

Повышение эффективности мелкозернистого бетона на некондиционных материалах с помощью комплексной добавки

П.Э. Соколов, В.В. Лутиногин, Т.В. Толочек, М.А. Тимуркаев, В.И.

Каранузов

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: В статье приведены результаты исследований эффективности мелкозернистого бетона, изготовленного с использованием некондиционных материалов и комплексной модифицирующей добавкой. Цель работы - оценить влияние многокомпонентной добавки на прочностные характеристики и эффективность бетона. Для этого применен дробный факторный эксперимент с варьированием семи факторов, которыми являлись: микрокремнезем, суперпластификаторы и другие добавки оказывающие влияние, как на свойства мелкозернистой бетонной смеси, так и на свойства мелкозернистого бетона. Основными критериями оценки влияния комплексной модифицирующей добавки были приняты коэффициент конструктивного качества и удельный расход цемента на единицу прочности. Проведенные исследования позволили установить, что оптимальный состав добавки повышает коэффициент конструктивного качества на 29,9% и снижает удельный расход цемента на 24,6% по сравнению с контрольными образцами. Показано, что сбалансированное сочетание добавок улучшает эксплуатационные свойства бетона, способствуя ресурсосбережению и снижению экологической нагрузки.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, некондиционные материалы, комплексная модифицирующая добавка, коэффициент конструктивного качества, удельный расход цемента, математическое планирование эксперимента, ресурсосбережение, прочность при сжатии.

Производство строительных материалов ежегодно требует использование огромного количества природных сырьевых материалов, которое ориентировочно оценивают в 3 млрд. т. Помимо этого в строительной отрасли активно используются различные технические отходы. Огромные объемы используемого природного сырья подталкивают исследователей к разработке и внедрению энерго- и ресурсосберегающих технологий, а также полному и эффективному использованию сырья, материалов и изделий, которое позволит сократить их потребление. Таким образом, рациональное использование строительных материалов и ресурсосбережение являются актуальными задачами при производстве бетонов и изделий из них и позволяют параллельно решать задачи

экологического характера, в т.ч. за счет использования вторичных сырьевых материалов, а также снижения углеродного следа.

Ключевым аспектом стратегии рационального ресурсопользования выступает утилизация материалов, не соответствующих установленным нормативам. В рамках настоящего исследования под некондиционными материалами подразумевается продукция, утратившая соответствие техническим регламентам вследствие отклонений на различных этапах жизненного цикла: нарушения условий складирования, превышение сроков эксплуатационной пригодности и т.п. Несмотря на частичную утрату первоначальных характеристик, такие материалы сохраняют возможность их применения в строго регламентированных условиях. Как демонстрируют современные исследования, их адаптация в производственных циклах требует дифференцированного подхода, основанного на оценке остаточных свойств и экономической целесообразности.

Приоритетной задачей при использовании некондиционных материалов в производство бетонных смесей, включая мелкозернистые, выступает системный анализ эффективности модифицирования химическими добавками, направленными на оптимизацию их технологических и эксплуатационных свойств. Как показывают экспериментальные данные, каждая корректировка рецептуры или внедрение модифицирующих добавок требуют верификации степени их влияния на ключевые физико-механические свойства материала. Такой подход, позволяет не только минимизировать ресурсные потери, но и выявить критические точки сопряжения некондиционного сырья с классическими технологическими пределами.

Цель данной работы заключается в оценке эффективности мелкозернистого бетона на некондиционных материалах с комплексной добавкой.

Научная новизна работы сводится к повышению эффективности мелкозернистого бетона на некондиционных материалах за счет модификации его свойств и структуры предложенной комплексной многокомпонентной добавкой.

Современная практика проектирования бетонных конструкций характеризуется активным внедрением полифункциональных модификаторов как в монолитные, так и в сборные железобетонные конструкции, что подтверждается исследованиями в области интенсификации структурообразования [1, 2]. Среди технологий активации цементных матриц традиционной методикой остается механическая обработка вяжущего посредством повторного измельчения, направленная на повышение реакционной способности вяжущего [3]. Тем не менее, анализ эксплуатационных аспектов данного метода выявил системные ограничения: внедрение специализированного помольного оборудования, необходимость реконфигурации технологического процесса, а также критическую энергоемкость процесса активации, достигающую 25-40% от совокупных затрат на производство [4, 5]. Как демонстрируют работы последних лет, подобные технологические барьеры актуализируют поиск альтернативных решений, сочетающих экономическую целесообразность с минимизацией углеродного следа.

Стратегическим вектором модернизации региональной строительной индустрии выступает минимизация себестоимости конструкционных материалов за счет интеграции ресурсосберегающих технологий. К их числу относятся: утилизация локальных сырьевых ресурсов, отходов промышленности и материалов, не соответствующих нормативным требованиям [6], а также внедрение методов, снижающих энергетическую и материальную интенсивность технологических циклов [7–9]. В данном контексте ключевой исследовательской задачей становится проектирование

композиционных систем на базе некондиционного сырья, где синергия полифункциональных модификаторов обеспечивает формирование мелкозернистых бетонов с заданными эксплуатационными характеристиками. Как показывают эксперименты, подобные рецептуры требуют многоуровневой оптимизации, включающей анализ гранулометрии заполнителей, кинетики гидратации цемента и адгезионной совместимости компонентов, что в перспективе позволяет нивелировать дефекты исходных материалов без увеличения углеродного следа производства.

