторов.

На основании полученных результатов можно рекомендовать корректировать установленный производителем расход добавок микрокремнезема и суперпластификаторов, учитывая активность применяемого лежалого цемента.

### Литература

1. Шляхова Е.А., Холостова А.И. К вопросу повышения качества мелкозернистых бетонов на мелких песках // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2110/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2110/).

2. Иващенко Ю.Г., Зинченко С.М. Эффективный органоминеральный комплекс для модифицирования цементных композиций // Вестник Саратовского государственного технического университета. Т. 2, №1(55). 2011. С. 114-119.

3. Кузнецова Н.В., Дубровин А.И., Езерский В.А. Исследование влияния водоцементного отношения на прочность мелкозернистого бетона с заполнителем из гранулированного доменного шлака // Строительные материалы. 2018. №6. С. 20-23.

4. Фаликман В.Р., Сорокин В.Ю. Пути расширения сырьевой базы и снижение материалоемкости производства реактивных порошковых бетонов // Вестник НИЦ Строительство. 2022. №1(32). С. 82-94.

5. Крылов С.Б. Энерго- и ресурсосберегающие технологии с использованием солнечной энергии в производстве строительных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №8. С. 9-15.

6. Сейдахметова М.Е., Амангельды С.Б., Худякова Т.М. Один из путей ресурсо- и энергосбережения при производстве цемента // Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова. 2019. №3 (38). С. 25-29.

7. Соколов П.Э., Вовко В.В., Поляков В.Г., Лукьяница С.В. Анализ основных физико-механических свойств мелкозернистого фибробетона на тонком песке, модифицированного комплексной добавкой // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 114-128.

8. Соколов П.Э. Повышение эффективности мелкозернистого фибробетона на тонком песке с помощью комплексной добавки // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. №5. URL: [esj.today/issue-5-2023.html](http://esj.today/issue-5-2023.html)

9. Ерзовский В.А., Кузнецова Н.В., Дубровин А.Н. Улучшение свойств мелкозернистого бетона с помощью комплексных минеральных добавок // Строительные материалы. 2015. №6. С. 4-7.

10. Романенко И.И., Петровнина И.Н., Романенко М.И. Исследование бетонов полусухого прессования, изготовленных на сверхтонких песках местного карьера // Инженерный вестник Дона. 2019. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5788/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5788/).

11. Dolage D.A.R., Dias M.G.S., Ariyawansa C.T. Offshore sand as a fine aggregate for concrete production // British Journal of Applied Science & Technology, 2013. №3 (4), pp. 813-825.

12. Binici H., Shah T., Aksogan O., Kaplan H. Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates // Journal of Materials Processing Technology, 2008. №208 (1-3), pp. 299-308.

13. Siddique R., Noumowe A. Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete // Resources, Conservation and Recycling, 2008. №53 (1-2), pp. 27-35.

---

14. Саламанова М.Ш., Исмаилова З.Х., Дакаев Х.С., Хатуева С.- З.А. К вопросу о ресурсосбережении в цементной промышленности // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Региональный строительный комплекс: инвестиционная политика и реализация ГЧП». 2019. г. Грозный. – С. 435-445.
15. Шлыков Н.Д. Хранение и восстановление активности цемента. Инженерный вестник Дона. 2019. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5944/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5944/).
16. Гурьянов Г.А., Клименко Е.А., Васильева О.Ю. Улучшение процесса приготовления и качества бетона на основе анализа способов активации цемента // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2015. №1. С. 23-41.
17. Шведов А.П. Методы активации цементных систем. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2010. №6. С. 90-94.
18. Федюк Р.С., Молчанов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. №4(37). С. 85-99. DOI.org/10.5281/zenodo.2008670.
19. Никишкин А.П., Гуаньшань Ю., Юйхань И. Рекомендации по выбору генерирующих соотношений в планах дробного факторного эксперимента // Вопросы науки. 2022. №2. С. 7-13.
20. Ерещенко Т.В., Михайлова Н.А. Планирование эксперимента: учебно-практическое пособие. Волгоград. ВолгГАСУ, 2014. 78 с.

### References

1. Shlyakhova E.A., Kholostova A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2110/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2110/).
2. Ivashchenko Yu.G., Zinchenko S.M. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. T. 2, №1 (55). 2011. Pp. 114-119.



3. Kuznetsova N.V., Dubrovin A.I., Ezerskiy V.A. Stroitel'nye materialy. 2018. №6. Pp. 20-23.
  4. Falikman V.R., Sorokin V.Yu. Vestnik NITs Stroitel'stvo. 2022. №1 (32). Pp. 82-94.
  5. Krylov S.B. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2017. №8. Pp. 9-15.
  6. Seydakhmetova M.E., Amangel'dy S.B., Khudyakova T.M. Nauchnye trudy YuKGU im. M. Auezova. 2019. №3 (38). Pp. 25-29.
  7. Sokolov P.E., Vovko V.V., Polyakov V.G., Luk'yanitsa S.V. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. 2023. Vyp. 1(90). Pp. 114-128.
  8. Sokolov P.E. Vestnik evraziyskoy nauki. 2023. T. 15. №5. URL: [esj.today/issue-5-2023.html](http://esj.today/issue-5-2023.html).
  9. Erzovskiy V.A., Kuznetsova N.V., Dubrovin A.N. Stroitel'nye materialy. 2015. №6. Pp. 4-7.
  10. Romanenko I.I., Petrovnina I.N., Romanenko M.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5788/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5788/).
  11. Dolage D.A.R., Dias M.G.S., Ariyawansa C.T. British Journal of Applied Science & Technology, 2013. №3 (4), pp. 813-825.
  12. Binici H., Shah T., Aksogan O., Kaplan H. Journal of Materials Processing Technology, 2008. №208 (1-3), pp. 299-308.
  13. Siddique R., Noumowe A. Resources, Conservation and Recycling, 2008. №53 (1-2), pp. 27-35.
  14. Salamanova M.Sh., Ismailova Z.Kh., Dakaev Kh.S., Khatueva S. Z.A. Materialy vsrossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Regional'nyy stroitel'nyy kompleks: investitsionnaya politika i realizatsiya GChP». 2019. g. Groznyy. Pp. 435-445.
-



15. Shlykov N.D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5944/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5944/).
16. Gur'yanov G.A., Klimenko E.A., Vasil'eva O.Yu. Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya. 2015. №1. Pp. 23-41.
17. Shvedov A.P. Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. 2010. №6. Pp. 90-94.
18. Fedyuk R.S., Molchanov A.V., Lesovik V.S. Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU. 2018. №4 (37). Pp. 85-99. DOI.org/10.5281/zenodo.2008670.
19. Nikishkin A.P., Guan'shan' Yu, Yuykhan' I. Voprosy nauki. 2022. №2. S. 7-13.
20. Ereshchenko T.V., Mikhaylova N.A. Planirovanie eksperimenta: uchebno-prakticheskoe posobie [Experiment planning: Educational and practical guide]. Volgograd. VolgGASU, 2014. 78 p.

**Дата поступления: 11.03.2024**

**Дата публикации: 19.04.2024**