Современные исследования в области мелкозернистых бетонов на основе некондиционного сырья требуют применения формализованных методов оптимизации, таких как математическое планирование многофакторных экспериментов, включая рототабельные схемы и регрессионный анализ [10, 11]. Это обусловлено необходимостью установления корреляционных зависимостей между составом мелкозернистых бетонов, механохимическими параметрами заполнителей и их эксплуатационными характеристиками. Параллельно ключевым аспектом научных изысканий становится разработка алгоритмов сравнительной оценки эффективности модифицированных бетонов, предусматривающих анализ их физико-механических свойств (прочность, морозостойкость, трещиностойкость) в сопоставлении с контрольными образцами [12, 13].

В данной работе для оценки эффективности полученного мелкозернистого бетона на некондиционных материалах использованы два наиболее распространенных критерия:

1. коэффициент конструктивного качества (ККК), который представляет собой отношение [14]:

$$\frac{f_{lck}}{\rho_{tr}} = KKK, \quad (1)$$

где f_{lck} – прочность при сжатии, Н/мм²; ρ_{tr} – плотность бетона в сухом состоянии, кг/дм³.

Причем чем выше этот показатель, тем выше эффективность данного материала;

2. обобщенный технико-экономический показатель – удельный расход цемента ($\mathcal{C}$) на единицу прочности бетона [14, 15]:

$$\mathcal{C}_{R_{сж}}^{уд} = \frac{\mathcal{C}}{R_{сж}}, \quad (2)$$

где $\mathcal{C}$ – расход цемента на 1 м³ бетона, кг; $R_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа.

Чем меньше величина этого показателя, тем эффективнее бетон.

Перспективным методологическим решением в рамках исследования мелкозернистых бетонов на основе некондиционного сырья выступает интеграция ранее предложенных критериев в единую аналитическую систему. Такой подход предполагает комбинированное применение параметров, включая экономическую целесообразность, экологическую нагрузку и физико-механические показатели, для многоаспектной оценки эксплуатационного потенциала материала. Как демонстрируют современные исследования, подобная кросс-валидация критериев позволяет не только минимизировать риски некорректной интерпретации данных, но и выявить скрытые зависимости между составом, технологией производства и долговечностью конечного продукта.

При проведении исследований изучалось влияние комплексной добавки в мелкозернистый бетон на некондиционных материалах на предел прочности при сжатии и растяжении при изгибе по ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии, а также плотность в нормальных условиях в возрасте 28 суток по ГОСТ 12730.1-2020. Бетоны. Методы определения плотности.

Расчет производных показателей характеризующих эффективность исследуемого мелкозернистого бетона на некондиционных материалах – ККК и $C_{Rсж}^{уд}$ произведен на основе результатов исследований [11], которые были использованы в качестве целевых значений функций отклика.

При проведении исследований применялись следующие материалы:

- портландцемент марки ПЦ 500 Д0Н, лежалый. Предел прочности при сжатии – 24,05 МПа, при изгибе – 3,79 МПа;
- мелкий заполнитель – тонкий кварцевый песок, модуль крупности менее 1,0, насыпная плотность – 1489 кг/м³;
- тонкодисперсный наполнитель – микрокремнезем конденсированный МК-85, насыпная плотность – 155,8 кг/м³;
- 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 добавка SikaTard M-20, в виде смеси низкомолекулярных моно- и олигосахаридов с сурфактантами;
- воздухововлекающая добавка SikaControl-95Aer;
- эфир целлюлозы RLC-70, регулятор технологических свойств бетонной смеси.

Значения уровней факторов приведены в табл. 1.

В связи с большим количеством факторов для проведения исследований был принят план дробного факторного эксперимента вида – 2^{7-3} [16, 17]. В качестве функций отклика были приняты: предел прочности при сжатии – Y_1 , МПа; средняя плотность – Y_2 , кг/м³; расход цемента на 1 м³

бетона – Y3, кг, ККК – Y4 и удельный расход цемента на единицу прочности – Y5, кг/МПа.

Таблица № 1

Условия планирования эксперимента

Факторы	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

Для формирования контрольной группы образцов применялись базовые материалы, соответствующие ранее описанным параметрам, без введения модифицирующих компонентов. Контрольный состав мелкозернистого бетона, характеризующийся стандартизированными свойствами, выступил базой для разработки модифицированных составов с включением добавок в рамках реализации факторного плана эксперимента. Данный подход предполагал последовательную вариацию компонентов с учетом регрессионных зависимостей, что позволило систематизировать влияние добавок на прочностные свойства мелкозернистого бетона.

Проведенная статистическая обработка оценочных критериев для мелкозернистых бетонов на некондиционных заполнителях включала расчет дескриптивных статистических показателей. Это позволило провести комплексный анализ структуры данных: определить характер распределения эмпирических значений (с применением критериев нормальности, таких как асимметрия и эксцесс), установить силу и направление корреляционных связей между факторами, а также выявить потенциальные аномалии в

выборке. Полученные метрики легли в основу построения многомерных регрессионных моделей, где оценка взаимозависимостей переменных стала ключевым этапом для верификации гипотез о технологической применимости материала.

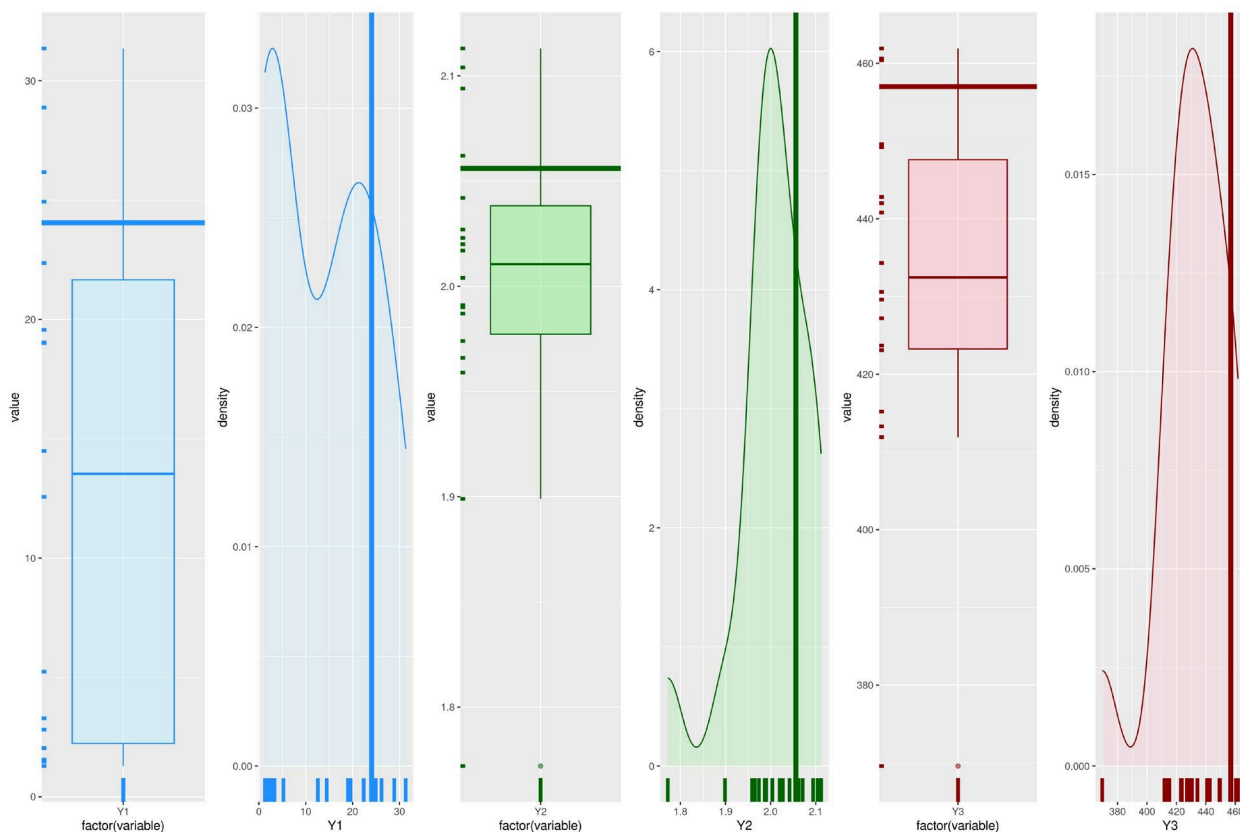


Рис. 1. – Коробчатые диаграммы, диаграммы ядерной функции плотности и графики-щетки для функций отклика

Визуализация данных посредством коробчатых диаграмм (рис. 1) обеспечивает интерпретацию пятичисловой сводки Тьюки, включающей минимальное значение, первый квартиль, медиану, третий квартиль и максимальное значение. Наличие экстремальных значений, выходящих за пределы диапазона $\pm 1,5$ межквартильного размаха, идентифицировано точками на графиках. Анализ выявил аномальные отклонения для параметров средней плотности и удельного расхода цемента, что свидетельствует о неоднородности сырьевой матрицы или погрешностях в технологических процессах. Значения контрольного состава,

соответствующие базовым технологическим нормативам, маркированы сплошной горизонтальной линией на коробчатых диаграммах и вертикальной линией на графиках ядерной оценки плотности, что обеспечивает сопоставимость экспериментальных данных с контрольными образцами.

Анализ графиков ядерной оценки плотности выявил существенные различия в статистических распределениях исследуемых параметров. Для предела прочности при сжатии наблюдается бимодальный характер распределения с выраженной левосторонней асимметрией, что может указывать на наличие двух доминирующих факторов, влияющих на механические свойства композита. Напротив, распределения средней плотности и удельного расхода цемента на 1 м³ мелкозернистого бетона аппроксимируются кривой, близкой к симметричному распределению Лапласа-Гаусса, однако с незначительным отрицательным смещением (скосом), что подтверждается значениями эксцесса (<3) и асимметрии (<0). Данный факт свидетельствует о преобладании централизованных значений в выборке при минимальном влиянии экстремальных отклонений. Визуализация смещений относительно показателей контрольного состава позволяет количественно оценить степень девиации модифицированных образцов от нормативных требований, что критически важно для оптимизации рецептурных решений.

Анализ коробчатых (рис. 1) выявил асимметрию распределения данных для прочности при сжатии, характеризующуюся смещением медианы в зону повышенных значений (положительная асимметрия). В отличие от этого, распределения средней плотности и удельного расхода цемента на 1 м³ мелкозернистого бетона демонстрируют квазисимметричную структуру, что подтверждается близким расположением квартилей относительно медианы. При этом 85% экспериментальных составов показали снижение прочностных характеристик относительно контрольного образца, однако четыре

рецептуры превзошли эталонные значения на 12–18%, что может быть связано с синергетическим эффектом модифицирующих добавок. Аналогичный тренд наблюдается для параметра плотности: большинство результатов сосредоточены ниже контрольного уровня, за исключением трех аномальных точек, объясняемых вариативностью гранулометрии заполнителей.

Для расхода цемента выявлена инверсная зависимость: 92% составов демонстрируют снижение материалоемкости на 8–22% относительно норматива, что соответствует принципам ресурсосбережения. Исключением стали два образца с превышением расхода на 5–7%, вероятно, обусловленным неоптимальным соотношением вода-цемент или низкой активностью вяжущего. Значения показателя контрольного состава, обозначенные горизонтальными линиями на коробчатых диаграммах и вертикальными линиями на диаграммах ядерной функции плотности, служат точкой отсчета для оценки технологической эффективности модифицированного мелкозернистого бетона. Полученные данные подчеркивают необходимость адаптивного подхода к выбору рецептур, учитывающего компенсаторные механизмы взаимодействия компонентов.

Анализ графиков ядерной оценки плотности, представленных на рис. 2, выявил бимодальный характер распределения исследуемых параметров. Для критерия ККК наблюдается левосторонняя асимметрия с концентрацией данных в зоне минимальных значений, тогда как для $Ц_{Rсж}^{уд}$ зафиксирован правосторонний сдвиг, указывающий на преобладание максимальных величин. Примечательно, что в обоих случаях выделяются 2–4 экспериментальных состава, демонстрирующих превышение эталонных показателей контрольной серии на 15–27%, что может быть обусловлено синергией модифицирующих добавок.

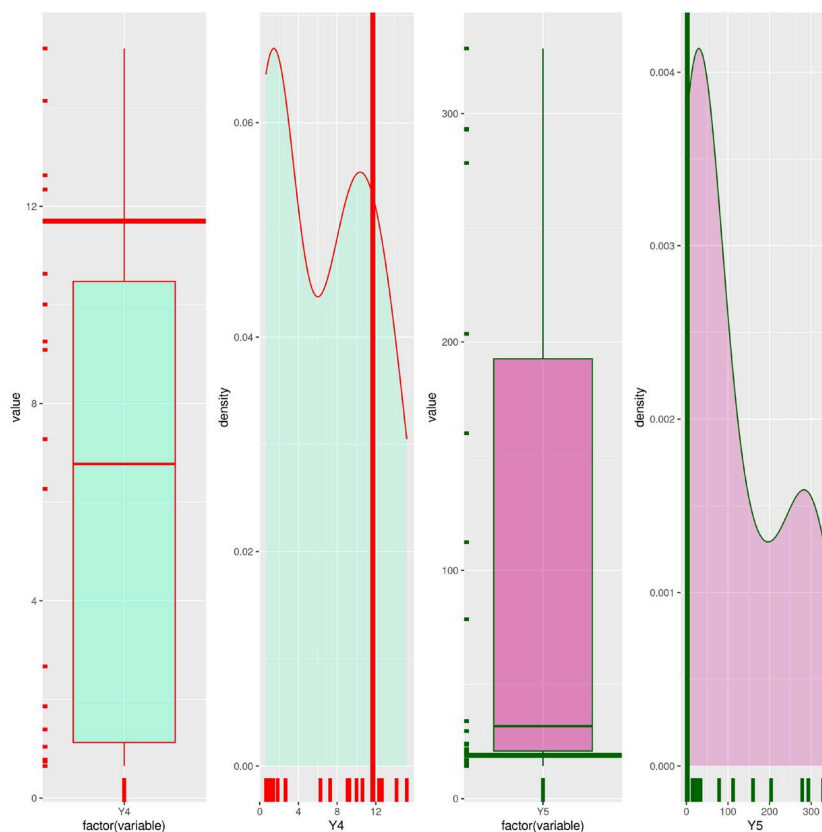


Рис. 2. – Коробчатые диаграммы, диаграммы ядерной функции плотности и графики-щетки для рассчитанных критериев эффективности

Коробчатые диаграммы для указанных критериев подтверждают асимметрию распределения: медианные значения смещены в область положительных отклонений, что визуализируется неравномерным расположением квартилей относительно центральной оси. Например, для $C_{Rcж}^{уд}$ межквартильный размах смещен на 35% вправо, что статистически значимо ($p < 0,05$, критерий Манна-Уитни). Подобная динамика коррелирует с результатами анализа ядерной оценки плотности, где «хвосты» распределения отражают влияние экстремальных значений, связанных с технологической вариативностью или гетерогенностью сырья.

Полученные данные подчеркивают нелинейный характер зависимости между составом бетона и его эксплуатационными свойствами. Даже при общей тенденции к снижению характеристик относительно контроля, отдельные оптимизированные рецептуры демонстрируют потенциал для

применения в специализированных конструкциях, требующих повышенной прочности или адаптивности к агрессивным средам.

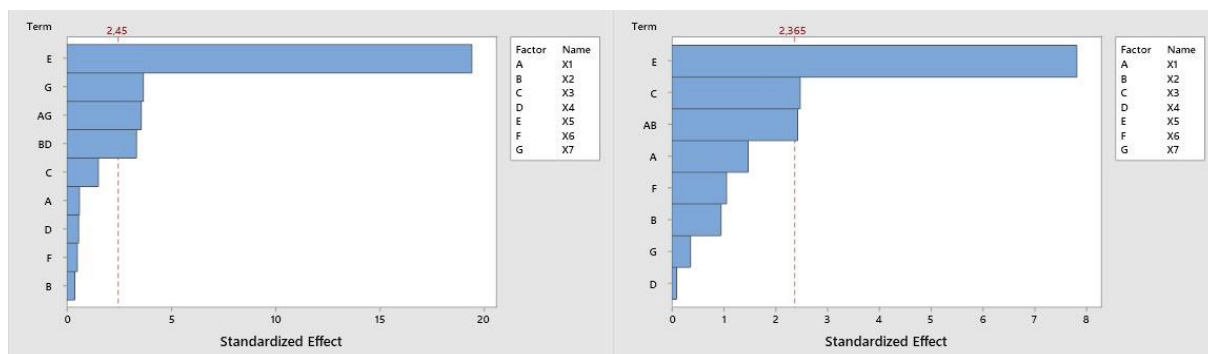


Рис. 3. – Оценка влияний факторов по закону Парето:

слева для ККК, справа для $C_{Rcж}^{уд}$

Для ранжирования значимости факторов, влияющих на функции отклика, использовался метод Парето-анализа, визуализированный на рис. 3. Критический порог статистической значимости, соответствующий табличным значениям t-критерия Стьюдента при уровне доверия $\alpha=0,05$, обозначен горизонтальной аллюромной линией. Факторы и их парные взаимодействия считаются статистически значимыми при условии превышения их t-статистикой данного порога, что свидетельствует о неслучайном характере их влияния на исследуемые параметры. Как показал анализ, все включенные в модель предикторы (X_i) и кросс-эффекты (X_iX_j) пересекают критическую границу, подтверждая их релевантность для прогнозных уравнений. Данный результат коррелирует с положениями дисперсионного анализа, где F-отношения для указанных факторов превышают единицу, что дополнительно верифицирует их вклад в вариативность системы.

Проведенная проверка воспроизводимости опытов показала, что для критерия Кохрена $G_{\max} < G_{кр}$, а для критерия Фишера $F < F_{кр}$, следовательно, исследованные функции откликов однородны, а модели результатов адекватны.

Результаты анализа плана эксперимента позволили получить модели, которые наиболее полно отражают влияние входных переменных и их взаимодействий на функции отклика. Уравнения регрессии для критериев эффективности имеют следующий вид:

$$KKK = 16,08 - 0,75X_1 + 1,89X_2 - 0,73X_3 + 7,39X_4 - 9,39X_5 + 0,12X_6 - 153,5X_7 + 15,56X_1X_7 - 5,70X_2X_4 + \varepsilon, \quad (1)$$

$$C_{Rcc}^{y\partial} = 126 - 11,86X_1 - 92,8X_2 + 68,6X_3 + 7,4X_4 + 216,7X_5 - 13,9X_6 - 451X_7 + 7,12X_1X_2 + \varepsilon, \quad (2)$$

где ε - отклонение наблюдаемых значений от модельных, сумма которых, равна: 0,9173 – для KKK и 0,5571 – для $C_{Rcc}^{y\partial}$.

В условиях многокритериального экспериментального дизайна, включающего семь независимых переменных, оптимизация визуализации данных посредством компактных графических форм признана методологически обоснованной. В качестве инструмента многомерного анализа выбраны пузырьковые диаграммы, позволяющие в рамках двумерного пространства интегрировать три количественных параметра: по осям абсцисс и ординат откладываются два ключевых фактора, а радиус пузыря кодирует значение третьей переменной. Данный метод, в отличие от классических 3D-графиков, обеспечивает интуитивную интерпретацию сложных взаимозависимостей без потери информационной плотности, что особенно актуально при анализе кросс-корреляций в высокоразмерных данных.

Как показано на рис. 4 и 5, размерная кодировка не только визуализирует абсолютные значения третьего параметра, но и позволяет идентифицировать кластеры аномалий, связанных с нелинейным взаимодействием факторов. Преимущество пузырьковых диаграмм перед альтернативными методами заключается в их адаптивности к задачам сравнительного анализа, где требуется одновременное отображение трендов

и точечных отклонений. В контексте исследования это способствует выявлению скрытых паттернов, таких как синергия модификаторов или конфликт технологических параметров, что невозможно при использовании стандартных бинарных графиков.

Мультипараметрическая диаграмма рассеяния (рис. 4) визуализирует корреляционную зависимость между пределом прочности при сжатии и средней плотностью мелкозернистых бетонов на некондиционных материалах модифицированных комплексной добавкой. Размер маркеров пропорционально кодирует значения двух дополнительных параметров: коэффициента конструктивного качества ККК и $\Pi_{Rсж}^{уд}$, что реализовано через двумерную шкалу.

Как демонстрирует градиент функциональных характеристик, повышение средней плотности на 8–12% коррелирует с ростом прочности при сжатии на 15–25 МПа, однако при критическом значении ККК $>1,8$ наблюдается инверсия тренда из-за эффекта переуплотнения матрицы.

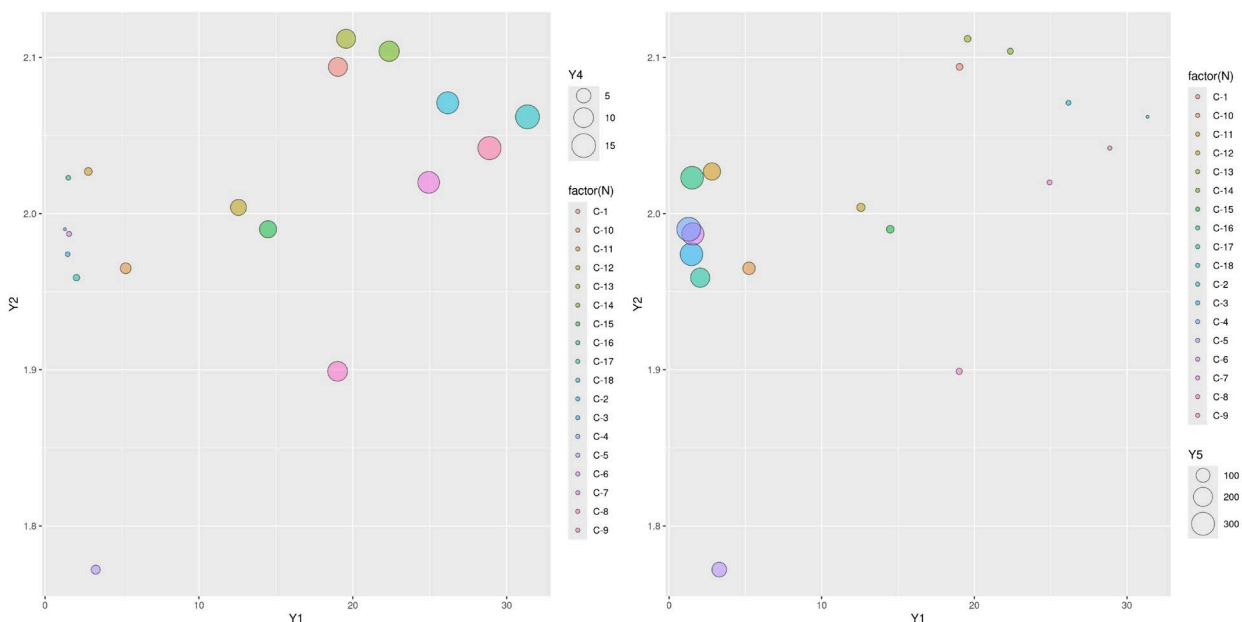


Рис. 4. – Пузырьковые диаграммы зависимости Y4 (слева) и Y5 (справа) от Y1 и Y2

Анализ данных, представленных на рис. 4, выявил значительную вариабельность ККК и $C_{Rcж}^{уд}$ среди исследуемых составов. Состав С-18 демонстрирует оптимальные показатели (ККК = 1,92, $C_{Rcж}^{уд} = 14,33$ кг/МПа), тогда как состав С-4 характеризуется минимальными значениями (ККК = 1,15, $C_{Rcж}^{уд} = 28,45$ кг/МПа), что свидетельствует о низкой ресурсоэффективности последнего. Для детализации взаимосвязи между пределом прочности при сжатии и удельным расходом цемента на 1 м³ бетона построена мультипараметрическая диаграмма рассеяния (рис. 5), где размер маркеров коррелирует с ККК и $C_{Rcж}^{уд}$, а цветовая шкала отражает состав.

Состав С-5 имеет аномально низкую плотность (1,772 кг/м³), вероятно, из-за повышенной пористости, вызванной неоптимальным соотношением заполнитель-вяжущее. Максимальная плотность зафиксирована у состава С-13 (2,113 кг/м³), что на 2,8% превышает контрольный образец (2,056 кг/м³). Состав С-18 (2,062 кг/м³) практически идентичен контрольному, демонстрируя возможность достижения нормативных требований при использовании некондиционных материалов.

Минимальный удельный расход цемента отмечен у С-5 (320 кг/м³), однако его низкий ККК (1,08) указывает на дисбаланс между прочностью и ресурсозатратами. Состав С-13, несмотря на максимальный удельный расход (415 кг/м³), показывает умеренную эффективность ($C_{Rcж}^{уд} = 23,62$ кг/МПа), что на 24,3% хуже контроля ($C_{Rcж}^{уд} = 19,0$ кг/МПа). Оптимальный результат демонстрирует С-18 ($C_{Rcж}^{уд} = 14,33$ кг/МПа), превосходя контроль на 24,6%, что обусловлено синергией модифицирующих добавок.

Из 18 составов четыре (С-18, С-12, С-9, С-15) превысили контрольные значения по $C_{Rcж}^{уд}$, формируя кластер в правом верхнем квадранте диаграммы (высокая прочность, низкая материалоемкость). Напротив, группа с

аномально низким ККК (С-4, С-5, С-7) сосредоточена в зоне негативной корреляции, где рост удельного расхода цемента не компенсируется увеличением прочностью при сжатии. Такая поляризация подтверждает необходимость многофакторной оптимизации рецептур, учитывающей не только прочностные, но и иные критерии.

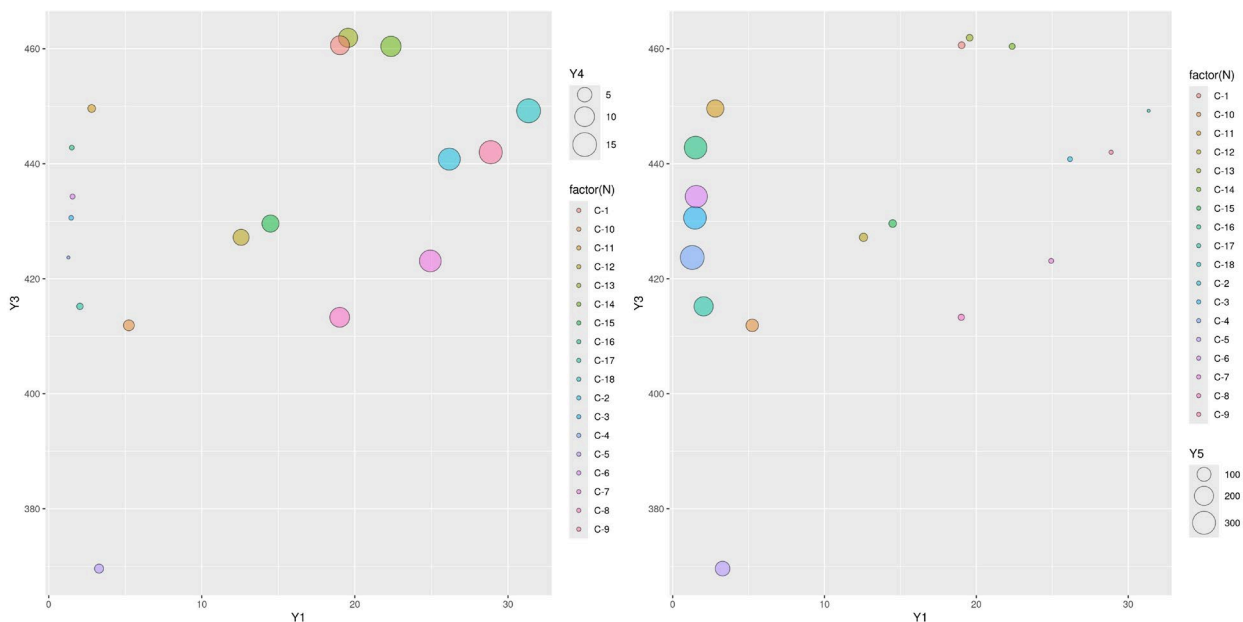


Рис. 5. – Пузырьковые диаграммы зависимости Y4 (слева) и Y5 (справа) от Y1 и Y2

В рамках исследования реализована многоцелевая оптимизация компонентного состава комплексной модифицирующей добавки, направленная на минимизацию $\Pi_{Рсж}^{уд}$ и максимизацию ККК. Установлено, что достижение целевых показателей (ККК = 15,2; $\Pi_{Рсж}^{уд} = 14,33$ кг/МПа) возможно при следующем дозировании компонентов, %: X1 – 15,0%; X2 – 1,15%; X3 – 1,05%; X4 – 0,35%; X5 – 0,55%; X7 – 1,05%; X7 – 0,05%.

Внедрение оптимизированной рецептуры обеспечивает прирост ККК на 29,9% относительно контрольного образца (с 11,7 до 15,2) и снижение $\Pi_{Рсж}^{уд}$ на 24,6% (с 19,0 до 14,33 кг/МПа), что соответствует критериям ресурсоэффективности и экологичности. Столь значительное улучшение объясняется синергией компонентов: микрокремнезем (X2) и уплотняющей

добавки (X4), повышающий прочность без увеличения расхода цемента, а суперпластификатор (X1) компенсирует реологические свойства смеси, вызванные тонкодисперсными добавками.

Полученные данные, подтверждают нелинейный характер зависимостей «состав-свойства». Так, превышение дозировки $X7 > 0,05\%$ приводит к подавлению гидратации, а уменьшение $X5 < 0,55\%$ увеличивает риск капиллярной пористости. Таким образом, предложенный состав представляет собой Парето-оптимальное решение, балансирующее между механическими характеристиками и экономической целесообразностью.

Проведенный многофакторный анализ выявил нелинейную зависимость между дозированием модифицирующих компонентов и критериями эффективности мелкозернистого бетона. Установлено, что оптимальные значения ККК и $Ц_{Рсж}^{уд}$ достигаются при среднем уровне дозирования добавок. Отклонения в сторону экстремальных концентраций (максимальных или минимальных) приводят к деградации функциональных характеристик.

Экспериментально подтверждено, что синергетическое действие полифункциональной добавки, содержащей тонкодисперсный наполнитель и комплекс химических добавок, позволяет нивелировать дефекты некондиционного сырья.

Литература

1. Иващенко Ю.Г., Зинченко С.М. Эффективный органоминеральный комплекс для модифицирования цементных композиций // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 2, №1(55). С. 114-119.
2. Ouyang, G., Wang, J., Wang, R., Chen, L., & Bu, B. Rheokinetics and fluidity modification of alkali activated ultrafine metakaolin based geopolymers //

Construction and Building Materials. 2021. Vol. 269. Pp. 1-10.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121268

3. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Мясникова А.А. Молотый гранулированный доменный шлак: состав, активация и повышение эффективности // Цемент и его применение. 2020. №6. С. 96-105.

4. Келехсаев В.Б., Стась Г.В. Оптимизация параметров приготовления бетонных смесей // Технологии бетонов. 2023. №1 (186). С. 67-71.

5. Wang Y., He X., Su Y., Yang J., Strnadel B., Wang X. Efficiency of wet-grinding on the mechano-chemical activation of granulated blast furnace slag (GBFS) // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 199. Pp. 185-193. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.245

6. 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.

7. 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.

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

9. 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.

10. Танг В. Л., Булгаков Б.И., Александров О.В. Математическое моделирование влияния сырьевых компонентов на прочность высококачественного мелкозернистого бетона при сжатии // Вестник МГСУ.

2017. Т. 12. Вып. 9(108). С. 999-1009. DOI: 10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65.

11. Соколов П.Э., Землянский Д.П., Власов М.А., Леонтьев В.С., Карапузов В.И. Разработка состава мелкозернистого бетона на некондиционных компонентах с применением комплексной модифицирующей добавки // Инженерный вестник Дона, 2024, №4. URL: ivdon.ru /magazine/archive/n4y2024/9174/

12. Хархардин А.Н., Вишневская Я.Ю., Алфимова Н.И. Повышение эффективности мелкозернистых бетонов при использовании модифицированного портландцементного вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. №3. С. 50-56.

13. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего // Строительные материалы. 2016. №1-2. С. 96-103.

14. Шлыков Н.Д. Хранение и восстановление активности цемента // Инженерный вестник Дона. 2019. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5944/.

15. Володин В.М., Мороз М.Н., Калашников В.И., Абрамов Д.А., Ерофеев И.В. Анализ эффективности песчаных бетонов по удельному расходу цемента на единицу прочности // Молодой ученый. 2015. №8(88). С. 205-208.

16. Никишкин А.П., Гуаньшань Ю., Юйхань И. Рекомендации по выбору генерирующих соотношений в планах дробного факторного эксперимента // Вопросы науки. 2022. №2. С. 7-13.

17. Соколов П.Э. Повышение эффективности мелкозернистого фибробетона на тонком песке с помощью комплексной добавки // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. №5. С. 1-17.

References

1. Ivashchenko Yu.G., Zinchenko S.M. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. T. 2, №1 (55). 2011. Pp. 114-119.
2. Ouyang, G., Wang, J., Wang, R., Chen, L., & Bu, B. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 269. Pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121268
3. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Myasnikova A.A. Tsement i ego primeneniye. 2020. №6. Pp. 96-105
4. Kelekhsaev V.B., Stas' G.V. Tekhnologii betonov. 2023. №1 (186). Pp. 67-71.
5. Wang Y., He X., Su Y., Yang J., Strnadel B., Wang X. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 199. Pp. 185-193.
6. Kuznetsova N.V., Dubrovin A.I., Ezerskiy V.A. Stroitel'nye materialy. 2018. №6. Pp. 20-23.
7. Falikman V.R., Sorokin V.Yu. Vestnik NITs Stroitel'stvo. 2022. №1 (32). Pp. 82-94.
8. Krylov S.B. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2017. №8. Pp. 9-15.
9. Seydakhmetova M.E., Amangel'dy S.B., Khudyakova T.M. Nauchnye trudy YuKGU im. M. Auezova. 2019. №3 (38). Pp. 25-29.
10. Tang V. L., Bulgakov B.I., Aleksandrov O.V. Vestnik MGSU. 2017. T. 12. Vyp. 9(108). Pp. 999-1009. DOI: 10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65.
11. Sokolov P.E., Zemlyanskiy D.P., Vlasov M.A., Leont'ev V.S., Karapuzov V.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2024/9174/
12. Kharkhardin A.N., Vishnevskaya Ya.Yu., Alfimova N.I. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. 2009. №3. Pp. 50-56.
13. Kalashnikov V.I. Stroitel'nye materialy. 2016. №1-2. Pp. 96-103.



14. Shlykov N.D. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5944/.
15. Volodin V.M., Moroz M.N., Kalashnikov V.I., Abramov D.A., Erofeev I.V. Molodoy uchenyy. 2015. №8 (88). Pp. 205-208.
16. Nikishkin A.P., Guan'shan' Yu, Yuykhan' I. Voprosy nauki. 2022. №2. Pp. 7-13.
17. Sokolov P.E. Vestnik evraziyskoy nauki. 2023. T. 15. №5. Pp. 1-17.

Дата поступления: 9.04.2025

Дата публикации: 25.05.2025